

N° d'ordre:

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



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

THÈSE DE DOCTORAT

3^{ÈME} Cycle

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

Domaine : LMD Mathématiques Informatique
Filière : Informatique
Spécialité : Informatique

Par

M^R AMIR ABDELKADER AOUIZ

QUALITÉ DE SERVICE DANS LES PROTOCOLES MULTI-CHEMINS

Soutenue le 10-06-2020 devant le jury :

Pr. SIDI MOHAMED BENSLIMANE	ESI-SBA	Examineur
Pr. JALEL BEN OTHMAN	University of Paris	Examineur
Pr. AHMED SERHROUCHNI	Telecom ParisTech	Rapporteur
Pr. MOHAMED LEHSAINI	Université de Tlemcen	Rapporteur
Pr. PASCAL LORENZ	UHA	Co-Directeur de thèse
Dr. SOFIANE BOUKLI-HACENE	UDL SBA	Directeur de thèse

Année Universitaire : 2019- 2020

« Dieu bénit l'homme, Non pour avoir trouvé, mais pour avoir cherché. »
Victor Hugo.

REMERCIEMENTS

JE tiens, avant toute chose, à remercier le bon Dieu qui m'a donné la force et la patience afin de réaliser ce travail. Je tiens à exprimer ma très profonde gratitude à mon directeur de recherche, Monsieur BOUKLI-HACENE Sofiane ainsi que mon co-directeur Monsieur LORENZ Pascal qui ont bien voulu diriger cette recherche avec autant de patience et de vigilance. Mes remerciements les plus sincères sont adressés aux membres du jury et à toute personne qui a contribué à la réalisation de cette modeste recherche.

Colmar, le 28 juin 2020.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	vii
INTRODUCTION GÉNÉRAL	1
1 RÉSEAUX SANS FIL	4
1.1 RÉSEAUX SANS FIL	5
1.2 LES CATÉGORIES DES RÉSEAUX SANS FIL	5
1.2.1 Catégorisation selon la zone de couverture	5
1.2.2 Catégorisation selon le mode opératoire	7
1.3 CONTRAINTES DE LA COMMUNICATION SANS FIL	9
1.4 MODÈLE OSI ET TCP/IP	9
1.5 LA NORME IEEE 802.11	11
1.6 LES RÉSEAUX MOBILES AD HOC	12
1.6.1 Définition	12
1.6.2 Domaines d'applications des réseaux Ad hoc	12
1.6.3 Caractéristiques des réseaux Ad hoc	14
1.6.4 Modes de communication dans les réseaux Ad hoc	15
1.7 ROUTAGE AD HOC	16
1.7.1 Protocoles de routage proactifs	17
1.7.2 Protocoles de routage réactifs	17
1.7.3 Protocoles de routage hybrides	17
1.7.4 Principaux protocoles de routage Ad hoc	18
CONCLUSION	21
2 ROUTAGE MULTI-CHEMINS ET QUALITÉ DE SERVICE	22
2.1 ROUTAGE MULTI-CHEMINS	23
2.2 OBJECTIF DU ROUTAGE MULTI-CHEMINS	23
2.3 TYPE DES CHEMINS	24
2.4 LE PROTOCOLE AOMDV	24
2.5 TYPES DES MESSAGES AOMDV	25
2.6 FONCTIONNEMENT DU PROTOCOLE AOMDV	27
2.6.1 Envoi de demande de découverte de chemin RREQ :	27
2.6.2 Réception et réponse à une Requête de Route :	29
2.6.3 Entretien des routes :	31
2.7 CRITÈRES DE PERFORMANCES DANS LES RÉSEAUX MANET	32
2.8 LA QUALITÉ DE SERVICE DANS LES RÉSEAUX AD HOC	33
2.8.1 Définition	33

2.8.2	Objectifs de qualité de service dans les réseaux ad hoc . . .	33
2.8.3	Routage avec QoS : composants et mécanismes	34
2.8.4	Exemple des protocoles de routage avec qualité de service	35
2.9	MODÉLISATION ET SIMULATION DES RÉSEAUX AD HOC	36
2.9.1	Intérêt de simulation	36
2.9.2	Modèle de mobilité	36
2.9.3	Network Simulator 2 (NS2)	38
	CONCLUSION	40
3	CONTRIBUTION I :MAXIMISATION DE LA DURÉE DE VIE DU RÉ-	
	SEAU	41
3.1	CONSOMMATION D'ÉNERGIE ET LA DURÉE DE VIE D'UN RÉSEAU	42
3.2	SOURCES DE PERTE D'ÉNERGIE	43
3.3	ÉTAT DE L'ART	44
3.3.1	Travaux sur la durée de vie des nœuds et la consom-	
	mation d'énergie	44
3.3.2	Travaux sur la prédiction de défaillance de liens	46
3.4	APPROCHE PROPOSÉE	48
3.4.1	Définition du problème	48
3.4.2	Schéma proposé	48
3.5	SIMULATION ET RÉSULTATS	54
	CONCLUSION	59
4	CONTRIBUTION II :PROTOCOLE D'ÉQUILIBRAGE DE CHARGE	
	MULTI-CHEMINS BASÉ SUR LE TAUX D'ACTIVITÉ DE CANAL	
	POUR LES RÉSEAUX AD HOC	60
4.1	CONGESTION DANS LES RÉSEAUX MANET	61
4.2	ÉTAT DE L'ART	63
4.2.1	Détection et évitement des zones centrales encombrées . .	63
4.2.2	Application du paramètre de taux d'activité du canal . .	66
4.3	APPROCHE PROPOSÉE	68
4.3.1	définition de problèmes	68
4.3.2	Modèle du schéma proposé	70
4.4	RÉSULTATS DE SIMULATION	73
	CONCLUSION	79
5	CONCLUSION ET PERSPECTIVE	80
5.1	CONCLUSION	81
5.2	PERSPECTIVE	83
	LISTE DES PUBLICATIONS	84
	A ANNEXES	85
A.1	SIMULATION AVEC NS2 (SCRIPTS ET DÉTAILS)	86
	BIBLIOGRAPHIE	96
	NOTATIONS	107

LISTE DES FIGURES

1.1	Réseaux Sans Fil	5
1.2	Types Des Réseaux Sans Fil	7
1.3	Les réseaux sans fil avec infrastructure	8
1.4	Les réseaux sans fil sans infrastructure	8
1.5	TCP-IP modèle vs OSI modèle	10
1.6	L'architecture 802.11	11
1.7	Domaines d'applications des réseaux Ad hoc	13
1.8	Communication unicast	15
1.9	Communication multicast	15
1.10	Communication broadcast	16
1.11	Protocoles du routages	16
1.12	Protocole de routage AODV	18
1.13	Optimisation de l'inondation en utilisant les MPRs	19
1.14	Protocole de routage ZRP	20
2.1	Format de paquet RREQ	25
2.2	Format de paquet RREP	25
2.3	Format de paquet HELLO	26
2.4	Format de paquet RERR	26
2.5	Diffusion des paquets RREQ.	27
2.6	Algorithme de découverte de routes.	28
2.7	Flot de paquets RREP et l'établissement des chemins	29
2.8	Algorithme d'établissement des chemins.	30
2.9	Génération des paquets RERR à cause de la défaillance d'une liaison	31
2.10	Besoin des applications en terme délai et bande passante	34
2.11	Déplacement d'un nœud en utilisant le modèle de Random Walk	37
2.12	Déplacement d'un nœud en utilisant le modèle de Random Direction	38
2.13	Architecture du simulateur NS2	39
3.1	L'écoute abusive	43
3.2	Format des paquets AOMDV après l'ajout du champ Pckt_Var	51
3.3	Sortie de la simulation	55
3.4	Nombre de nœuds vivants	56
3.5	Surcharge du réseau	56
3.6	Taux de consommation d'énergie	57
3.7	taux- de livraison des paquets	58

4.1	Les principaux paramètres liés au contrôle de congestion .	62
4.2	densité des communications du réseau	63
4.3	distance vs nombre de routes	64
4.4	Modèle du réseau	68
4.5	Sortie de la simulation	74
4.6	Le taux de livraison de paquets avec succès	76
4.7	Surcharge du réseau	77
4.8	Délai moyen de bout en bout	78
A.1	L'interface de commande de linux	86

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Hiérarchie des réseaux sans fil	6
2.1	Notation des champs des paquets	26
3.1	Tableau de synthèse des travaux connexes	47
3.2	Description des notations des algorithmes	49
3.3	Paramètres de simulation	54
4.1	Tableau de synthèse des travaux connexes.	67
4.2	Paramètres de simulation	74

INTRODUCTION GÉNÉRALE

EN raison d'utilisation massive d'Internet au cours des dernières décennies, le besoin de se connecter, partager et accéder à l'information dans n'importe quel moment est devenu crucial. Cependant, dans les cas où le déploiement d'une infrastructure Internet est coûteux ou dans les scénarios où le besoin d'une communication rapide et immédiate est urgent, nous faisons appel aux réseaux mobiles Ad hoc ou MANET.

Les réseaux MANET sont des réseaux mobiles capables de fonctionner sans fil ni infrastructure préexistante. En raison de leur flexibilité, ces réseaux sont utiles dans le domaine militaire pour la communication sur les champs de bataille, les réseaux de véhicules pour signaler les accidents de la route, les scénarios de catastrophes pour lancer des opérations de sauvetage et dans les interventions médicales, etc.

Les réseaux MANET sont caractérisés par leurs environnements dynamiques, capacités limitées de batterie et leurs bandes passantes réduites. Étant donné que les nœuds coopèrent entre eux pour acheminer les paquets, MANET souffre principalement de la mobilité des nœuds et de la défaillance des liaisons. Pour surmonter ces difficultés, de nouveaux types de protocoles de routage sont apparus, dont les protocoles de routage multi-chemins. Les protocoles de routage multi-chemins découvrent et maintiennent multiples itinéraires de la source vers la destination. Ces routes sont utilisées pour répartir le trafic entre plusieurs chemins disjoints. Ceci peut réduire significativement la probabilité de collision des paquets.

Toutefois, en raison du maintien de plusieurs routes, les protocoles de routage multi-chemins souffrent principalement de la congestion dans les réseaux denses. En fait, la plupart des protocoles de routage reposent sur le chemin le plus court pour acheminer les paquets. Bien que cette solution puisse réduire la fréquence des pannes de liaison elle rajoute une surcharge supplémentaire sur les nœuds intermédiaires situés au centre du réseau.

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier les techniques de routage multi-chemins dans un contexte sans fil multi-sauts en vue d'obtenir de meilleures performances. Une étude d'investigation est menée sur le protocole multi-chemins le plus connu AOMDV afin d'améliorer la qualité de service de communication.

Motivation et contribution

La qualité de service peut être fournie aux différents niveaux, mais notre étude se focalise principalement sur l'optimisation de durée de vie des nœuds mobiles et la réduction de congestion des communications dans le réseau.

Nous avons proposé en premier lieu une solution en utilisant les valeurs historiques de l'énergie des nœuds pour calculer le taux de variation d'énergie, cette information peut révéler s'il y a une consommation excessive d'énergie. Des actions multiples peuvent augmenter la consommation d'énergie, comme par exemple l'augmentation du nombre de paquets passant par le nœud, ainsi que l'augmentation de la transmission des paquets d'erreur de route, etc. L'objectif principal de ce travail est de maximiser la durée de vie des nœuds, de réduire la surcharge et d'économiser l'énergie consommée par le protocole AOMDV. Le schéma proposé tente de résoudre le problème mentionné ci-dessus en s'appuyant sur des nœuds avec une variation d'énergie minimale.

La deuxième solution se focalise sur la réduction de congestion du réseau. Un nouveau paramètre pour repérer les nœuds congestionnés au centre du réseau en fonction du taux d'activité du canal est présenté. Ceci motive l'approche proposée en repoussant le trafic du centre du réseau sur la base du nouveau paramètre proposé. Enfin, l'approche proposée est comparée aux plusieurs protocoles comme AODV, AOMDV et à notre version modifiée de l'équilibrage de charge basée sur la taille de la file d'attente en prennent en charge plusieurs chemins appelés QMLB. Plusieurs paramètres ont été utilisés pour l'évaluation des performances, comme le pourcentage de paquets reçus avec succès, frais de congestion de réseau et délai de bout en bout.

Structure de la thèse

Ce mémoire est organisé de la manière suivante :

- Dans le premier chapitre, nous présentons un aperçu général sur les réseaux sans fil, ensuite nous détaillons les réseaux Ad hoc, en donnant leurs caractéristiques principales, leurs domaines d'application, ainsi que les mécanismes de routage Ad hoc.
- Dans le deuxième chapitre, nous étudions le fonctionnement du protocole de routage multi-chemins AOMDV, ses caractéristiques et les différents types de message de contrôles utilisées pour établir la connexion. Enfin nous présentons les différents paramètres liés à la qualité de service dans les réseaux MANET, ainsi les différents outils nécessaires pour l'évaluation des performances du réseau.
- Nous présentons dans le troisième chapitre notre schéma pour l'optimisation de la durée de vie des nœuds mobiles dans les réseaux MANET en commençant par présenter les différents travaux qui existent déjà dans la littérature. Notre schéma d'optimisation d'énergie en utilisant les données historiques circulantes dans le réseau est présenté par la suite. Les résultats de simulations obtenus avec le fameux simulateur NS2 sont présentés par la suite.

- Nous présentons dans le quatrième chapitre, notre schéma pour repérer et éviter les nœuds congestionnés situés au centre du réseau. Plusieurs travaux pour mesurer la centralité du réseau sont présentés. Notre paramètre de centralité basée sur le taux d'activité du canal est présenté par la suite. Les résultats de simulation en comparaison avec d'autres protocoles de routages sont validés par le simulateur NS2.
- Dans le dernier chapitre nous concluons ce mémoire par une conclusion générale. Nous présenterons par la suite quelques perspectives pour enrichir le domaine de recherche en ce qui concerne la qualité de service dans les réseaux MANET.

RÉSEAUX SANS FIL



SOMMAIRE

1.1	RÉSEAUX SANS FIL	5
1.2	LES CATÉGORIES DES RÉSEAUX SANS FIL	5
1.2.1	Catégorisation selon la zone de couverture	5
1.2.2	Catégorisation selon le mode opératoire	7
1.3	CONTRAINTES DE LA COMMUNICATION SANS FIL	9
1.4	MODÈLE OSI ET TCP/IP	9
1.5	LA NORME IEEE 802.11	11
1.6	LES RÉSEAUX MOBILES AD HOC	12
1.6.1	Définition	12
1.6.2	Domaines d'applications des réseaux Ad hoc	12
1.6.3	Caractéristiques des réseaux Ad hoc	14
1.6.4	Modes de communication dans les réseaux Ad hoc	15
1.7	ROUTAGE AD HOC	16
1.7.1	Protocoles de routage proactifs	17
1.7.2	Protocoles de routage réactifs	17
1.7.3	Protocoles de routage hybrides	17
1.7.4	Principaux protocoles de routage Ad hoc	18
	CONCLUSION	21

LES réseaux sans fil sont des réseaux qui ont été conçus pour assurer une communication rapide et simple entre nœuds formant ces réseaux. Le coût de modélisation, de gestion et de maintenance de ces réseaux est beaucoup moins cher que celle des réseaux filaires. La technique de communication sans fil est utilisée dans plusieurs applications, dont les réseaux véhiculaires, les visio conférence...etc. Pour cela, plusieurs protocoles et outils sont développés pour supporter les communications sans fil. Dans ce premier chapitre nous allons présenter quelques notions de base sur les réseaux sans fil, les différentes applications ainsi que les différents outils et mécanismes pour construire un réseau de communication sans fil.

1.1 RÉSEAUX SANS FIL

Les réseaux sans fil sont des réseaux conçus pour faciliter la communication entre les différents équipements réseaux sans l'utilisation d'une liaison filaire (Pujolle 2014). Les machines participantes peuvent communiquer en utilisant une technologie de communication sans fil comme WiFi, Bluetooth, etc (Van der Schaar & Chou 2011). Les réseaux sans fil permettent aux utilisateurs de rester connectés à l'antenne de communication tout en se déplaçant dans une zone géographique plus ou moins étendue (Essinger *et al.* 2015).

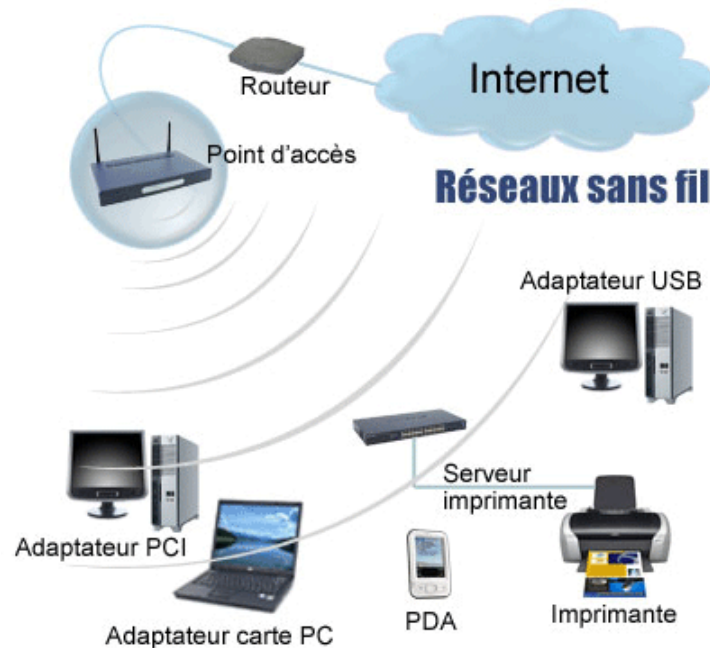


FIGURE 1.1 – Réseaux Sans Fil

1.2 LES CATÉGORIES DES RÉSEAUX SANS FIL

1.2.1 Catégorisation selon la zone de couverture

WPAN (Wireless Personal Area Network)

Les réseaux personnels ou domestiques, sont des réseaux conçus pour relier des machines très peu éloignées, ils sont caractérisés par une faible portée (quelques dizaines de mètres) (Miller & Bisdikian 2001). Différentes technologies sont utilisées dans les WPAN comme Bluetooth et ZIGBEE. Bluetooth utilise la bande de fréquence de 2,4 GHz, son débit théorique de est supérieur à 24 Mbits/s pour une portée de 100 mètres (Ryan 2013). ZIGBEE est conçu pour engendrer une faible consommation d'énergie permettant aux batteries des appareils de durer le plus longtemps possible (Farahani 2011).

WLAN (Wireless Local Area Network)

Cette catégorie comprend les réseaux sans fil offrant une zone de couverture qui correspond au réseau local d'entreprise, soit quelques centaines de mètres (Evennou & Marx 2006). Le but de ces réseaux est d'interconnecter les différentes machines qui sont situées dans un périmètre géographiquement restreint en utilisant la technologie Wi-Fi (Wireless Fidelity). Wi-Fi est la technologie connue aussi sous le nom de la norme IEEE 802.11 (Nojima *et al.* 2012) qui permet de relier les différents équipements réseaux avec un débit théorique de 11 Mbit/s ou 6 Mbit/s réels en 802.11b jusqu'à 1 Gb dans la norme 802.11ac (Lin *et al.* 2018).

WMAN (Wireless Metropolitan Area Network)

Les réseaux inclus dans cette catégorie offrent une couverture de la taille d'un campus ou d'une ville (Van Den Bossche 2007). Le but de ces réseaux est d'interconnecter divers réseaux fixes ou réseaux sans fil qui se trouvent sur la même région, tout en économisant le coût élevé des liaisons physiques. Ces réseaux se basent sur la norme IEEE 802.16 et utilisent la technologie WiMax pour établir une connectivité (Rakesh *et al.* 2014). WiMAX exploite la bande de fréquence de 2 à 11 GHz en permettant d'obtenir des débits de l'ordre de 70 Mbit/s sur un rayon de plusieurs kilomètres (Ahson & Ilyas 2018).

WWAN (Wireless Wide Area Network)

Le réseau étendu sans fil (WWAN) est une forme de réseau sans fil, connue également sous le nom de réseau cellulaire mobile. Cette famille regroupe les réseaux étendus sur une zone de couverture de plusieurs kilomètres (Jiang *et al.* 2011). Les technologies principales utilisées sont : GSM (Global System for Mobile communication), GPRS (General Packet Radio Service), EDGE (Enhanced Data GSM Environment), l'UMTS (Hong *et al.* 2014) (Universal Mobile Telecommunication System), ainsi que la technologie LTE (Long Term Evolution) et LTE-Advanced. Ces technologies sont proposées à l'échelle régionale, nationale ou même mondiale et sont fournies par un fournisseur de services sans fil (Dahlman *et al.* 2016). La figure 1.2 présente les différentes technologies des réseaux sans fil selon leurs portées et le tableau 1.1 récapitule cette hiérarchie.

TABLE 1.1 – Hiérarchie des réseaux sans fil

Niveau	Connexions typiques	Technologies sans fil
WPAN	Périphériques et accessoires personnels	Bluetooth, IEEE 802.12
WLAN	Ordinateurs et matériel de communication	IEEE 802.11
WMAN	Accès WAN aux hôtes locaux	WiMAX, IEEE 802.16, IEEE 802.16 a - e
WWAN	Points d'accès au réseau	GPRS/EDGE

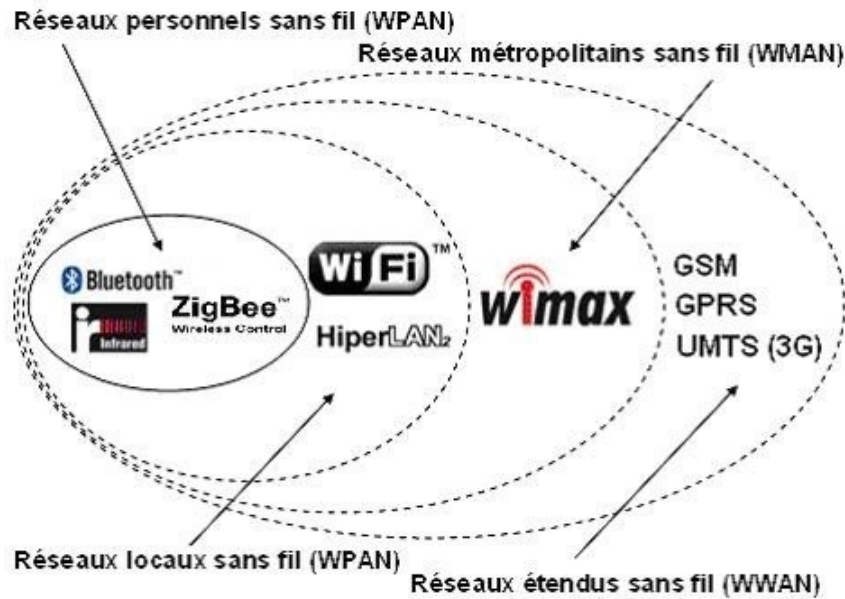


FIGURE 1.2 – Types Des Réseaux Sans Fil

1.2.2 Catégorisation selon le mode opératoire

Les réseaux sans fil avec infrastructure :

Les réseaux sans fil avec infrastructure intègre deux ensembles d'entités distinctes (Defaye 2006) :

Entité fixe : appelé station support mobile (Mobile Support Station) ou station de base (SB). Les SB sont localisés dans une zone géographique limitée, appelée BSS ou Basic Service Set (ensemble de services de base), et munis d'une interface de communication sans fil pour la communication directe avec les sites ou unités mobiles, Chaque station de base correspond une BSS à partir de laquelle des unités mobiles peuvent émettre et recevoir les paquets.

Entité mobile : les entités mobiles sont généralement représentées par des unités mobiles telles que les PC , smartphones. Les entités mobiles sont directement connectées à une station de base ou un point d'accès AP via des liaisons sans fil. Les sites fixes sont interconnectés entre eux à travers un réseau de communication filaire, pour permettre l'extension de la couverture du réseau, l'ensemble des BSS connectés est appelé ESS (Extended Service Set).

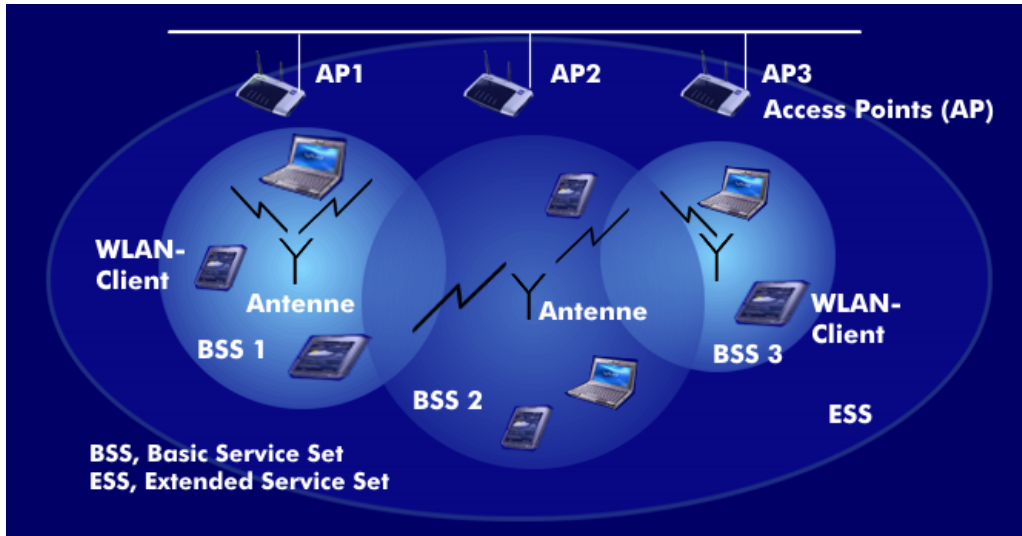


FIGURE 1.3 – Les réseaux sans fil avec infrastructure

Le réseau mobile sans infrastructure

Les réseaux sans infrastructure ne comportent pas des entités fixes, tous les unités du réseau sont mobiles et se communiquent entre eux d'une manière directe en utilisant leurs interfaces de communication sans fil. L'absence d'infrastructure ou du réseau filaire composé par les stations de base; oblige les unités mobiles à se comporter comme des routeurs qui participent à la découverte et la maintenance des chemins pour acheminer les paquets vers les hôtes destinataires dans le réseau (Xuan 2007).

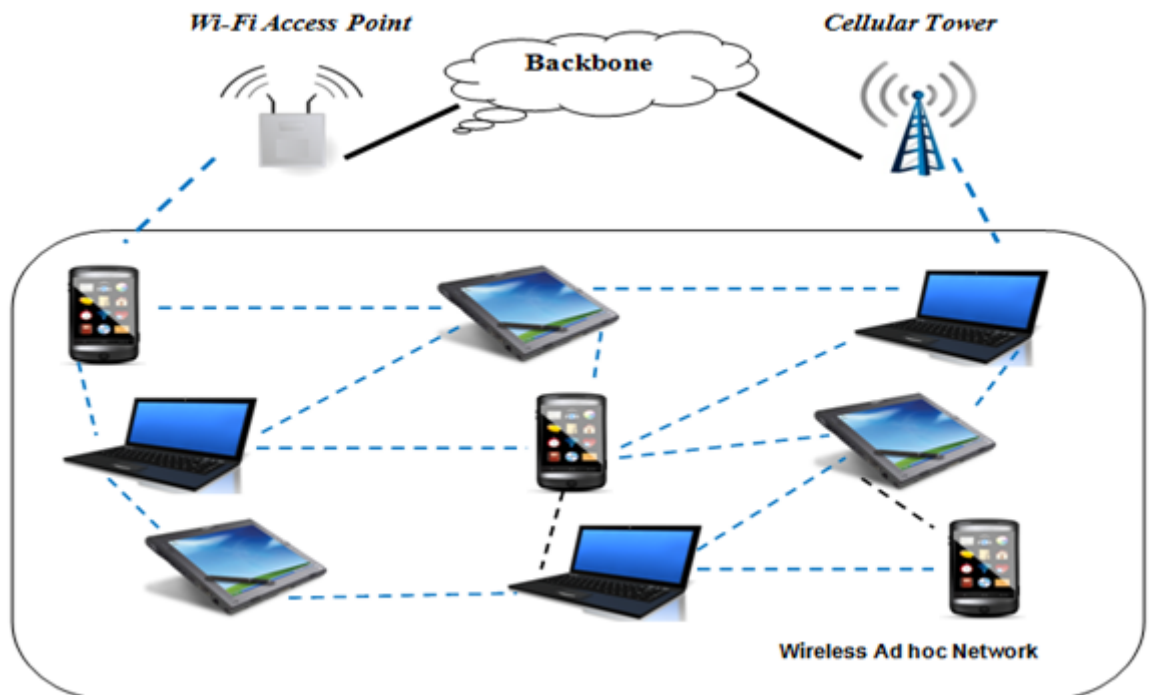


FIGURE 1.4 – Les réseaux sans fil sans infrastructure

1.3 CONTRAINTES DE LA COMMUNICATION SANS FIL

Contrairement au réseau filaire où le câblage représente un coût supplémentaire, le coût de mise en place des réseaux sans fil est réduit. Les réseaux sans fil sont faciles à installer et à maintenir, permettant aussi le déplacement libre des utilisateurs avec leurs terminaux portables.

De l'autre côté, due à l'utilisation des communications sans fil, une dégradation de qualité de signal est produite, Cette contrainte est causée par l'affaiblissement de la puissance de signal, qui est liée avec la distance entre les nœuds et aux conditions atmosphériques. De plus, le bruit dû à d'autres signaux parasites cause une altération du signal (Benmammar & Krief 2004). Le simple fait d'avoir un support de communication sans fil partagé entre plusieurs utilisateurs, fait que, une diminution importante de débit est remarquée. Cette diminution de débit peut même conduire à une perte de connectivité, ce qui est très contraignant.

La confidentialité des données circulant sur les réseaux sans fil doit être assurée aussi, car les transmissions radioélectriques sont sensibles aux interférences et sujet à l'écoute par un utilisateur mal intentionné. Cet utilisateur peut se placer dans le périmètre des équipements du réseau afin de récupérer les informations qui lui permettront d'avoir accès au réseau(Labraoui 2012).

1.4 MODÈLE OSI ET TCP/IP

L'ensemble de machines communicantes dans le réseau sont hétérogènes par rapport aux différents systèmes d'exploitation, logiciels et application ainsi que la différence de composition matérielle. Pour permettre les communications entre les différents systèmes et logiciels, les protocoles de réseau sont standardisés. Chaque protocole gère différentes parties de communication, à partir de l'utilisation des applications et logiciels, jusqu'au routage, transmission, et adressage logique ou physique des paquets de données. Cependant, tous les protocoles ne se situent pas au même niveau d'abstraction (Shang *et al.* 2016).

Plusieurs niveaux d'abstraction sont introduits pour classifier les différents protocoles selon leurs fonctionnalités. Ces classifications sont au nombre de deux : le modèle OSI et le modèle TCP/IP. La pile de protocoles du modèle OSI (Open System Interconnexion) comprend les couches : application, présentation, session, transport, réseau, liaison de données, et physique. Le modèle TCP/IP est plus simple qu'OSI, avec seulement quatre couches : liaison, Internet, transport et application. La différence avec OSI est simplement que certaines couches ont été fusionnées (Jorgensen 2017).

La couche application fournit les services et les protocoles nécessaires aux applications, les protocoles les plus connus sont : le protocole HTTP pour naviguer sur le web , FTP pour transférer les fichiers et SMTP pour envoyer des messages électroniques (Rieck & Laskov 2006). La couche présentation sert à représenter les données de manière indépendante afin de transférer les données de la couche applications à la couche réseau. La couche session sert à ouvrir et maintenir une session de communication entre une source et une destination de données.

Le rôle de la couche transport est de transporter les messages de bout en bout et d'assurer la retransmission en cas d'erreur, essentiellement, il y a deux types protocoles de transport : TCP (Transmission Control Protocol) et UDP (User Datagram Protocol) (Hall *et al.* 2015). La couche réseau s'occupe des tâches de l'adressage et l'acheminement des données fournies par la couche transport. La fonction de la couche liaison de données est l'envoi et la réception de trames ainsi que le contrôle d'erreurs de transmission (Remaker 2015). La couche physique répond aux besoins d'une modulation des signaux de communication et des techniques de transmission et de réception binaires.

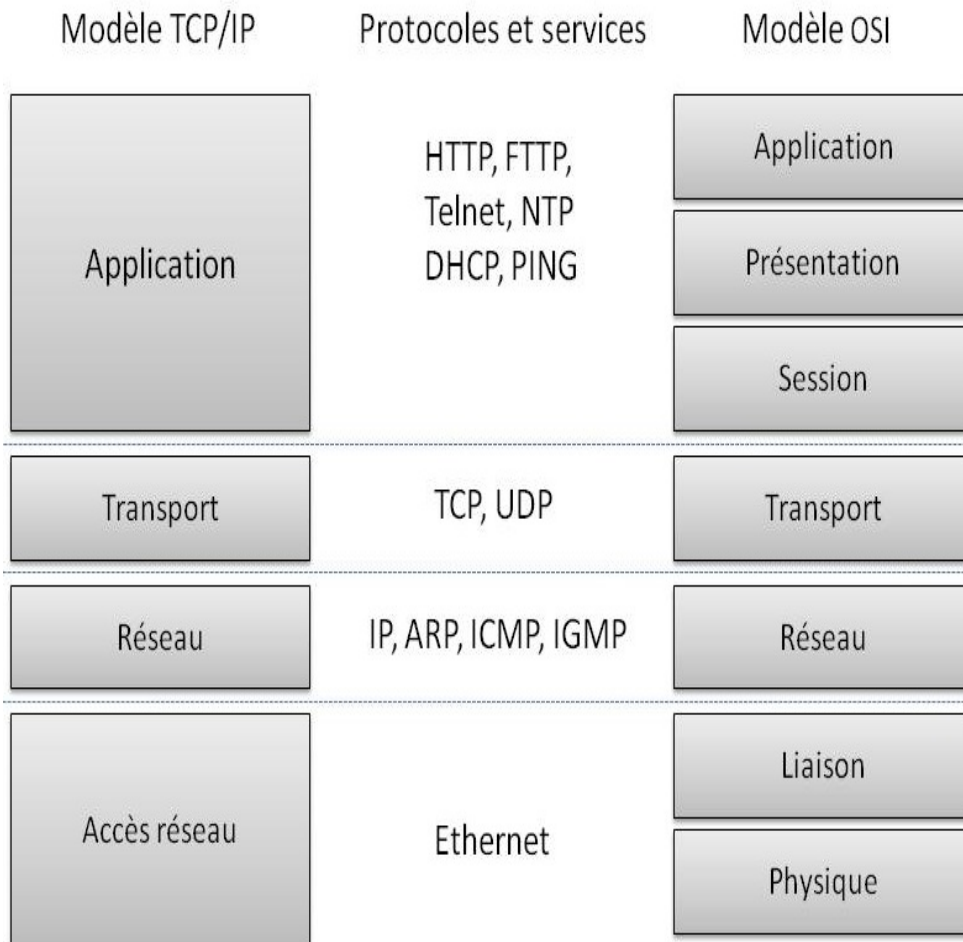


FIGURE 1.5 – TCP-IP modèle vs OSI modèle

1.5 LA NORME IEEE 802.11

Le premier standard international de réseaux locaux sans fil IEEE 802.11 a été écrit par l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) en 1997. Ce standard couvre la couche physique et la sous couche de contrôle d'accès au medium (MAC) du modèle OSI ([Atelin 2009](#)) (voir figure 1.6). La norme IEEE 802.11, encore appelée WIFI permettait dans ses premières définitions, des débits minimaux théoriques de l'ordre de 1 à 2 Mbits/s. La première appellation du standard était le 802.11b. Après ceci d'autres spécifications sont apparues telles que le 802.11a, 802.11c, 802.11d, 802.11e, 802.11f, 802.11g, 802.11h, 802.11i et 802.11j ([Maloum & Bouallouche 2013](#)).

La norme IEEE 802.11 est la base pour toutes ses dérivées. Les nouveautés introduites sur la norme ont permis dans un premier volet d'augmenter le débit des réseaux 802.11 de 2 Mbps vers 11 Mbps jusqu'à 54 Mbps et donc d'introduire le 802.11a, 802.11b et le 802.11g. Actuellement la norme 802.11ac peut aller jusqu'à 1 Gb ([Ravindranath et al. 2016](#)).

L'introduction des mécanismes de sécurité a été initiée par la 802.11i en 2004. Cette norme permet d'améliorer la sécurité des transactions sur les réseaux déployant le 802.11. Elle assure à ce terme la gestion et la distribution des clés, le chiffrement et l'authentification. La 802.11e assure la QoS et propose une définition des besoins en bande passante et de délai de transmission afin de permettre une meilleure transmission de la voix et de la vidéo ([Edney & Arbaugh 2004](#)).

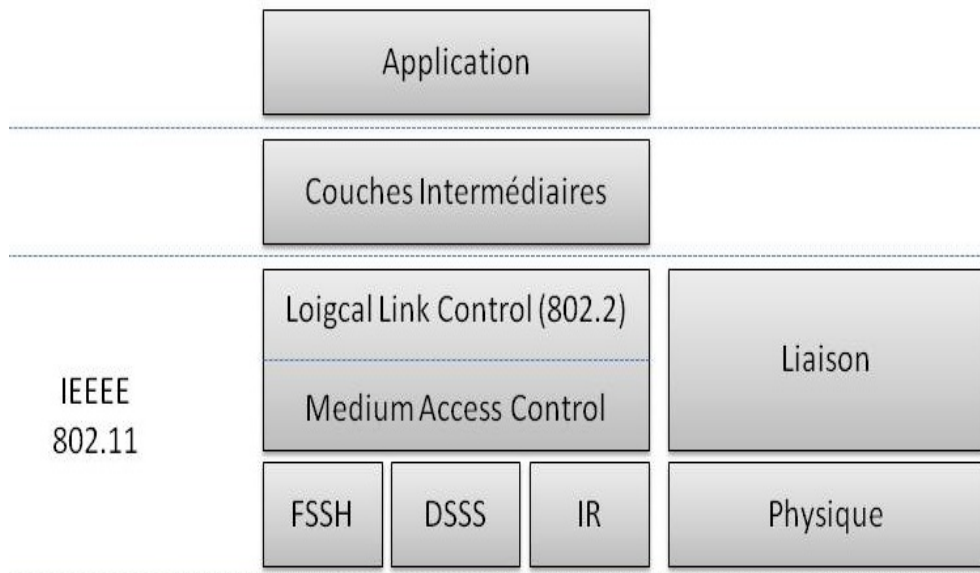


FIGURE 1.6 – L'architecture 802.11

1.6 LES RÉSEAUX MOBILES AD HOC

1.6.1 Définition

Un réseau Ad hoc est une collection d'hôtes équipés avec des antennes, reliés les uns aux autres par des liaisons de communication sans fil, et qui peuvent communiquer entre eux sans aucune administration centralisée. Contrairement aux réseaux filaires où uniquement certains nœuds dits "routeurs" sont responsables de l'acheminement des données; dans un réseau Ad hoc tous les nœuds sont à la fois routeurs et terminaux. Le choix des nœuds qui vont assurer une session de communication dans un réseau Ad hoc se fait dynamiquement selon la connectivité du réseau, d'où l'appellation "Ad hoc" ([Sambasivam et al. 2004](#)).

Dans un réseau Ad hoc, un nœud peut communiquer directement (mode point-à-point) avec n'importe quel nœud, s'il est situé dans sa zone de transmission, tandis que la communication avec un nœud situé en dehors de sa zone de transmission s'effectue via plusieurs nœuds intermédiaires (mode multi-sauts).

1.6.2 Domaines d'applications des réseaux Ad hoc

Les communications et les opérations dans le domaine militaire demeurent les toutes premières applications des réseaux Ad hoc. Cependant, avec l'avancement des recherches dans le domaine des réseaux et l'émergence des technologies sans fil, d'autres applications civiles sont apparues. On distingue :

- **Plans d'urgence** : les réseaux Ad hoc sont établis dans le but de faciliter la communication dans les zones touchées par les catastrophes naturelles (tremblement de terre, cyclone, séisme, ... etc.). La tolérance aux pannes des réseaux Ad hoc est un paramètre très important, grâce à la facilité de dépannage des unités mobile par rapport aux réseaux avec infrastructure.
- **Applications commerciales** : pour le paiement électronique ou pour l'accès mobile à l'internet, ou service de guide en fonction de la position de l'utilisateur.
- **Travail collaboratif** : le déploiement d'un réseau Ad hoc lors d'une réunion, conférence ou d'une séance de cours est très judicieux car cela permet aux employeurs d'entreprise, chercheurs ou les étudiants de partager les ressources (fichiers, accès à internet...etc.) et de communiquer sans avoir besoin d'une quelconque infrastructure.
- **La surveillance des patients dans les hôpitaux** : Les réseaux ad hoc permettent aux différents équipements de l'hôpital (capteurs, caméras, PC) d'être déployés et interconnectés sans fil pour le suivi d'états physiologiques des patients, l'administration des médicaments et la gestion éventuellement des alertes en cas d'urgence ([Naimi 2015](#)).

- **Réseaux domestiques** :Les réseaux ad hoc sont utilisés pour interconnecter et contrôler à distance les objets domestiques tels que les smartphones, capteurs, laptops, imprimantes, etc. Ils peuvent être aussi utilisé pour contribuer au confort domestique en adaptant les équipements d'une façon intelligente aux préférences des utilisateurs.
- **La surveillance des patients dans les hôpitaux** :Les réseaux ad hoc permettent aux différents équipements de l'hôpital (capteurs, caméras, PC) d'être déployés et interconnectés sans fil pour le suivi d'états physiologiques des patients, l'administration des médicaments et la gestion éventuellement des alertes en cas d'urgence.
- **Les réseaux sans fil ad hoc pour éclairages publics** :Afin d'économiser la consommation d'énergie des éclairages publics, les réseaux ad hoc sont utilisés pour contrôler les lampes. On peut donc allumer, éteindre ou tamiser les lampes individuellement, ainsi que déterminer la quelle des lampes est défectueuse et nécessite une maintenance ([Smith et al. 2016](#)).
- **Réseau Ad Hoc de véhicules(VANET)** : est une forme de réseau mobile Ad Hoc, développé pour faire établir des communications au sein d'un groupe de véhicules caractérisés par leurs forte mobilité. Les communications peuvent se faire de véhicule à véhicule (V2V) ou de véhicule à équipement(V2I). Les équipements fixes à portée, sont appelés usuellement les équipements de la route ([Hasrouny et al. 2017](#)).

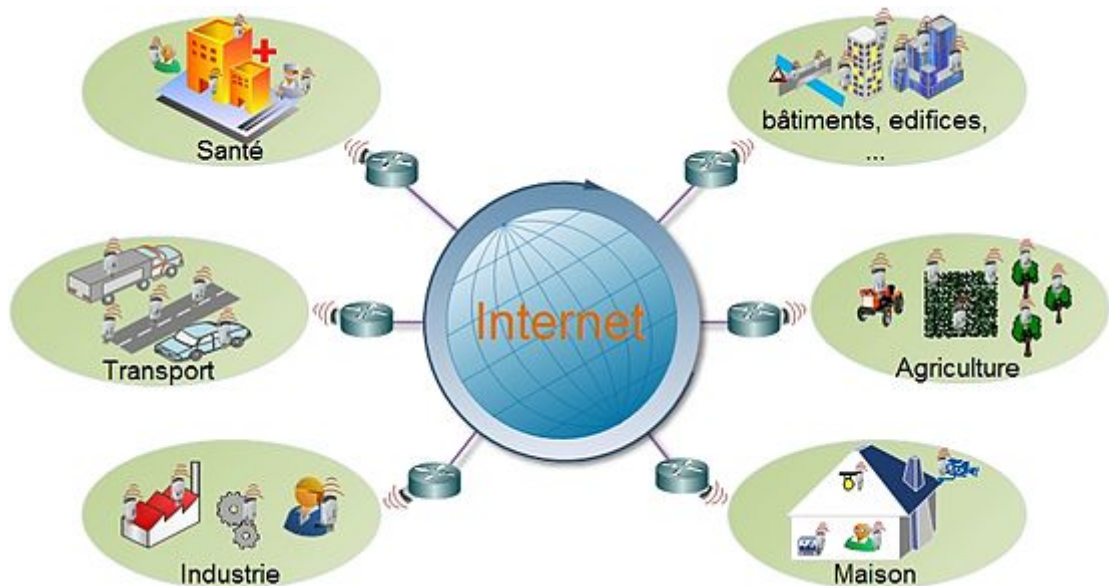


FIGURE 1.7 – Domaines d'applications des réseaux Ad hoc

1.6.3 Caractéristiques des réseaux Ad hoc

Toutes les caractéristiques d'un réseau de communication sans fil sont applicables aux réseaux Ad hoc, quoiqu'il existe certaines caractéristiques propres à ce type de réseau à savoir (Chitkara & Ahmad 2014) :

- **Hétérogénéité des nœuds** : un nœud mobile peut être équipé d'une ou plusieurs interfaces radio ayant des capacités de transmission variées et opérantes dans des plages différentes de fréquence. Cette hétérogénéité de capacité peut engendrer des liens asymétriques dans le réseau. De plus, les nœuds peuvent avoir des différences en terme de capacité de traitement (CPU, mémoire), de logiciel et de mobilité (lent, rapide), durée de vie de batterie...etc. (Ranjan & Ahirwar 2011)
- **Topologie dynamique** : la topologie des réseaux Ad hoc change d'une façon rapide et fréquente. Par conséquent, les liens transmission doivent être maintenus tout au cours de la communication (Watteyne *et al.* 2007).
- **Absence d'infrastructure** : les nœuds mobiles partagent leurs ressources et se coopèrent les uns les autres pour faire établir et maintenir la connectivité du réseau d'une manière continue (Jamalipour 2003). Cela fait qu'une aucune infrastructure préexistante ou administration centralisé est requise avant l'établissement des liens de communication.
- **Bande passante limitée** : le partage de médium de communication radio fait que la bande passante réservée à un hôte soit modeste (Ranjan & Ahirwar 2011).
- **Contraintes d'énergie** : les nœuds communiquant sont mobiles et possèdent des sources d'énergie limitées. L'optimisation de consommation d'énergie durant les communications sans fil est parmi les problématiques au cœur des travaux de recherches dans les réseaux Ad hoc.
- **Vulnérabilité de sécurité** : l'utilisation de médium de communication sans fil rend les transmissions de messages vulnérables aux espionnages et aux autres types d'intrusions(Chitkara & Ahmad 2014). Des mécanismes spécifiques doivent être proposés pour faire face a ces types attaques.
- **Interférences Radio** : due à l'utilisation du médium radio dans les communications sans fil, les interférences et le taux de collision de paquets sont élevés. Le phénomène des nœuds caché est parmi les phénomènes très particuliers à l'environnement sans fil, où les nœuds voisins utilisent le support de communication simultanément (Watteyne *et al.* 2007).
- **Multi saut** : les paquets sont acheminés par les nœuds intermédiaires jusqu'à l'arrivé à la destination d'où vient l'appellation "multi-saut" (Perkins *et al.* 2001).

1.6.4 Modes de communication dans les réseaux Ad hoc

Les échanges de données dans les réseaux mobiles se font avec différents modes de communication :

- **Le mode unicast** : c'est un mode de communication point à point entre deux entités dans le réseau. Dans ce mode de communication, les paquets de données sont acheminés à travers les nœuds intermédiaires de la source jusqu'à l'arrivée à la destination. Seul le nœud destinataire intercepte et décode le paquet qui lui est adressé.

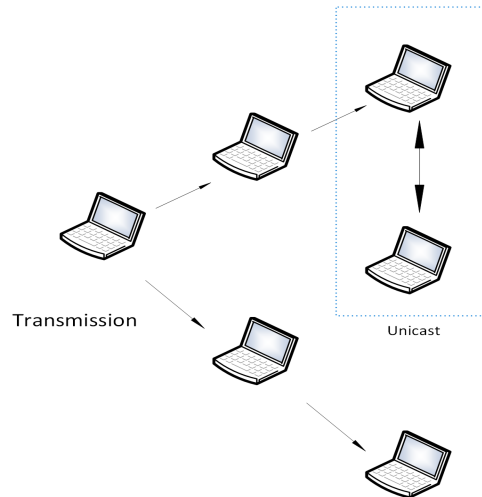


FIGURE 1.8 – *Communication unicast*

- **Le mode multicast (multipoint)** : on entend par multicast, le fait de communiquer simultanément avec un groupe d'hôtes identifiés par une adresse spécifique (adresse du groupe). Le mode multicast est utilisé lors du partage de données avec un groupe d'utilisateurs. Les paquets de données sont routés sur le réseau selon l'adresse des destinataires encapsulée dans la trame transmise. Seuls les destinataires interceptent et décodent les paquets qui leur sont adressés.

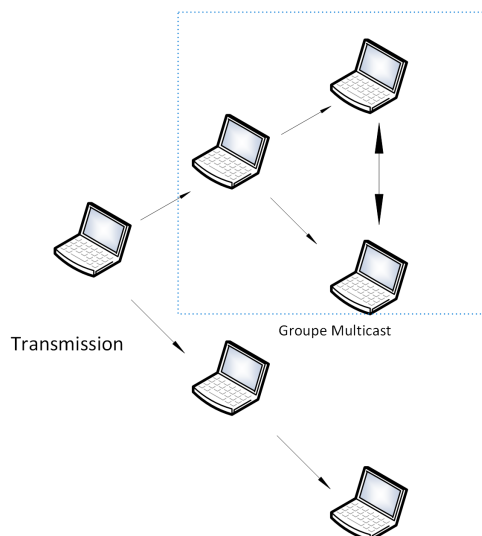


FIGURE 1.9 – *Communication multicast*

- **Le mode broadcast (la diffusion) :** le broadcast est un terme anglais définissant une diffusion de données depuis une source unique à l'ensemble de récepteurs dans le réseau. Il est donc possible d'adresser des paquets de données à tout l'ensemble de machines dans le même réseau.

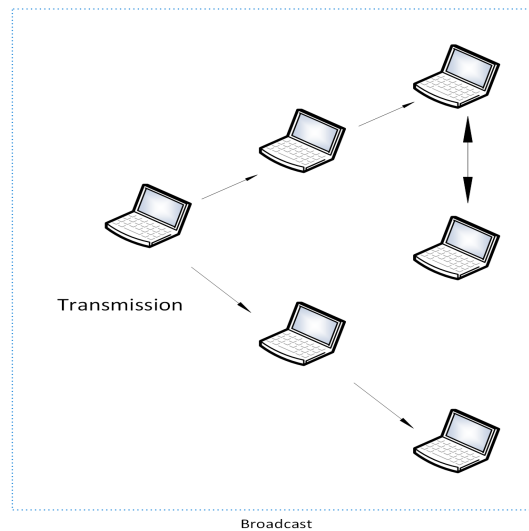


FIGURE 1.10 – Communication broadcast

1.7 ROUTAGE AD HOC

Le routage est l'ensemble des mécanismes ou protocoles permettant la découverte des éléments de topologie du réseau, l'acheminement des paquets de la source à la destination et la maintenance des liens de communication en cas de rupture (Talbi 2009). Les réseaux Ad hoc se caractérisent par l'absence d'infrastructure et de gestion centralisée. Par conséquent, les nœuds mobiles doivent posséder des capacités de routage. Vu les limitations des réseaux Ad hoc, la construction des chemins doit être faite avec un minimum de message contrôle et de consommation de bande passante. De ce fait, des nouveaux protocoles de routage sont conçus pour répondre aux caractéristiques des réseaux Ad hoc. On distingue trois types de protocoles de routage : protocoles de routage proactifs, réactifs et hybrides.

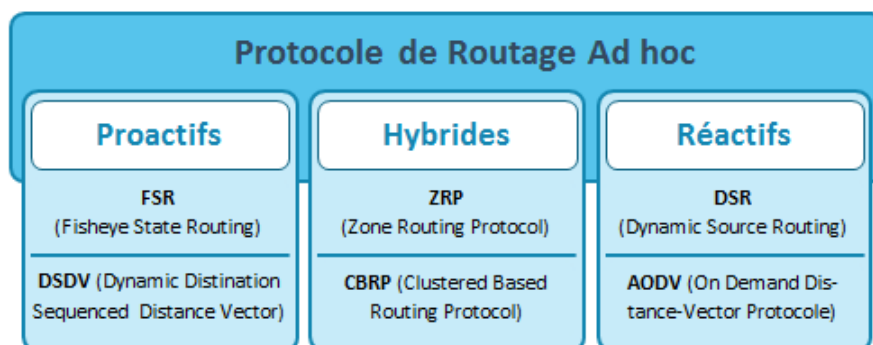


FIGURE 1.11 – Protocoles du routages

1.7.1 Protocoles de routage proactifs

Les protocoles de routage proactifs possèdent une vue globale sur la topologie de réseau avant qu'une demande d'établissement de route soit effectuée, de ce fait chaque nœud maintient une table de routage qui contient des informations concernant toutes les destinations possibles. La mise à jour des tables se fait dans un intervalle de temps régulier ou lorsqu'il y a un changement dans l'une des tables de routage (Garnepudi *et al.* 2013).

L'avantage principal des protocoles proactifs réside dans l'établissement immédiat des routes entre les sources et les destinations. Cependant, les protocoles proactifs souffrent généralement de cout élevé de messages de mis à jour et de maintenance. L'envoi périodique des messages de contrôle génère une consommation continue de la bande passante. Les protocoles les plus importants dans le routage proactif sont OLSR (Clausen *et al.* 2003) et DSDV (Rahman & Zukarnain 2009).

1.7.2 Protocoles de routage réactifs

Les protocoles de routage réactifs (ou à la demande) permettent de découvrir et de d'établir une route chaque fois que cela est nécessaire. En fait, lors de processus de découverte d'itinéraire, plusieurs chemins peuvent être découverts. Le nœud source choisit le meilleur chemin pour acheminer ses paquets. Les protocoles de routage réactifs ont été conçus pour minimiser le taux de paquets de contrôle, en maintenant dans la table de routage que les informations qui concernent les chemins actifs. Cependant les protocoles de routage réactifs possèdent un temps de réponse plus élevé que celui des protocoles de routage proactifs, due au délai de découverte et d'établissement de routes (Shivahare *et al.* 2012).

Plusieurs protocoles réactifs ont été proposés et implémentés, cela inclut " Dynamic Source Routing" (DSR)(Johnson *et al.* 2007) et " Ad hoc On-Demand Distance Vector"(AODV) (Marina & Das 2006). L'AODV est le protocole réactif le plus utilisé pour les réseaux MANET.

1.7.3 Protocoles de routage hybrides

Les Protocoles de routage hybrides combinent les deux types de routage proactif et réactif. Le réseau est décomposé en un ensemble de zones intérieures et extérieures. Les nœuds aux zones intérieures utilisent les protocoles de routage proactifs pour garder une vue partielle sur les nœuds voisins, ainsi qu'ils disposent des routes immédiates pour atteindre leurs voisinages. Au-delà de ces zones prédéfinies, le protocole hybride fait appel aux techniques des protocoles réactifs pour établir les routes. Les protocoles de routage hybrides permettent un temps de réponse plus court que les protocoles de routage purement réactifs, en outre, la taille des tables de routage est réduite à la taille des zones intérieures. Plusieurs protocoles hybrides existent comme le ZRP (Zone Routing Protocol)(Mittal & Kaur 2009) et CBRP (Cluster Based Routing Protocol) (Zarei *et al.* 2010).

1.7.4 Principaux protocoles de routage Ad hoc

Le protocole AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector)

AODV est un protocole réactif conçu pour les réseaux mobiles Ad hoc, où les liaisons de données ne sont établies que si y en a besoin de délivrer des paquets d'une source à une destination. Le protocole AODV a principalement trois procédures d'établissement des liens : la première est la diffusion de paquets de demande de route appelés RREQ, ces paquets sont propagés dans le réseau jusqu'à l'arrivée à la destination, une fois cette dernière est repérée, elle renvoie un paquet de réponse appelée RREP à la source, la route est donc établie. La procédure de maintenance est assurée via les paquets Hello périodiques, si une rupture de lien est détectée, un paquet de signalisation d'échecs de lien appelé RERR est renvoyé à la source (Marina & Das 2006).

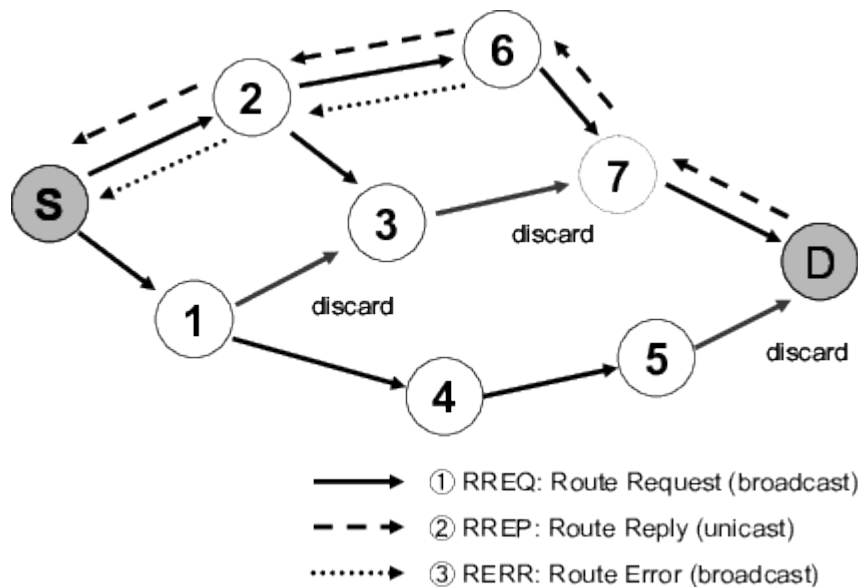


FIGURE 1.12 – Protocole de routage AODV

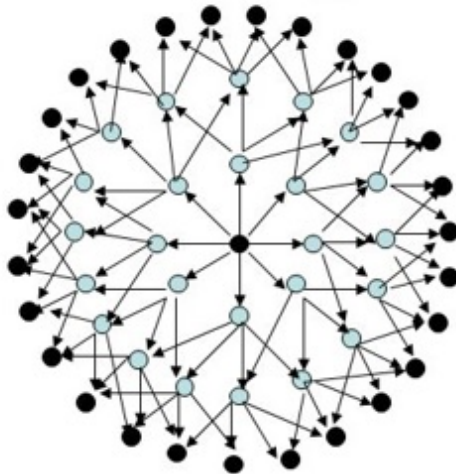
L'avantage principal du protocole réactif AODV, étant donné que les chemins sont créés à la demande, est la réduction des paquets de routage diffusés dans le réseau, cela peut réduire la taille de table de routage des nœuds ainsi que la consommation d'énergie, comme résultat; les délais d'attente ainsi que le débit de données et la durée de vie des nœuds sont remarquablement optimisés.

Cependant, dans les réseaux où le taux d'échecs des liaisons de données est accru, le protocole AODV doit réagir rapidement pour trouver une autre alternative aux chemins endommagés. Par conséquent, ces mécanismes de maintenance sont lourds à gérer et créent une surcharge supplémentaire sur le réseau à chaque tentative de découverte ou de réparation de chemin, ces mécanismes entraînent un délai d'attente et une baisse de débit remarquable (Marina & Das 2006).

Le protocole OLSR (Optimized Link State Routing Protocol)

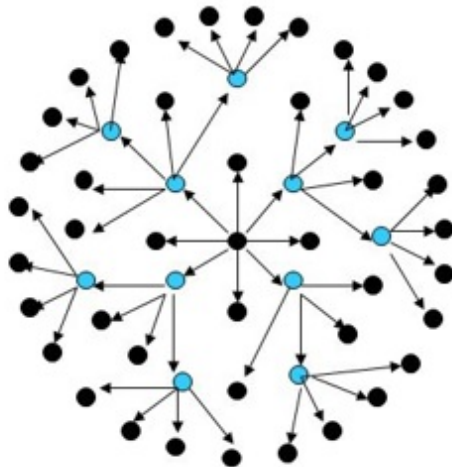
OLSR est un protocole proactif, cela signifie que le protocole a une vue globale sur le réseau. Ce protocole a été conçu pour minimiser l'inondation classique du trafic de contrôle par une inondation sélective en utilisant seulement des nœuds spécifiques appelés MPR. Les nœuds MPR sont les seuls nœuds autorisés à diffuser les messages de contrôle. Chaque nœud dans le réseau choisit son MPR parmi ses voisins symétriques pour atteindre les voisins symétriques à deux sauts, comme résultat, le nombre des paquets dupliqués diffusés sur le réseau est réduit (SADDIKI 2019).

Cependant, le protocole OLSR souffre du problème de surcharge du réseau, due au nombre important des messages de contrôles diffusés pour maintenir une vue globale sur le réseau, de plus dans les scénarios de communication à forte mobilité, le coût d'établissement et maintenance de route est très élevé en terme de bande passante et de délais (Clausen *et al.* 2003).



Inondation classique :

24 retransmissions pour diffuser un message aux nœuds à trois sauts



Inondation par MPRs :

11 retransmissions pour diffuser un message aux nœuds à trois sauts

FIGURE 1.13 – Optimisation de l'inondation en utilisant les MPRs

ZRP (Zone Routing Protocol)

ZRP est un protocole hybride, il exploite les avantages des deux types de protocoles proactifs et réactif pour optimiser les performances. ZRP définit donc deux types de protocoles, l'un fonctionne localement, l'autre fonctionne entre les zones. Le protocole ZRP limite la procédure proactive uniquement aux nœuds voisins inter zone pour que l'établissement de route soit instantané, cela peut réduire la congestion du réseau et minimiser les délais d'attente. Pour rejoindre les nœuds hors zone géographiquement, les nœuds font appel aux protocoles réactifs, une liaison de données n'est donc établie qu'à la demande, cela peut réduire les coûts d'établissement et de maintenance des liens dans un réseau avec une topologie dynamique (Mittal & Kaur 2009).

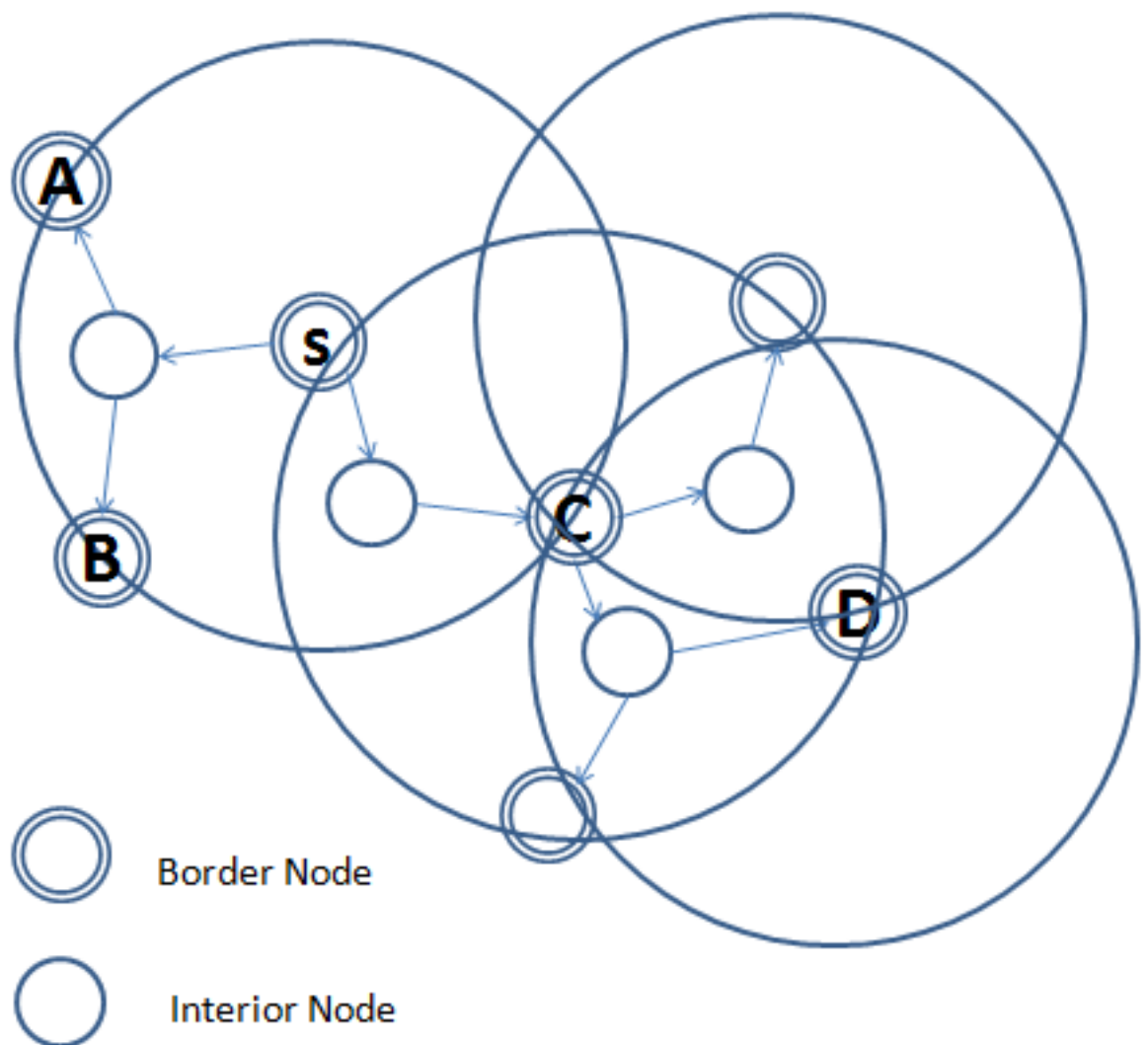


FIGURE 1.14 – Protocole de routage ZRP

CONCLUSION DU CHAPITRE

Grâce à la facilité d'implémentation, gestion et maintenance des réseaux sans fil, ces derniers sont utilisés dans plusieurs domaines comme l'industrie, éducation, santé...etc. Cependant ces réseaux sont caractérisés par leur environnement dynamique, portée réduite et leur durée de vie limitée, ce qui nécessite des mécanismes et protocoles spécifiques au fonctionnement des réseaux sans fil. Le standard IEEE a défini la standardisation 802.11 dont plusieurs mécanismes sont ajoutés à la couche liaison de données et physique.

Dans ce premier chapitre, nous avons évoqué le principe de routage dans le cadre des réseaux Ad hoc mobile, et ses trois classes : les protocoles proactifs, réactifs et hybrides. Nous présentons par la suite le principe des protocoles de routage multi chemin, ainsi que les différents paramètres liés à la qualité de service.

ROUTAGE MULTI-CHEMINS ET QUALITÉ DE SERVICE

2

SOMMAIRE

2.1	ROUTAGE MULTI-CHEMINS	23
2.2	OBJECTIF DU ROUTAGE MULTI-CHEMINS	23
2.3	TYPE DES CHEMINS	24
2.4	LE PROTOCOLE AOMDV	24
2.5	TYPES DES MESSAGES AOMDV	25
2.6	FONCTIONNEMENT DU PROTOCOLE AOMDV	27
2.6.1	Envoi de demande de découverte de chemin RREQ :	27
2.6.2	Réception et réponse à une Requête de Route :	29
2.6.3	Entretien des routes :	31
2.7	CRITÈRES DE PERFORMANCES DANS LES RÉSEAUX MANET	32
2.8	LA QUALITÉ DE SERVICE DANS LES RÉSEAUX AD HOC	33
2.8.1	Définition	33
2.8.2	Objectifs de qualité de service dans les réseaux ad hoc	33
2.8.3	Routage avec QoS : composants et mécanismes	34
2.8.4	Exemple des protocoles de routage avec qualité de service	35
2.9	MODÉLISATION ET SIMULATION DES RÉSEAUX AD HOC	36
2.9.1	Intérêt de simulation	36
2.9.2	Modèle de mobilité	36
2.9.3	Network Simulator 2 (NS2)	38
	CONCLUSION	40

DANS ce chapitre, nous allons évoquer le principe de routage multi-chemins dans le cadre des réseaux ad hoc mobiles. Nous détaillerons par la suite, le schéma de fonctionnement du célèbre protocole multi-chemins AOMDV. Enfin nous présentons les différents paramètres liés à la qualité de service dans les réseaux MANET, ainsi que les différents outils nécessaires pour l'évaluation des performances du réseau.

2.1 ROUTAGE MULTI-CHEMINS

On appelle un routage "à chemin unique" « single-path » lorsqu'un seul chemin est maintenu pour atteindre la station destinatrice. Cependant, même les plus fiables chemins peuvent tomber en panne, et comme il n'y a pas de chemin alternatif sur lequel les nœuds peuvent compter, il ne laisse d'autres choix aux nœuds intermédiaires que d'abandonner leurs paquets actuels (Santhi & Sudha Sadasivam 2014). Cette perte de paquet peut entraîner une dégradation de délais et de taux de livraison des paquets délivrés avec succès. De plus, dans les topologies fortement dynamiques, le coût d'une nouvelle découverte d'itinéraire en termes de latence et débit est trop élevé (Kaushik & Goyal 2013).

Dans le but de surpasser les limites des protocoles de routage à chemin unique, un nouveau concept a été introduit : le routage multi-chemins. Les protocoles multi-chemins ont une grande capacité à réduire la fréquence de découverte des routes comparée aux protocoles à chemin unique (Mallapur 2010). Ces protocoles maintiennent des chemins alternatifs qui ont été découverts et les utilisent pour acheminer les paquets quand le chemin principal soit en rupture. Tout d'abord, le chemin avec le nombre de sauts optimisé est utilisé comme chemin principal. Quand ce chemin tombe en panne, au lieu de lancer un autre processus de découverte de route, les autres chemins sont utilisés pour continuer la transmission des paquets. Cela peut réduire le nombre de nouveaux processus de découverte de routes et éventuellement réduire la perte de paquets résultant d'une meilleure performance du réseau.

2.2 OBJECTIF DU ROUTAGE MULTI-CHEMINS

Le routage multi-chemins consiste à donner à un nœud source le choix entre plusieurs chemins vers un nœud de destination. Une technique de routage à chemins multiples peut répondre à trois objectifs principaux :

- Tolérance aux pannes : La tolérance aux pannes désigne la capacité permettant à deux entités de données de communiquer même en cas ou de panne du lien de communication, cela peut souvent être réalisée via deux approches comme l'envoi de paquets redondants sur des chemins multiples ou bien l'établissement à l'avance d'un ou de plusieurs chemins de secours en cas de panne (Doghri 2012).
- Partage de charge : Le partage de charge comprend l'utilisation efficace des ressources disponibles dans le réseau. Cela peut être appliqué dans le contexte du routage multi-chemins, en répartissant le flux de données sur multiples chemins, au lieu d'acheminer le flux sur un seul chemin. Cela, permettra de réduire la congestion et les délais de bout en bout.
- Augmentation de la bande passante offerte à un flux : L'acheminement des paquets de donnée via des chemins multiples utilisés en parallèle, peut offrir une bande passante plus agrégée que celle des stratégies unis-chemins. Cela, permettra à satisfaire les besoins des nœuds communiquant en terme de bande passante (Doghri 2012).

2.3 TYPE DES CHEMINS

L'utilisation de chemins multiples booste la capacité de tolérance aux pannes des nœud mobiles. Ceci contribue vivement à l'amélioration des performances du réseau, néanmoins, le routage multi-chemins reste une technique plus complexe que celle du routage à chemin unique ([Aouiz et al. 2018](#)).

Du faite que l'approche multi-chemins permet d'établir des chemins de manière distribuée et indépendante dans chaque nœud, sa difficulté réside dans processus d'établissement des chemins disjoints. Le principe de disjonction des chemins est important pour éviter les boucle de communication.

Ce principe sert à assurer l'indépendance des chemins, d'où, si un lien parmi les chemins disponible dans la table de routage subi une rupture, cette dernière n'affectera pas les autres routes alternatives.

Le terme disjoint peut en fait, désigner deux situations : la disjonction par les liens et disjonction par les nœuds. Il en existe trois approches, selon l'utilisation des disjonctions soit : nœud-disjoints, liens-disjoints ou partiellement disjoints ([Omar 2015](#)) :

- Nœuds-disjoints : Les chemins n'ont aucun nœud en commun, à part les stations source et destination.
- Liens-disjoints : Les chemins, en revanche, n'ont aucun lien en commun. Il peut, cependant, y avoir un ou plusieurs nœuds communs.
- Chemins partiellement disjoints : sont des chemins qui partagent quelques nœuds et/ou liens.

Cependant, le contexte des nœuds disjoints est plus strict que celui des liens disjoints ce qui restreint le nombre de chemins disjoints ([Mansouri 2007](#)).

2.4 LE PROTOCOLE AOMDV

"Ad Hoc On-demand, multipath distance vector routing protocol" ou AOMDV, est une extension du protocole réactif à chemin unique AODV (Ad Hoc On Demand Distance Vector). AOMDV permet la découverte de plusieurs chemins sans boucle et à liens disjoints. Le concept clé du protocole AOMDV est de garder la trace de plusieurs chemins, de passer à un chemin alternatif si le chemin principal vers le nœud de destination échoue ([Aouiz et al. 2018](#)).

Pour éviter la formation des boucles, un nœud n'accepte que les chemins disjoint. AOMDV peut utiliser deux approches pour trouver des chemins disjoints : nœuds disjoints ou liens disjoints. Un nouveau processus de découverte d'itinéraire n'est lancé qu'après l'échec de tous les chemins disjoints.

2.5 TYPES DES MESSAGES AOMDV

L'établissement et le maintien des chemins sont assurés par l'échange de différents types de messages :

- RREQ : " Route Request Message ", message diffusé et destiné à tous les nœuds voisins par une nœud source désirant envoyer des paquets de données vers un nœud destinataire.

@SRC	Src_seq	@Dest
Broadcast_Id		
Dest_seq		
Adv_hop_count		
First_hop		
Time stamp		
Reserved		

FIGURE 2.1 – Format de paquet RREQ

- RREP : " Route Reply Message ", lorsque la destination reçoit le RREQ, elle répondra par un RREP comme accusé de réception. Ce paquet permet de confirmer le chemin par le quel le paquet RREQ a été reçu.

@SRC	Life Time	@Dest
RREQ Broadcast_Id		
Dest_seq		
Hop count		
First_hop		
Time stamp		
Reserved		

FIGURE 2.2 – Format de paquet RREP

- Hello message : paquet diffusé périodiquement pour maintenir les liens. Si aucun message Hello n'est reçu de la part d'un nœud voisin pendant un intervalle de temps, le lien en question est supposé être interrompu.

@SRC	@Dest
Life Time	
Dest_seq	
Hop count	
Time stamp	
Reserved	

FIGURE 2.3 – Format de paquet HELLO

- RRER : “Route Error Message”, paquet envoyé par un nœud lorsque la liaison avec son voisin est rompue (chemin invalide).

@ Dest	Dest_seq
Reserved	

FIGURE 2.4 – Format de paquet RERR

La notation utilisée pour décrire les champs de paquets est présentée dans le tableau ci-dessous :

Paramètres	Signification
@Src, @Dest	Adresse des nœuds source et destination.
Src_seq, Dest_seq	Numéro de séquence des nœuds source et destination.
Broadcast_id	Identificateur de broadcast des messages envoyés.
Adv_Hop_Cnt	Maximum nombre de sauts parmi les chemins multiples disponibles vers la destination.
Life Time	Durée de vie du message.
First_Hop	Premier nœud a traversé dans le chemin de la source vers la destination.
Hop count	Nombre de sauts séparant le nœud source du nœud destinataire.
Timestamp	Utilisé pour savoir la latence des messages.
Reserved	Champs réservé dans le paquet.

TABLE 2.1 – Notation des champs des paquets

2.6 FONCTIONNEMENT DU PROTOCOLE AOMDV

Le protocole de routage AOMDV comporte principalement trois procédures. Premièrement, les paquets de découverte de route sont diffusés dans le réseau pour établir des liens de communication entre une source et une destination spécifique. Deuxièmement, dès que la destination reçoit la demande d'établissement de route, elle répond à la demande de la source en créant une nouvelle entrée d'itinéraire dans sa table de routage. Ces deux procédures forment le processus de "découverte du chemin". Troisièmement, les liens de communication entre la station source et la destination sont maintenus par des messages de mise à jour diffusés dans le réseau chaque intervalle de temps ce qui est appelé dans la littérature "processus de maintenance des chemins" (Aouiz *et al.* 2018).

2.6.1 Envoi de demande de découverte de chemin RREQ :

Lorsqu'une machine source de données a besoin de communiquer avec un nœud destinataire, elle vérifie d'abord si elle a déjà un chemin préexistant valide dans sa table de routage vers ce dernier. Si ce n'est pas le cas, elle garde temporairement les paquets courants vers le nœud en question, dans une file d'attente, selon la règle de FIFO "premier arrivé, premier sorti" (Singla & Singh 2018). Ensuite, la source déclenchera un nouveau processus de découverte d'itinéraire afin de trouver un chemin vers la destination, en suivant ces règles clés ci-dessous :

- Après l'envoi d'une demande de découverte d'itinéraire, une minuterie (timer) est réglée. Lorsque la minuterie s'expire sans avoir une réponse de la destination, un nouveau processus de découverte d'itinéraire est ré-itéré.
- La station source est autorisée à rediffuser les paquets RREQ pour un nombre maximum de fois, après cela, elle cessera d'envoyer des demandes de routes pour empêcher l'augmentation de la surcharge du réseau avec une diffusion sans fin. La figure 2.5 montre l'inondation de paquets RREQ dans le réseau pendant la découverte d'itinéraire.

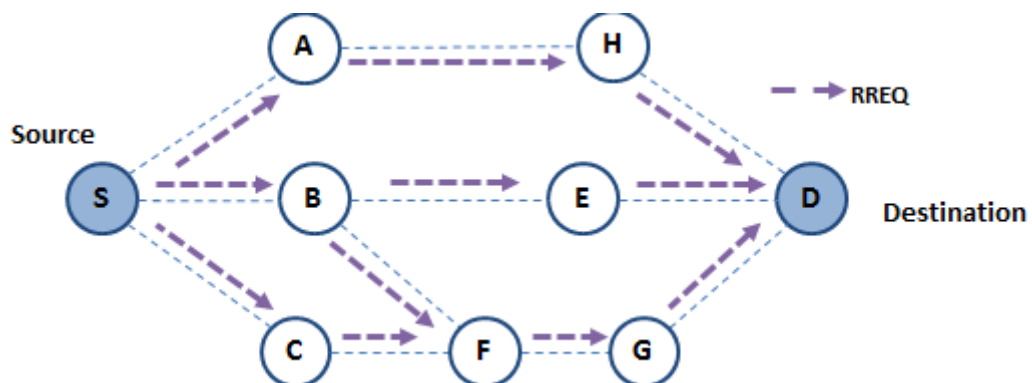


FIGURE 2.5 – Diffusion des paquets RREQ.

- La valeur du temps restant à vivre (TTL : Time to Life) est utilisée pour indiquer le nombre maximum de sauts pour les paquets à transférer. Cette valeur est fixée à une valeur prédéfinie lors de la première transmission et augmentée à une valeur supérieure lors de la deuxième retransmission (pour éviter d'augmenter la surcharge du réseau). Les retransmissions n'ont lieu que si aucune réponse n'est reçue. La figure 2.6 illustre l'algorithme de découverte des routes.

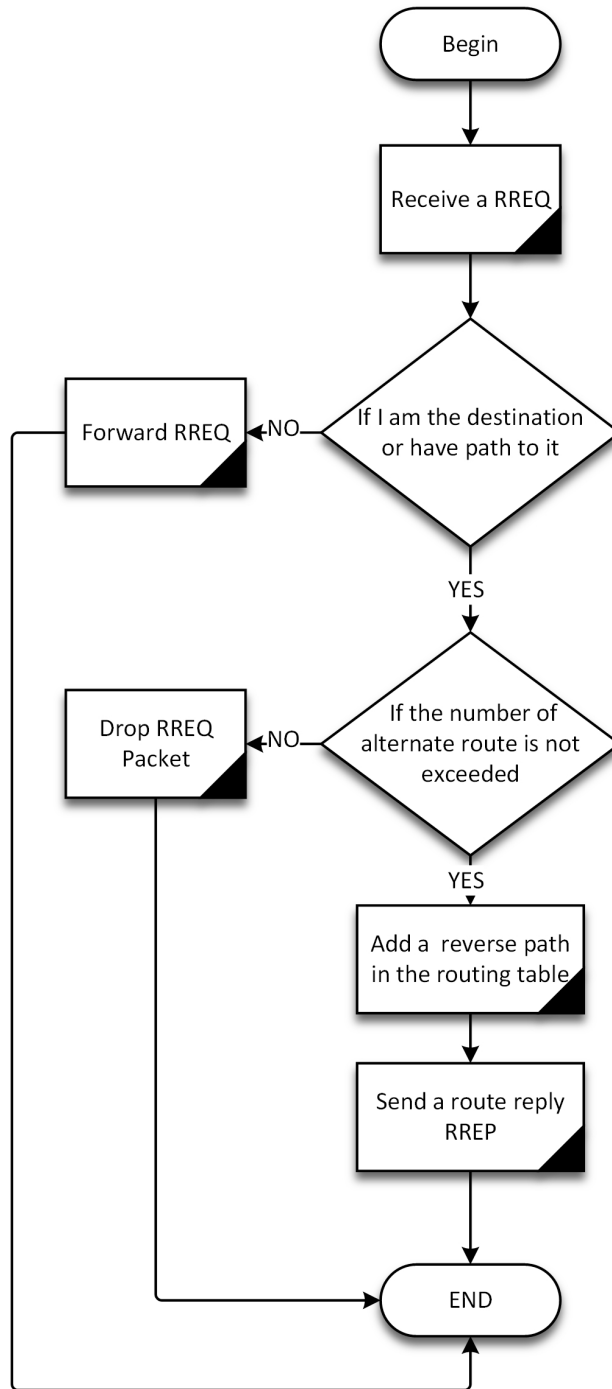


FIGURE 2.6 – Algorithme de découverte de routes.

2.6.2 Réception et réponse à une Requête de Route :

Lorsqu'un nœud reçoit un RREQ d'un nœud intermédiaire, il vérifie si c'est bien la première fois qu'il reçoit un RREQ de la source. Si c'est le cas, il continuera la diffusion de ce paquet RREQ sinon il arrêtera la propagation et laissera tomber le paquet RREQ reçu. Après ça, les nœuds courants vérifient s'ils sont les premiers nœuds à traverser dans la route vers la destination, si c'est le cas, ils définissent le champ du premier saut du RREQ en mettant leurs adresses (Periyasamy & Karthikeyan 2017).

Une nouvelle entrée d'itinéraire de la source est créée si cette dernière n'existe pas. Dans le cas où le numéro de séquence de la source du paquet reçu est supérieur au numéro de séquence de source dans la table de routage qui existe déjà, alors : le nœud mettra à jour le numéro de séquence source dans sa table de routage, supprimera tous les anciens chemins qui existent déjà, créera un chemin inverse vers le nouveau chemin et définira le nombre de sauts enregistré comme le nombre de sauts maximal. La figure 2.7 montre le flot de paquets RREP et l'établissement des chemins.

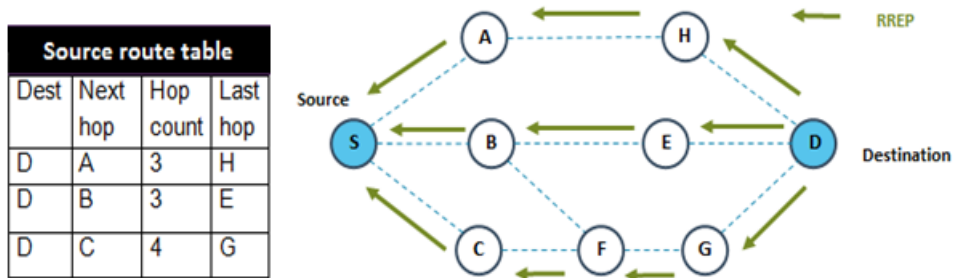


FIGURE 2.7 – Flot de paquets RREP et l'établissement des chemins

Dans le cas où le numéro de séquence de la source du paquet reçu est égal au numéro de séquence dans la table de routage qui déjà existe, alors : le nœud vérifie si ce nouveau chemin existe déjà, si c'est le cas, il met à jour le temps d'expiration. Si ce chemin n'existe pas, et qu'il s'agit d'un nouveau chemin disjoint (le premier saut et le dernier saut des chemins sont différents), le nœud ajoutera le nouveau chemin à la table de routage à condition de ne pas excéder le seuil de nombre de chemins disjoints disponibles pour cette destination, et que le nouveau chemin ne diffère pas trop en longueur par rapport aux chemins existants. Le paquet est abandonné s'il y a un chemin avec le même nœud comme premier saut mais avec moins de sauts que le paquet reçu.

Si le nœud courant est le nœud destinataire où il a un chemin valide vers ce dernier, il enverra une réponse d'itinéraire RREP sinon le nœud continuera la diffusion du paquet RREQ. Lorsque le nœud intermédiaire reçoit le RREP, il ajoute la destination à sa table de routage, crée un chemin inverse, continuera la transmission de paquet RREP jusqu'à ce qu'il atteigne la source. Plusieurs chemins sont alors formés de la source à la destination. La figure 2.8 illustre l'algorithme d'établissement des chemins.

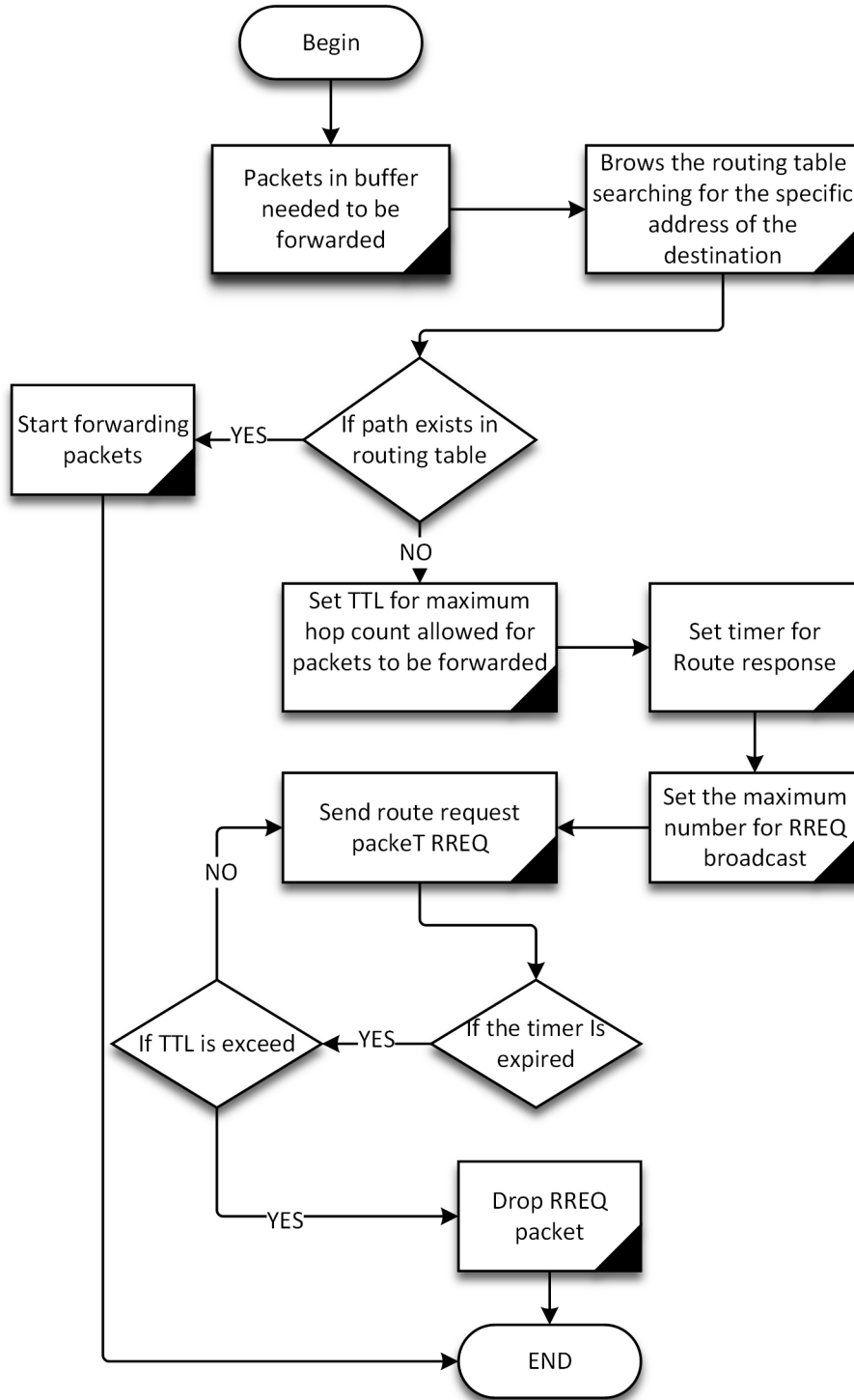


FIGURE 2.8 – *Algorithme d'établissement des chemins.*

2.6.3 Entretien des routes :

Pour maintenir un état à jour des chemins disjoints, les messages HELLO sont diffusés périodiquement entre les voisins. Lors de la réception de ces messages, le temps d'expiration de la liaison avec les voisins est prolongé. Si aucun message n'a été reçu, cela signifie que ses voisins ne sont plus joignables et qu'il y a probablement eu une panne de liaison entre la source et la destination.

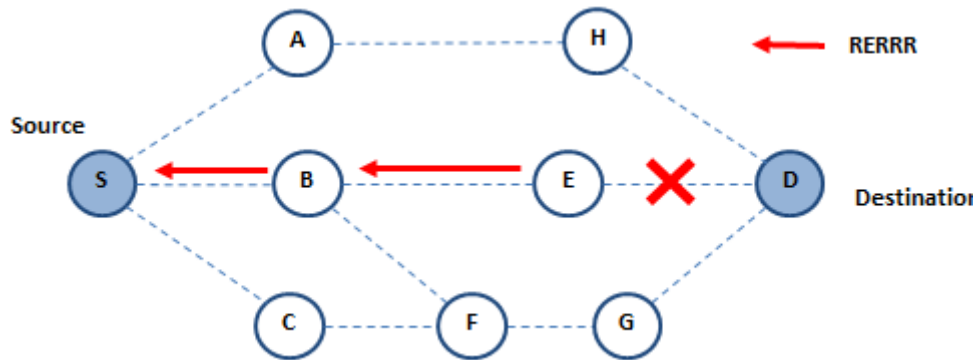


FIGURE 2.9 – Génération des paquets RERR à cause de la défaillance d'une liaison

De multiples raisons peuvent provoquer les pannes de liaisons comme la surcharge du réseau, forte dynamique de la topologie de communication, épuisement de batterie des nœuds, etc. Ces pannes, peuvent augmenter les délais de bout en bout, ainsi que réduire la bande passante de communication s'ils ne sont pas résolus dans les meilleurs délais possibles (Thangaraj & Kumari 2016).

Pour se remettre d'une panne de liaison, une procédure de maintenance d'itinéraire est initiée. La maintenance d'itinéraire consiste à envoyer un message d'erreur RERR au nœud source. Le nœud source sélectionnera un autre chemin alternatif pour la transmission des paquets. Le meilleur chemin disponible parmi les chemins alternatifs est choisi. Lorsque tous les chemins alternatifs échouent, la source relance le processus de découverte d'itinéraire.

2.7 CRITÈRES DE PERFORMANCES DANS LES RÉSEAUX MANET

L'objectif principal d'amélioration des algorithmes de routage est d'adapter le comportement d'un protocole à l'environnement dynamique du réseau mobile afin d'améliorer les performances et optimiser la consommation des ressources du réseau (Chouikhi 2016).

Dans les réseaux Ad Hoc mobiles, les caractéristiques principales d'environnement qui ont un grand impact sur la performance du réseau et qui peuvent conduire à l'amélioration des protocoles de routage sont (Naimi 2015) :

- Le délai de bout en bout d'acheminement des paquets : qui exprime le délai nécessaire pour qu'un message traverse tous les équipements réseau (contrôleur de communication, commutateur, ...) dans un chemin de communication active ou un réseau entier (temps de réponse de bout en bout). Ce paramètre intéresse surtout les utilisateurs (applications temps réel par exemple) et constitue le paramètre principal de qualité de service (QoS) d'un réseau.
- Le taux de délivrance : (throughput ou encore delivery ratio) d'un réseau qui exprime le rapport entre la quantité d'informations reçue et la quantité totale d'information (données utilisateurs + données de contrôle + données retransmises en cas d'erreurs) véhiculée par le réseau (Chouikhi 2016). Ce paramètre est généralement utilisé pour estimer l'efficacité d'un réseau. À ne pas confondre avec le débit nominal d'un réseau (e.g. 10 Mbit/s, 100 Mbit/s, ...) (Koubâa & Song 2002).
- Taux de paquets perdus : La perte d'un paquet engendre un manque d'informations. En fonction du nombre de paquets perdus, la qualité de réception des paquets peut être déduite.
- Surcharge du réseau (Overhead) : le nombre de paquets de contrôle diffusés dans le réseau divisé par le nombre total de paquets de données envoyés (Aouiz *et al.* 2018).
- Énergie : Les nœuds mobiles disposent d'une énergie limitée stockée de leur batterie qui est difficilement rechargeable, voir impossible, après déploiement. Pour prolonger la durée de vie du réseau il est alors nécessaire aux protocoles de routage de prendre en compte la conservation d'énergie lors de l'acheminements des paquets des données (Chouikhi 2016).

Donc pour assurer le bon fonctionnement d'un protocole, on doit prendre en considération l'influence de ces paramètres sur la performance du réseau. Ces paramètres sont utilisés lors de la phase d'évaluation pour quantifier les performances des protocoles.

2.8 LA QUALITÉ DE SERVICE DANS LES RÉSEAUX AD HOC

2.8.1 Définition

Le terme de qualité de service est très ambigu et comporte plusieurs définitions selon le domaine d'application, cependant deux définitions de qualité de service sont à noter dans le contexte des réseaux informatiques. En effet, le RFC 2386 de l'IETF (Internet engineering Task Force) ([Awduche et al. 2002](#)) définit la qualité de service comme « l'ensemble de besoins à assurer par le réseau pour le transport d'un trafic d'une source à une destination. Ces besoins peuvent être traduits en un ensemble d'attributs pré-spécifiés et mesurables en terme de délai de bout en bout, variance de délai (gigue), bande passante, taux de perte de paquets» ([Crawley et al. 1998](#)). Cependant la recommandation de l'ITU (International Télécommunications Union) associé la qualité de service des communications avec le degré de satisfaction des utilisateurs « effet global des performances du service qui détermine le degré de satisfaction d'un utilisateur de service». ([Meraihi 2005](#))

Cependant dans le cas des réseaux ad hoc où les nœuds constituant le réseau ad hoc doivent stocker et mettre à jour les états des liens dans un environnement mobile, le processus de qualité de service dans ce cas-là, consiste à fournir des paramètres de routage les plus adéquats afin d'optimiser la consommation des ressources, et d'adapter les applications à la "qualité" du réseau. Ce processus est donc très complexe et coûteux car des ruptures de liens peuvent intervenir à tout moment, même beaucoup plus fréquemment que dans des réseaux classiques ([Bouchama et al. 2011](#)).

2.8.2 Objectifs de qualité de service dans les réseaux ad hoc

Avec l'apparition des services multimédias conduites par la commercialisation et l'émergence des appareils de communications (telle que les téléphones cellulaires, les ordinateurs portables, les tablettes ..), et l'évolution croissante des réseaux mobiles, le besoin d'intégration de ces services dans les réseaux ad hoc suscite un réel intérêt. L'intégration de ces services doit prendre en considération différents critères pour satisfaire un niveau de qualité bien défini nécessaire pour leur bon fonctionnement. Du point de vue du réseau, ces critères se traduisent en général en terme de capacité, de disponibilité, de latence et de fiabilité. La figure 2.10 donne un aperçu des différents critères liés au bon fonctionnement des applications courantes ([Obwang 2010](#)) :

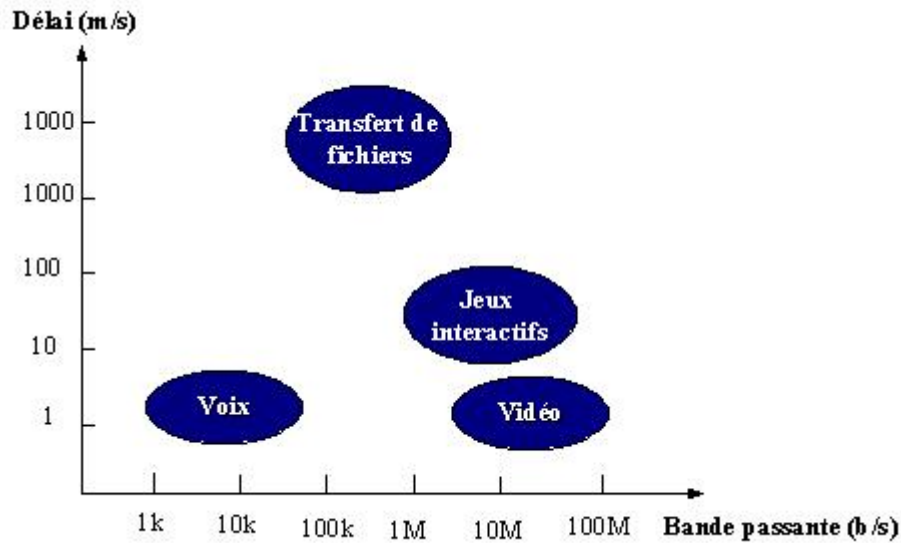


FIGURE 2.10 – Besoin des applications en terme délai et bande passante

En effet, vu la particularité différente et la complexité des réseaux ad hoc par rapport aux réseaux fixes, la qualité de service dans ce contexte sans fil a principalement trois objectifs ;

- Déterminer dynamiquement un chemin optimal qui répond aux critères de QoS entre une source et une destination de données.
- Optimiser la consommation des ressources en vue d’accomplir un équilibrage dynamique de charge.
- Préserver les ressources du réseau le plus lentement possible pour permettre une dégradation gracieuse des performances du réseau (Trivedi & Sharma 2016).

2.8.3 Routage avec QoS : composants et mécanismes

Le routage avec qualité de service comporte deux composants essentiels : un protocole de routage et un algorithme de contrôle. Le protocole de routage c’est l’ensemble de mécanismes mis en place pour établir et maintenir des liens de communication entre une source et une destination de données. L’algorithme de contrôle sert à trouver les meilleurs chemins de communication optimisés qui répond aux exigences de qualité de service (Bhatia & Verma 2015).

Principalement, Il y a deux façons pour concevoir un nouveau protocole de routage avec QoS, soit implémenter un nouveau à partir de zéro, ce qui est très difficile et très compliqué à faire, soit améliorer un protocole de routage qui existe déjà dans la littérature et essayer d’optimiser l’algorithme de routage en prenant en compte des métriques choisies pour répondre aux exigences de qualité de service spécifique (Bouchama *et al.* 2011).

2.8.4 Exemple des protocoles de routage avec qualité de service

WRE-OLSR

Le protocole proactif OLSR est l'un des protocoles mis en œuvre pour établir les liens de communication les réseaux de capteurs ad hoc sans fil. En raison de sa technique proactive, les routes entre deux nœuds sont établies de manière très rapide. Cependant beaucoup de ressources pour la sélection et le maintien des relais multipoints MPR sont dépensées, principalement en terme de bande passante et d'énergie .

WRE-OLSR est une version du protocole OLSR avec qualité de service. L'approche principale du WRE-OLSR repose sur l'analyse de préoccupation des nœuds MPR(nœuds responsables du routage de données et l'échange des informations de topologie) en introduisant un nouveau critère qui met en œuvre une combinaison entre l'énergie résiduelle du nœud et son accessibilité pour déterminer le nombre optimal de MPR et prolongé la durée de vie du réseau.

Les simulations effectuées avec l'outil de simulation NS2, illustrent que le nouveau calcul d'atteignabilité par la mise en œuvre de contraintes d'énergie des nœuds peut aider à maximiser la durée de vie du réseau ([Belkhira et al. 2019](#)).

E-RPL

RPL est un protocole très puissant pour les types des réseaux avec dispositifs de puissance, de taille et de capacités de calcul limitées. Une nouvelle approche appelée E-RPL s'est introduite pour améliorer la QoS routage de RPL en présentant de nouvelles modifications dans le cadre du mécanisme d'envoi des paquets de contrôles, ainsi que la proposition d'une nouvelle fonction objectif à plusieurs contraintes pour minimiser le coût du trajet.

E-RPL utilise plusieurs propriétés de qualité de service comme métriques pour acheminer paquets, y compris l'énergie, délai et bande passante, ce qui diminuera la consommation d'énergie, et la surcharge du réseau.

Le protocole E-RPL est implémenté avec ContikiRPL en utilisant le simulateur COOJA, et à travers différents scénarios de simulation, l'évaluation des performances montre une meilleure performance par rapport à d'autres fonctions objectives en termes consommation d'énergie et de délai de bout en bout ([Zier et al. 2018](#)).

2.9 MODÉLISATION ET SIMULATION DES RÉSEAUX AD HOC

IL est essentiel d'expérimenter les performances des protocoles de routage dans des conditions d'environnement réelles pour évaluer leur efficacité. Cependant une expérimentation directe effectuée sur le terrain peut se révéler coûteuse, irrationnelle ou même impossible vue le nombre important des nœuds communiquant ainsi la difficulté de modification des paramètres de communication (Nayak & Vathasavai 2016).

Aussi, dans le but de pouvoir examiner facilement et rapidement les performances du réseau ad hoc, nous faisons appel aux méthodes d'analyse et de simulation. Les méthodes d'analyse et de simulation sont toutes les deux, des méthodes de modélisation visant à donner une idée sur la performance du système dans différentes conditions.

2.9.1 Intérêt de simulation

Les méthodes analytiques sont les meilleurs moyens pour générer une preuve mathématique sur la performance d'un protocole. Cependant, dans certains cas, il est très complexe de développer une déduction mathématique exacte dans des conditions pratiques réelles et aléatoires. Les méthodes de simulation sont de bonnes approches dans les scénarios où les méthodes analytiques ne peuvent pas être utilisées, en raison de la complexité ou du manque de forme mathématique la plus proche pour la solution (Jubair & Muniyandi 2016).

La simulation des communications des réseaux ad hoc permet de mesurer les performances globales des communications et de déterminer les paramètres les plus influents sur les performances en utilisant un scénario communication et de mobilité préétablis. À partir de ces résultats, on peut envisager l'amélioration du système de communication, en agissant soit sur le choix de paramètres de simulation, soit sur la manière dont on les utilise.

2.9.2 Modèle de mobilité

La circulation des nœuds sur une zone de communication est décrite par des schémas de déplacement connus dans la littérature sous "modèles de mobilité". La simulation d'un réseau MANET utilise des scénarios réalistes décrivant un ensemble de règles définissant le modèle de déplacement des nœuds en tenant compte de différents paramètres tels que la vitesse, le déplacement, la densité du réseau, ...etc. Ces scénarios peuvent être modélisés à l'aide de modèles de mobilité. Les modèles de mobilité peuvent être catégorisés en fonction des mouvements générés par les nœuds (Gupta *et al.* 2013).

Modèle de Random Walk

Souvent dans la réalité, les nœuds se déplacent de manière aléatoire et imprévisible. Le modèle de Random Walk a été développé afin de simuler de telles situations (Camp *et al.* 2002). Les nœuds mobiles sont initialement répartis de manière aléatoire dans une zone de simulation. Les nœuds choisissent une direction de mouvement vers un autre point de la zone. Ils définissent ainsi la vitesse du déplacement. Une fois arrivés à la destination, les nœuds choisissent de nouveau une nouvelle destination (Bettstetter 2001). Le modèle Random Walk est sans mémoire et ne maintient aucune information antérieure sur la vitesse ou la direction. La figure 2.11 montre les déplacements d'un nœud en utilisant le modèle de Random Walk.

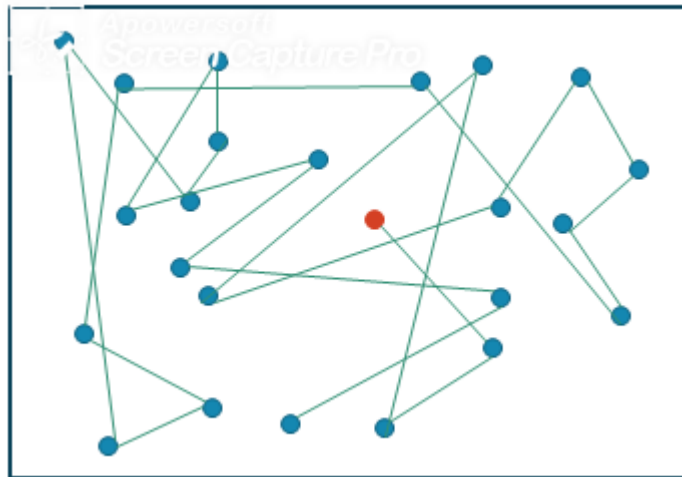


FIGURE 2.11 – Déplacement d'un nœud en utilisant le modèle de Random Walk

Modèle de Random Waypoint

Le modèle de mobilité Random Waypoint définit un temps de pause entre les changements de direction et/ou de vitesse des nœuds mobiles. Tout d'abord les nœuds fixent une destination à atteindre selon une vitesse et un angle de dépassements prédéfinis. Une fois arrivés à l'emplacement désiré, les nœuds font une pause pendant une période de temps indiquée (un temps de pause). Une fois cette période expirée, les nœuds mobiles choisissent une autre destination aléatoire dans la zone de simulation. Le modèle de mobilité Random Waypoint est semblable au modèle de mobilité de Random Walk dans le cas où le temps de pause est égal à zéro (Camp *et al.* 2002).

Modèle de Random Direction

Dans ce modèle chaque nœud est séjourné dans un emplacement bien défini dans la zone de simulation. Par la suite chaque nœud choisit son angle et vitesse de déplacement. Une fois arrivés au bord de la zone de simulation, les nœuds choisissent une nouvelle direction avec une nouvelle vitesse après avoir effectué une pause (Royer *et al.* 2001).

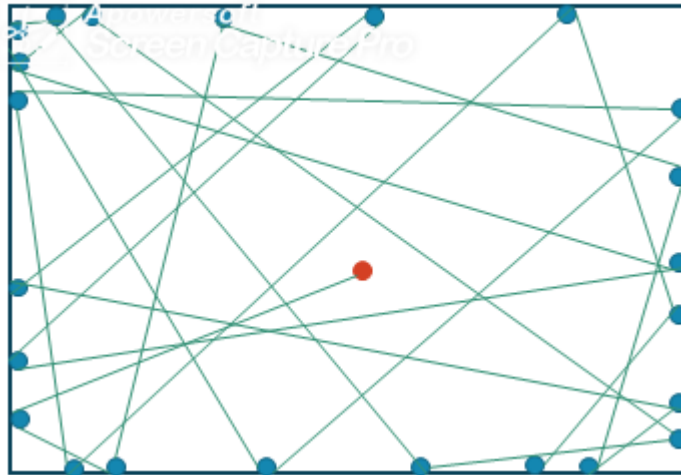


FIGURE 2.12 – Déplacement d'un nœud en utilisant le modèle de Random Direction

2.9.3 Network Simulator 2 (NS2)

NS2 est un outil conçu spécialement pour la recherche sur les réseaux de communication informatiques. Il contient des modules pour de nombreux composants réseaux tels que le routage, les protocoles de la couche MAC, transport et application. À titre d'exemple; la liste des principaux composants actuellement existant dans NS2 par catégorie est (SADDIKI 2019) :

- Application : ftp, telnet, générateur de trafic (CBR...);
- Transport : TCP, UDP, RTP, SRM;
- Routage unicast : Statique, dynamique (vecteur distance);
- Routage multicast : DVMRP, PIM;
- Gestion de file d'attente : RED, DropTail, Token bucket.

Pour étudier les performances du réseau, les chercheurs peuvent simplement utiliser un langage de script simple TCL (Tool Command Language) pour configurer un réseau et observer les résultats générés par NS2 (Issariyakul & Hossain 2009). La figure 2.13 montre l'architecture de base du simulateur NS2 .

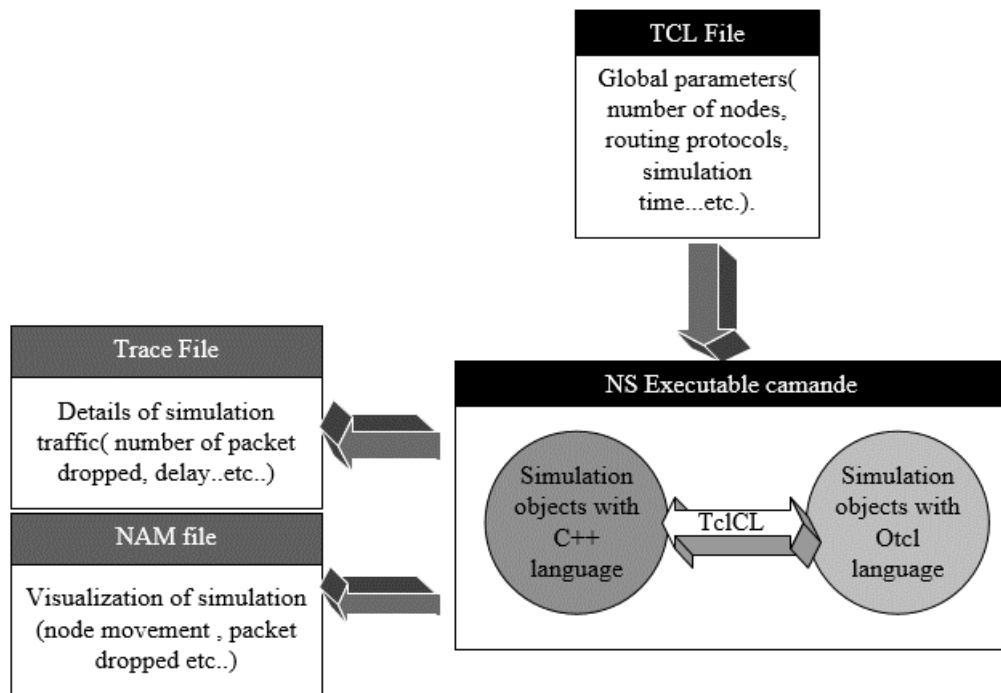


FIGURE 2.13 – Architecture du simulateur NS2

Tout d’abord, le noyau de NS2 inclut les différents composants nécessaires pour la simulation comme protocoles de routage, de transport... etc. Tous ces composants sont programmés en C++ avec une interface textuelle utilisant le langage OTcl (Objet Tool Command Language) qui est une extension objet du langage de commande TCL (Mohapatra & Kanungo 2012).

Toute modification pour améliorer les performances des composants commence par modifier le noyau de NS2. Du point de vue d’utilisateur, la modélisation d’un scénario de communication est faite avec le langage TCL qui comprend d’une part les scripts d’environnement de simulation définis par l’utilisateur et de l’autre part traduit ces scripts pour le noyau NS2 afin d’évoquer les bons composants réseaux.

Une fois la simulation de scénarios de communication est terminée, la sortie de ce scénario sera sous forme : soit un fichier qui s’appelle Trace et qui contient tous les détails de communication, soit un fichier visuel qui s’appelle NAM (Network Animator) qui sert à visualiser le scénario de communication (Gautam & Sen 2015).

Pour traiter le fichier de sortie trace et extraire les informations nécessaires pour l’évaluation de performance, on fait appel au langage java, AWk ou Perl. Le langage awk est un langage simple et optimisé développé pour le traitement des fichiers volumineux. Une fois les fichiers sont traités, on peut visualiser les résultats et tracer des graphes à l’aide des outils de visualisation comme Xgraph, Microsoft Excel ou GNUplot (un traceur de graphes).

CONCLUSION DU CHAPITRE

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier les techniques de routage multi-chemins dans un contexte sans fil multi-saut en vue d'obtenir de meilleures performances. La QoS peut être fournie aux différents niveaux, mais notre étude se concentre sur les problématiques liées aux protocoles de routage des réseaux Ad Hoc. Le choix s'est porté à l'amélioration de QoS du protocole multi-chemins AOMDV.

Les causes principales de dégradation de performances du protocole AOMDV sont la rupture fréquente des liens alternatifs ainsi que l'augmentation le taux de paquets de découverts diffusés dans les réseaux denses, ce qui va encombrer la bande passante du réseau et augmenter la consommation d'énergie des nœuds mobiles. L'étape actuelle de la recherche se consacre à minimiser la surcharge du réseau et la consommation d'énergie, comme résultat, les délais de bout en bout ainsi que l'effet de défaillance des liaisons du protocole AOMDV seront réduit.

Dans les deux chapitres suivants nous allons présenté nos contributions dans ce domaine a savoir la maximisation de la durée de vie du réseau en se basant sur le taux de variation d'énergie entre deux tranches de temps pendant une communication et l'équilibrage de charge multi-chemins sur AOMDV qui se base sur le taux d'activité du canal.

CONTRIBUTION I : MAXIMISATION DE LA DURÉE DE VIE DU RÉSEAU 3

SOMMAIRE

3.1	CONSOMMATION D'ÉNERGIE ET LA DURÉE DE VIE D'UN RÉSEAU	42
3.2	SOURCES DE PERTE D'ÉNERGIE	43
3.3	ÉTAT DE L'ART	44
3.3.1	Travaux sur la durée de vie des nœuds et la consommation d'énergie	44
3.3.2	Travaux sur la prédiction de défaillance de liens	46
3.4	APPROCHE PROPOSÉE	48
3.4.1	Définition du problème	48
3.4.2	Schéma proposé	48
3.5	SIMULATION ET RÉSULTATS	54
	CONCLUSION	59

Pour réduire le nombre de processus de découverte des chemins, les protocoles de routage multi chemins comptent sur plusieurs chemins pour la transmission des paquets. L'un des protocoles multi chemins les bien connus dans les réseaux Ad hoc est le protocole AOMDV. Bien que le protocole AOMDV présente de nombreux avantages, le maintien de plusieurs chemins alternatifs peut réduire la durée de vie des batteries des nœuds, cela peut générer plus de paquets de contrôle tels que les messages d'erreur, de maintien et de découverte des liens.

Une approche préventive basée sur la variation des valeurs historiques d'énergie des nœuds est proposée dans ce chapitre. Nous commençons par un état de l'art sur les travaux existants dans la littérature. Nous présentons par la suite notre contribution pour la maximisation de durée de vie des nœuds. Les résultats de simulation détaillés en utilisant le simulateur NS2 sont présentés à la fin de ce chapitre pour montrer l'efficacité de notre mécanisme en comparant avec le protocole AOMDV.

3.1 CONSOMMATION D'ÉNERGIE ET LA DURÉE DE VIE D'UN RÉSEAU

Un réseau ne peut accomplir son objectif que tant qu'il est en vie. La durée de vie d'un réseau MANET correspond à la période de temps pendant laquelle le réseau peut, selon le cas : maintenir de la connectivité entre les nœuds communicants, couvrir la zone de communication entière, ou garder le taux de perte de paquets de données en dessous d'un certain niveau (Kacimi 2009).

Puisque les nœuds formant les réseaux MANET jouent un rôle crucial dans le routage et l'acheminement des paquets de données, l'épuisement de l'énergie d'un nœud n'affecte pas uniquement sa capacité à recevoir ou émettre, mais également sa capacité à acheminer les données pour les autres nœuds. La durée de vie des réseaux MANET est donc liée à la durée de vie nodale (Bouarafa *et al.* 2016).

On peut donc définir la durée de vie d'un réseau par la durée dans laquelle les nœuds du réseau fournissent un taux acceptable de performance nécessaire aux besoins de l'application, jusqu'au moment où une proportion de nœuds meurt. En outre, nous constatons aussi que la durée de vie du réseau dépend de la consommation d'énergie des nœuds (Jaber 2018).

Due à la capacité limitée des batteries des nœuds mobiles et la difficulté de rechargement des batteries surtout dans des environnements critiques (par exemple : champs batailles, zones sinistrées, etc.), l'optimisation de consommation d'énergie des nœuds mobiles est crucial dans la conception des protocoles de routage pour les MANETs (Chettibi 2008).

L'emplacement des nœuds défaillants est également important. Si la proportion des nœuds épuisés est située dans une certaine partie critique du réseau, par exemple, une zone avec un nombre important de liens de communication, cela peut perturber le bon fonctionnement du réseau (Kacimi 2009).

De toute évidence, plus les durées de vie des nœuds sont longues, meilleure est le fonctionnement du réseau. De manière plus générale, La durée de vie d'un nœud correspond à la durée de temps ou le nœud est fonctionnel jusqu'à ce qu'il épuise toute son énergie (BELKHEIR 2015).

Puisque certains réseaux MANET sont hétérogènes, la consommation d'énergie des nœuds dépend essentiellement de deux facteurs : l'énergie qu'ils consomment en fonction du temps et la quantité d'énergie dont ils disposent au début (Mokrenko 2015).

3.2 SOURCES DE PERTE D'ÉNERGIE

Il existe plusieurs sources de consommation d'énergie dans une communication mobile sans fil. Quelques sources sont utiles tandis que d'autres sont considérées comme des pertes qui doivent être réduites ou éliminées (BELKHEIR 2015). On note ci-dessous quelques facteurs qui peuvent augmenter la perte d'énergie et l'épuisement de batterie des nœuds :

- Non-équilibre de charge entre les nœuds communiquant en terme de consommation d'énergie : c'est-à-dire qu'il y a des nœuds qui consomment beaucoup plus que d'autres nœuds, cela peut épuiser les batterie de ces derniers. Cela amène à la fois à l'échec des liens ou ces nœuds font partie, et à l'augmentation de taux de paquets perdus ainsi que le délai de bout en bout (Bouazzi 2018).
- Taux d'erreurs élevé : ce phénomène est dû à la qualité du médium de communication sans fil, les informations impliquées dans les transmissions erronées comme les itinéraires et les tables de routage deviennent inutiles, ce qui fait que l'énergie consommée dans leurs transmissions est perdue (Kacimi 2009).
- La maintenance des chemins endommagés : cela fait référence aux paquets de contrôle que génèrent la défaillance des lien de communication, et qui imposent un coût supplémentaire en termes de surcharge et d'énergie. Une haute fréquence de rupture de lien, va augmenter aussi le taux de collision des paquets ainsi que diminuer le taux de paquets reçus avec succès (Pati *et al.* 2011).
- L'écoute abusive (overhearing) : cette situation s'impose lorsqu'un nœud reçoit périodiquement des paquets qui ne lui sont pas destinés (voir figure 3.1). L'écoute abusive à long terme génère un coût supplémentaire de consommation d'énergie à ce qui est nécessaire pour la transmission des flux de données. Ceci est coûteux et peut être un facteur dominant d'épuisement des batteries nœuds (Chettibi 2009).

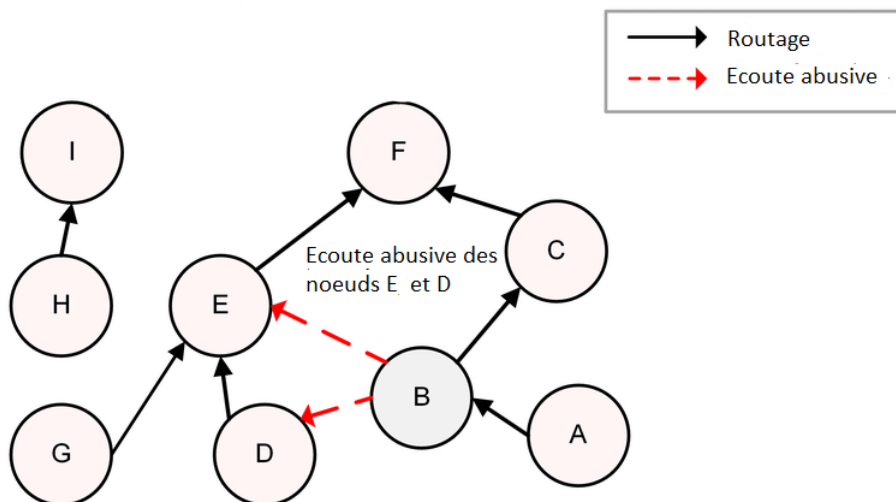


FIGURE 3.1 – L'écoute abusive

L'exploitation des ressources du réseau d'une manière optimisée et efficace, peut aider à maximiser la durée de vie des nœuds communicants. Comme résultat, la fréquence de rupture de liens et le taux de paquet perdu ainsi que la fréquence de maintenance des liens remarquablement diminuent. La consommation d'énergie perdue précédemment dans les opérations de maintenance et de redécouverte des liens rompus sera donc conservée (Bouazzi 2018).

3.3 ÉTAT DE L'ART

3.3.1 Travaux sur la durée de vie des nœuds et la consommation d'énergie

Shawara et al., (Shawara *et al.* 2017) ont cherché à améliorer la communication multi-saut et à équilibrer l'utilisation de la batterie des nœuds mobiles, ainsi que prolonger la durée de vie des réseaux MANETs. Un nouveau protocole de routage appelé EA-AOMDV est présenté. L'idée principale du protocole EA-AOMDV est d'équilibrer la consommation d'énergie nodale, afin d'empêcher un ou plusieurs nœuds critiques d'épuiser leurs réserves d'énergie et de quitter les communications actives du réseau. Le protocole recherche l'énergie nodale minimale et l'énergie résiduelle moyenne de chaque route lors du processus de sélection de chemin. La métrique utilisée pour choisir les chemins optimale en terme d'énergie est la somme de l'énergie minimale avec l'énergie moyenne. Un poids supérieur à l'énergie minimale est affecté pour éviter les chemins avec des nœuds de faible puissance. Les résultats de la simulation effectuée avec NS2, montrent une amélioration des performances en termes de durée de vie du réseau, surcharge, délais de bout en bout, et de rapport de livraison des paquets.

Un protocole de routage réactif multi chemins qui sert à économiser l'énergie et la bande passante des réseaux Ad hoc mobiles est mis en œuvre par les auteurs Sivaraman et Karthikeyan. Le protocole de routage proposé repose sur les meilleurs chemins en terme d'énergie résiduelle minimale et de la bande passante disponible. Le chemin avec la bande passante disponible et l'énergie résiduelle les plus grandes est sélectionné en tant que chemin principal pour le transfert de données. L'efficacité de ce protocole est remarquable avec moins de paquets perdus, une réduction de consommation d'énergie et de délai de bout en bout. Cependant, compter toujours sur les mêmes chemins avec une énergie minimale et une bande passante élevée, peut épuiser rapidement la batterie de nœuds de ces chemins dans le temps (Sivaraman 2016).

Taha et al., ont proposé un protocole de routage AOMDV optimisé en terme de consommation d'énergie, cela est réalisé à l'aide d'un algorithme d'optimisation qui s'appelle PSO (Particule swarm optimization). L'algorithme est utilisé pour trouver le chemin, avec la distance la plus optimale entre une source et une destination de données, afin de réduire la consommation d'énergie dans le routage avec chemins multiples. Le chemin principal sélectionné se réfère à la route qui a le niveau d'énergie le plus élevé et la distance la moins longue. Tout d'abord, lorsqu'un nœud intermédiaire reçoit un paquet de réponse de route, il calcule son énergie restante et la rajoute dans le champ d'énergie du paquet de réponse. Si l'expéditeur reçoit plusieurs réponses, il choisira le chemin avec la valeur d'énergie moyenne maximale par saut. Les résultats de simulation montrent de meilleures performances en termes de durée de vie des nœuds, de délai et de débit de communication (Taha et al. 2017).

Une nouvelle version améliorée du protocole de routage AODV en terme d'efficacité énergétique pour les MANETs est proposé par Patil et al (Patil et al. 2014). Les auteurs ont évalué la consommation d'énergie des nœuds afin de transférer les paquets avec les chemins les moins drainés, rendant ainsi le réseau de nature adaptative. Le protocole utilise le concept du nombre de drain, ces derniers sont calculés en fonction de l'énergie résiduelle dans chaque nœud. Les chemins avec les plus petits nombres de drains sont utilisés pour acheminer les paquets. Les résultats de la simulation montrent une réduction des congestions du réseau et une augmentation de la durée de vie des nœuds. cependant, dans les scénarios à forte dynamité, le protocole AODV offre de meilleures performances en terme de débit. cela est dû aux nombreux paquets de contrôle rajouté dans protocole proposé, et le coût de calcul de drain supplémentaire.

Les auteurs dans la citation (Azizi 2016) ont étudié la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil (WSN), et présenté les différents travaux visant à améliorer la durée de vie du réseau. WSN est un ensemble de très petits périphériques, utilisés pour la collection des informations. La plupart des cas, ces réseaux sont situés dans des zones difficiles à atteindre, dans lesquelles il est difficile d'alimenter et de remplacer la batterie de nœuds. Pour prolonger la vie du réseau, plusieurs approches de routage ont été proposées. Les auteurs ont démontré que le protocole ART-LEACH permettait d'améliorer la consommation d'énergie et de prolonger la durée de vie du réseau de 40 % par rapport au protocole LEACH et à IB-LEACH, aussi, une nouvelle approche pour la sélection des CH (Cluster Head) a été proposée par les auteurs. Les résultats de la simulation ont montré que l'approche proposée réduisait la consommation d'énergie et augmentait la durée de vie du réseau.

Un protocole de route routage multi-critères à trajets multiples est présentée par Monika et al. (Monika et al. 2020). Le protocole proposé appelé AOMDV-FF prend en compte l'énergie résiduelle des nœuds et la distance de la source à la destination lors de la création de plusieurs trajets disjoints. Les résultats de la simulation avec NS2 ont montré que AOMDV-FF est meilleur en termes de surcharge et de débit.

L'équipe de sendra et al. (Sendra Compte *et al.* 2011) a présenté une étude sur les techniques d'économie d'énergie et d'optimisation énergétique pour les réseaux de capteurs sans fil. Les auteurs ont examiné la structure matérielle sans fil des nœuds, les caractéristiques et les exigences des capteurs sans fil et le gaspillage d'énergie fourni par un circuit électronique. Ils ont montré que la conception électronique qui inclut le bon composant des nœuds est cruciale pour améliorer les performances du réseau. Enfin, les auteurs ont comparé plusieurs protocoles de routage conçus pour optimiser la consommation d'énergie.

3.3.2 Travaux sur la prédiction de défaillance de liens

Joshi et al. (Joshi *et al.* 2013) ont implémenté un protocole de routage prédictif préemptif pour MANET. Les auteurs ont utilisé un seuil d'énergie pour prédire les défaillances de lien dans les chemins du nœud source au nœud destinataire. Par la suite, si le chemin principal tombera probablement en panne, le nœud source pré-sélectionne un autre chemin alternatif parmi les chemins stockés dans la table de routage. Les résultats de simulation montrent un taux de perte de paquets réduit et un débit accru du réseau.

Les auteurs zhang et al (Zhang *et al.* 2020) ont mis en œuvre un protocole de routage qui s'appelle LLECP-AOMDV. Le protocole de routage proposé tente de s'appuyer sur les meilleurs chemins de la source à la destination de données, avec la prévision de la durée de vie et de la consommation d'énergie les plus optimales. L'efficacité de ce protocole est illustrée avec moins de paquets abandonnés et un nombre élevé de messages reçus avec succès.

Un mécanisme de gestion de la congestion dans le protocole AOMDV est présenté par les auteurs Gupta et Prasad (Gupta 2016). Ils ont proposé une mise en file d'attente dynamique pour réduire la congestion du réseau. Tout d'abord, l'expéditeur extraira toutes les informations des nœuds intermédiaires (taille de la file d'attente, débit de données, etc.) dans les chemins d'accès du nœud source au nœud destinataire. Un paquet d'accusé de réception est utilisé pour indiquer la capacité des nœuds intermédiaires. Si la charge n'est pas équilibrée, le nœud source modifiera le taux de chaque chemin et estimera la charge. Les résultats de la simulation montrent une réduction des délais et de surcharge du réseau.

Chintawar et al., (Chintawar *et al.* 2011) ont montré que le flux historique de paquets de contrôle tels que les messages RREQ, RREP et REER dans le réseau, peut être utilisé pour révéler l'accessibilité des nœuds. Une fois l'accessibilité de chaque nœud est définie, seuls les nœuds "accessible" et "start" sont autorisés à lancer un processus de découverte de route. Les résultats de performance montrent que cette approche peut réduire la surcharge de routage et améliorer le rapport de livraison des paquets. Toutefois, pour calculer les informations d'accessibilité, les entrées de la table de routage ne sont jamais supprimées. Cela peut poser un problème si la taille du réseau augmente. Le tableau 3.1 résume les travaux connexes déjà mentionnés.

TABLE 3.1 – Tableau de synthèse des travaux connexes

Auteurs	Approche	Protocole Appellation	Métriques	Outils de simulation
Zhang et al., (Zhang et al. 2020)	S'appuyer sur les meilleurs nœuds candidats pour acheminer les paquets d'une source à une destination de données.	LLECP-AOMDV	La prévision de la durée de vie et de la consommation d'énergie les plus optimales.	NS2
Monika et al. (Monika et al. 2020)	Un routage multi-critères est présentée afin d'optimiser la consommation énergétique.	AOMDV-FF	L'énergie résiduelle des nœuds et la distance de la source à la destination.	NS2
Taha et al., (Taha et al. 2017)	Réduire la consommation d'énergie dans le routage avec chemins multiples.	FF AOMDV	Le niveau d'énergie le plus élevé et la distance la moins longue.	NS2
Shawara et al., (Shawara et al. 2017)	Équilibrer l'utilisation de la batterie des nœuds mobiles et prolonger la durée de vie des réseaux MANETs.	EA-AOMDV	La somme de l'énergie minimale avec l'énergie moyenne.	NS2
Sivaraman et al., (Sivaraman 2016)	Économiser l'énergie et la bande passante des réseaux Ad hoc.	EE-BWA-AOMDV	La bande passante disponible et l'énergie résiduelle.	NS2
Azzizi et al., (Azzizi 2016)	Améliorer la consommation d'énergie et prolonger la durée de vie du réseau.	ART-LEACH	Sélection des CH (Cluster Head) les plus optimisées en terme d'énergie.	MATLAB
Gupta et al., (Gupta 2016).	Proposer une mise en file d'attente dynamique pour réduire la congestion du réseau.	AOMDV-Proposed.	Les informations des nœuds intermédiaires (taille de la file d'attente, débit de données, etc.).	NS2
Patil et al., (Patil et al. 2014)	Améliorer Le protocole de routage AODV en terme d'efficacité énergétique.	IEE_AODV	Le nombre de drain calculé en fonction de l'énergie résiduelle de chaque nœud.	NS2,QualNet
Joshi et al. (Joshi et al. 2013)	Proposer un protocole de routage prédictif préemptif pour MANET.	PPAOMDV	Les auteurs ont utilisé un seuil d'énergie pour prédire les défaillances de lien.	NS2
Chintawar et al., (Chintawar et al. 2011)	Utiliser le flux historique pour révéler l'accessibilité des nœuds.	AOMDV-APLP	Les informations d'accessibilité, les entrées de la table de routage.	NS2

3.4 APPROCHE PROPOSÉE

3.4.1 Définition du problème

La modélisation mathématique du problème d'énergie traitée avec la formulation du solution proposée sont décrites ci-dessous :

Soit $Eg(n, t)$ l'énergie d'un nœud n au temps t ou n appartient à N

Soit I un intervalle de temps ;

Soit Tp la puissance de transmission de paquet ;

Soit $Sz(pckt)$ la taille des paquets ou chaque type a une taille unique ;

Soit Bw la bande passante ;

Soit $Eg(pckt)$ l'énergie requise pour transmettre un paquet, elle est calculée comme suit :

$$E(pckt) = \frac{Tp * Sz(pckt)}{Bw} \quad (3.1)$$

Soit F une fonction de la consommation d'énergie dans I ;

Soit Dp le nombre de paquets de données ;

Soit Ng le nombre de voisins dans lesquels un bonjour est reçu chaque I ;

Soit Ep le nombre de messages d'erreur ;

Soit Cp le nombre de paquets de contrôle tels que les RREQ.

La fonction d'énergie F est donnée par :

$$F(Dp, Ng, Ep, Cp) = (Dp + Ng + Cp + Ep) * Eg(pckt) \quad (3.2)$$

L'énergie résiduelle après un intervalle de temps I est donnée par :

$$Eg(n, t + I) = Eg(n, t) - F(Dp, Ng, Ep, Cp) \quad (3.3)$$

La consommation d'énergie entre deux tranches de temps est donnée ci-dessous :

$$C = Eg(n, t) - Eg(n, t + I) \quad (3.4)$$

La variation du taux d'énergie est donnée comme suit :

$$V = 100 * \frac{C}{Eg(n, t)} \quad (3.5)$$

En comparant la consommation d'énergie entre deux nœuds n_1 et n_2 , le nœud avec un nombre accru de voisins, de paquets d'échec de route et de transmission de données, aura une variation d'énergie excessive et consommera plus énergie au cours du temps. Une approche préventive visant à réduire la charge sur les nœuds avec une variation d'énergie excessive est discutée dans la session suivante.

3.4.2 Schéma proposé

Nous avons utilisé le taux de variation d'énergie entre deux tranches de temps pour détecter toutes les actions réduisant l'énergie, telles que l'augmentation de la transmission de paquets de routage (message HELLO, retransmission de message d'erreur et de RREQ en raison de la défaillance des liaisons). Cela peut être utile pour révéler les nœuds ayant une consommation d'énergie excessive.

Dans chaque intervalle de temps, le nœud calculera le taux de variation de son énergie. L'intervalle choisi pour calculer et diffuser cette information est similaire de celui de l'intervalle d'émission des paquets HELLO. En effet, pour maintenir à jour l'état des liens du réseau, dans chaque intervalle de temps bien défini, un message HELLO est diffusé pour détecter les liens rompus. Nous avons ajouté un nouveau champ appelé Pcktvar au paquet HELLO. Dans le tableau ci-dessous, nous présentons la notation utilisée dans nos algorithmes :

TABLE 3.2 – Description des notations des algorithmes

Notation	Description
$Htime_{intv}$	Intervalle de temps HELLO
$Eng_{(t)}$	Énergie courante du nœud au temps t
t	Temps actuel
V	Taux de variation d'énergie
Eng_{th1}	Seuil de consommation excessive
Eng_{th2}	Seuil de consommation surchargé
Pckt_var	Champ rajouté dans le paquet pour indiquer la variation
Rt_{entry}	Entrée de la route
Rt_{table}	Table de routage
Ngb_{nd}	Nœud voisin
Int_{nd}	Nœud intermédiaire
Id_{Ngb}	Voisin Id
S and D	Nœud Source et destination
Cp	Paquets de contrôle
Marked	Champ dans l'enregistrement du chemin pour indiquer la consommation surchargé d'énergie
$Buff_{pkt}$	Tampon de paquet
min_{hp}	Nombre minimum de sauts

Dans le cas où le nœud a une surcharge de consommation d'énergie; les autres nœuds seront avertis lors de la réception du message HELLO comme indiqué en (3.4) et (3.5). L'algorithme ci-dessous montre le calcul de taux de variation d'énergie et la diffusion des paquets HELLO : Le nœud conserve en cache sa variation du taux d'énergie. Deux seuils

Algorithme 1 : Algorithme de calcul de taux de variation d'énergie et la diffusion des paquets HELLO

```

BEGIN
   $Pr_{Eng} = Eng_{(0)}$ ;
  For each  $Htime_{intv}$ 
     $V = ((Eng_{(t)} - Pr_{Eng}) / Pr_{Eng}) * 100$ ;
     $Pr_{Eng} = Eng_{(t)}$ ;
    HELLO- >  $Pckt\_var = V$ ;
    IF(there is an active route) then
      Send Hello;
    End If
  End for each
END

```

Eng_th1 et Eng_th2 ont été fixés en fonction des résultats de la simulation, où Eng_th2 < Eng_th1. Ces seuils ont été définis pour détecter la consommation d'énergie surchargée ou excessive. À chaque réception des paquets de découverte RREQ ou RREP, la variation du nœud est comparée à Eng_th1. Dans le cas où le taux variation d'énergie d'un nœud spécifique dépasse Eng_th1 (consommation d'énergie excessive), le nœud ne participera plus aux futures découvertes d'itinéraires et ignorera les paquets de découverte. Cependant, si ce n'est pas le cas, le nœud ajoute son taux de variation d'énergie dans le paquet et continue la diffusion du paquet.

Le nœud notifiera régulièrement ses voisins à propos de son taux de variation énergétique. Lorsqu'un paquet de contrôle RREQ, RREP ou HELLO arrive aux voisins, ils le comparent à Eng_th2 (consommation d'énergie en surcharge), s'il dépasse Eng_th2, les voisins vont essayer de ne pas surcharger ce nœud en s'appuyant sur d'autres chemins alternatifs avec une consommation d'énergie raisonnable. Pour cela, un nouveau champ appelé Pckt_Var est ajouté aux paquets RREQ, RREP et les paquets HELLO, comme illustré à la figure 3.2.

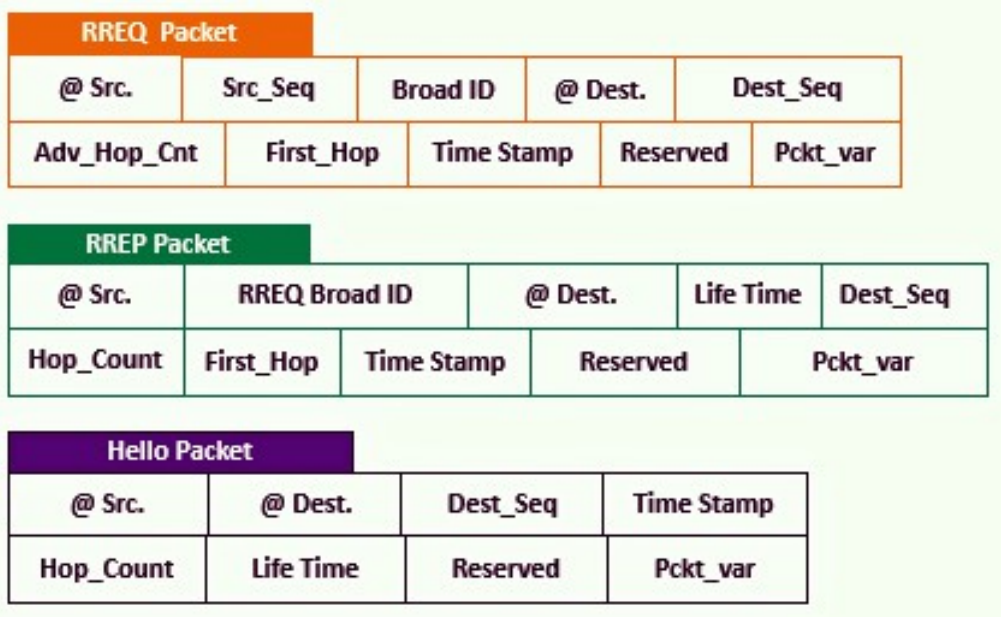


FIGURE 3.2 – Format des paquets AOMDV après l’ajout du champ Pckt_Var

L’algorithme de notre approche proposée est détaillé comme suit. Tout d’abord, l’expéditeur diffuse un RREQ pour trouver un itinéraire vers la destination. Lorsque le nœud intermédiaire Int_nd reçoit le paquet de contrôle Cp (HELLO, ou le paquet de requête de routage RREQ, ou le message de réponse de routage RREP), il vérifie s’il peut continuer le transfert du paquet. Le paquet de contrôle est transmis uniquement dans le cas où la variation d’énergie V du nœud (Int_nd) ne dépasse pas le seuil de consommation excessive Eng_th1. Dans le cas contraire, le nœud ne participera pas à l’établissement de route et abandonnera le paquet de contrôle en raison de sa consommation excessive d’énergie. Cela peut exclure les nœuds ayant une consommation d’énergie excessive d’établissement et de maintenance des routes.

Si le nœud ne consomme pas excessivement l’énergie, le nœud intermédiaire compare la variation d’énergie V du voisin (Ngb_nd) qui a envoyé le RREQ avec Eng_th2. Si $V(Ngb_nd) > Eng_th2$, cela signifie que le nœud a une surcharge de consommation d’énergie. Le chemin inverse vers le nœud source est donc ajouté à la table de routage et marqué pour indiquer cette surcharge de consommation (un champ nommé marked est ajouté au chemin, il est défini comme TRUE si une surcharge de consommation d’énergie est détectée : $New_path.marked = true$). Le seuil Eng_th2 sert à réduire la charge sur les nœuds avec une surcharge consommation d’énergie.

Enfin, le nœud intermédiaire rajoute son taux de variation d’énergie au paquet de contrôle et continue le transfert de paquet. Le paquet est transféré jusqu’à ce qu’il atteigne la destination. La destination répond avec un RREP. Lorsque les nœuds intermédiaires reçoivent le paquet de réponse d’itinéraire, il répète la même procédure de comparaison de variation d’énergie avec Eng_th2 et Eng_th1 pour exclure les nœuds à consommation excessive ou surchargée d’énergie.

Lorsqu'un nœud reçoit un paquet HELLO ($Cp == HELLO$) d'un voisin, il vérifie si le voisin a une surcharge consommation d'énergie. Si c'est le cas, tous les chemins dans la table de routage où ce voisin est le prochain nœud pour atteindre une destination spécifique sont marqués. Ces chemins sont exonérés de transmission de paquets s'il y a des chemins alternatifs avec une consommation d'énergie raisonnable. L'algorithme 2 décrit la réception et le traitement des paquets de contrôle.

Algorithme 2 : Réception et de traitement des paquets de contrôle

```

BEGIN
  S (or D) broadcasts CP
  When  $int_{nd} receive CP$ 
    IF( $CP == RREQ$  or  $CP == RREP$ ) then
      IF( $V_{int_{nd}} > Eng_{th1}$ ) then
        Drop packet; // excessive consumption
      Else
        IF( $V_{int_{nd}} > Eng_{th2}$ ) then
          New path.marked = true;
          Add New path to Rt entry of S (or D);
          Add  $Rt_{entry}$  to  $Rt_{table}$ ;
           $RREQ \rightarrow Pckt\_var = V$  OR  $RREP \rightarrow Pckt\_var = V$ ;
          Continue packet forwarding;
        End If
      End If
    Else
      IF( $CP == HELLO$ ) then
        IF( $V_{int_{nd}} > Eng_{th2}$ ) then
          For each  $Rt_{entry}$  in  $Rt_{table}$ 
            For each path in  $Rt_{entry}$ 
              IF( $path \rightarrow next\_hop == Id_{Nbg}$ ) then
                Path  $\rightarrow$  marked = true;
              End If
            End For each
          End For each
        End If
      End If
    End If
  END

```

Le nœud source vérifie d'abord si le tampon de paquets $Buff_pckt$ n'est pas vide et qu'il y a des paquets à envoyer, le nœud recherchera l'entrée de route de chaque paquet, puis le chemin optimal dont le nombre de sauts vers la destination est réduit et la consommation d'énergie est raisonnable. $Path_2$ reçoit le pointeur du chemin sélectionné. Le nœud recherchera également le chemin optimal parmi les chemins dont il y a une surcharge de consommation d'énergie ($chemin \rightarrow marqué == vrai$). $Path_1$ reçoit le pointeur du chemin sélectionné à partir de l'ensemble de chemins.

Enfin, l'algorithme choisit le chemin optimal avec le nombre de sauts réduit parmi les chemins avec consommation d'énergie raisonnable. S'il n'y a pas de chemin avec une consommation raisonnable et Path2 est nul, l'algorithme renvoie le chemin optimal à partir des chemins de consommation surchargés (Path1).

Les chemins avec le nombre de sauts optimaux et qui ne sont pas excessifs en consommation d'énergie sont choisis pour acheminer les paquets. Par conséquent, les nœuds avec une surcharge de consommation d'énergie en raison de la transmission fréquente de paquets, éviteront l'épuisement de la batterie et resteront en vie plus longtemps. Cela peut également réduire la collision et la diffusion des paquets d'erreur RRER, ce qui entraîne un meilleur rapport de de paquets délivré avec succès et une réduction du nombre d'échec de liaisons. L'algorithme 3 décrit la sélection de chemins et la transmission de données.

Algorithme 3 : Sélection de chemins et transmission de données

```

BEGIN
  IF(Buff_pckt! = null) then
    For each packet in Buff_pckt
      Find its Rt_entry in Rt_table;
      Path1,Path2=null;
      min_hp1, min_hp2 = infinite;
      For each path in Rt_entry
        IF(path->marked==true) then
          IF(path->hop_count<min_hp1) then
            path1=path;
          End IF
        Else
          IF(path->hop_count<min_hp2) then
            path2=path;
          End IF
        End IF
      End for each
      IF(path2==null)then
        Return Path1;
      Else
        Return Path2;
      End IF
    End for each
  End IF
END

```

Les étapes de notre approche proposée sont décrites comme suit :

1. Chaque nœud calcule son taux de variation d'énergie et le garde en cache. Le nœud source envoie un RREQ pour rechercher une destination.
2. Les nœuds intermédiaires reçoivent le RREQ. Si le taux de variation d'énergie du nœud actuel est inférieur au seuil de consommation excessive, le nœud continuera la diffusion du paquet en ajoutant sa variation d'énergie au paquet, sinon le paquet est supprimé.
3. La destination reçoit le RREQ et envoie une réponse RREP à la source.
4. Les nœuds intermédiaires qui reçoivent les paquets RREP, ajoutent leur variation d'énergie et poursuivent le transfert de paquet si leur consommation n'est pas excessive.
5. Quand les chemins sont établis, la source compte sur les chemins avec une énergie de consommation raisonnable pour transférer les paquets.
6. Lorsqu'un message de contrôle informe un nœud que son voisin a une surcharge de consommation, le nœud essaiera de transférer le paquet vers la destination en utilisant un autre chemin alternatif.

3.5 SIMULATION ET RÉSULTATS

Une étude comparative est effectuée avec notre algorithme basé sur la variation d'énergie appelé PCEV_AOMDV et le protocole standard AOMDV en présence de mobilité et rupture des liens. Les paramètres de simulation sont résumés dans le tableau 3.3 :

TABLE 3.3 – Paramètres de simulation

Paramètres	Valeurs
Protocole de routage	AOMDV, PCEV_AOMDV
Taille du terrain de simulation	1500x1500
Nombre de nœuds	100
Temps de pause	0,2,4,6,8,10
Modèle de communication	40
Vitesse de connexion	8 paquets/s
Temps de simulation	200 , 250 , 300 ,350 , 400 , 450 , 500 , 550 , 600
Énergie de réception	1 w
Énergie de transmission	1 w
Énergie initiale	100 j

Nous avons utilisé plusieurs mesures pour évaluer notre approche :

- Le taux de livraison des paquets : Le nombre de paquets transmis avec succès.
- la surcharge du réseau : Le nombre de paquets de contrôle diffusés sur le réseau divisé par le nombre total de paquets envoyés de la source à la destination.
- La consommation totale d'énergie par les nœuds : Cette valeur est calculée à la fin de simulation par le récapitulatif de l'énergie initiale moins l'énergie actuelle des nœuds.
- Nombre de nœuds vivants : Nombre de nœuds vivants à la fin de la simulation.

La figure 3.3 montre la visualisation du fichier de sortie NAM à la fin de simulation.

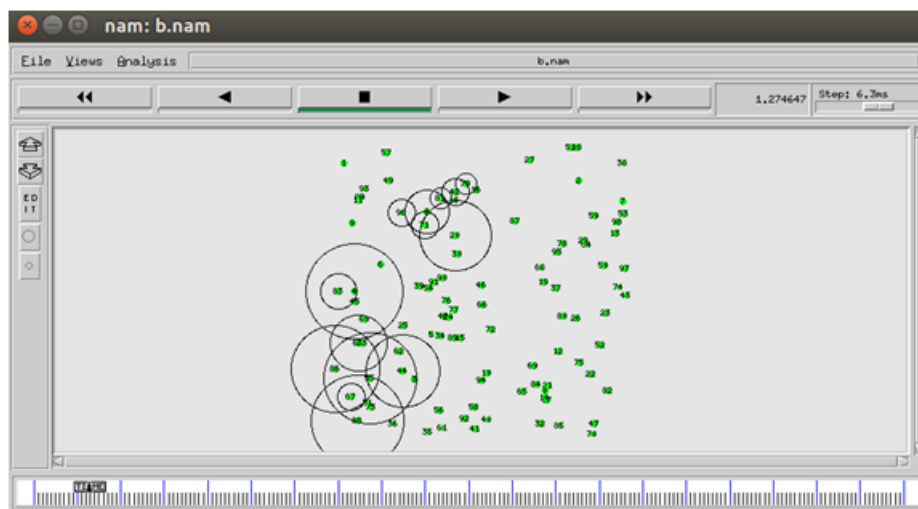


FIGURE 3.3 – Sortie de la simulation

Pour réduire le risque d'épuisement des nœuds, nous avons essayé en premier lieu d'éviter d'envoyer des paquets à travers les nœuds avec une surcharge de consommation d'énergie où le taux de variation d'énergie égale à 0.5 %. Par ailleurs nous avons exclu les nœuds dont le taux de consommation d'énergie est excessif et dépasse les 10 %, cela peut réduire le risque d'épuisement de batterie des nœuds, et par la suite éviter de provoquer les paquets d'erreurs et de redécouverte de chemins. Comme résultat, cela économisera la consommation d'énergie des nœuds et augmentera la durée de vie des nœuds.

Dans la figure 3.4 des meilleures performances sont remarquées avec la solution proposée comparée à AOMDV en termes de nœuds vivants, en faisant varier le temps de la simulation. Les meilleurs résultats sont constatés lorsque le temps de simulation est de 350 secondes où le nombre de nœuds vivants est augmenté de 30% par rapport au protocole de base AOMDV.

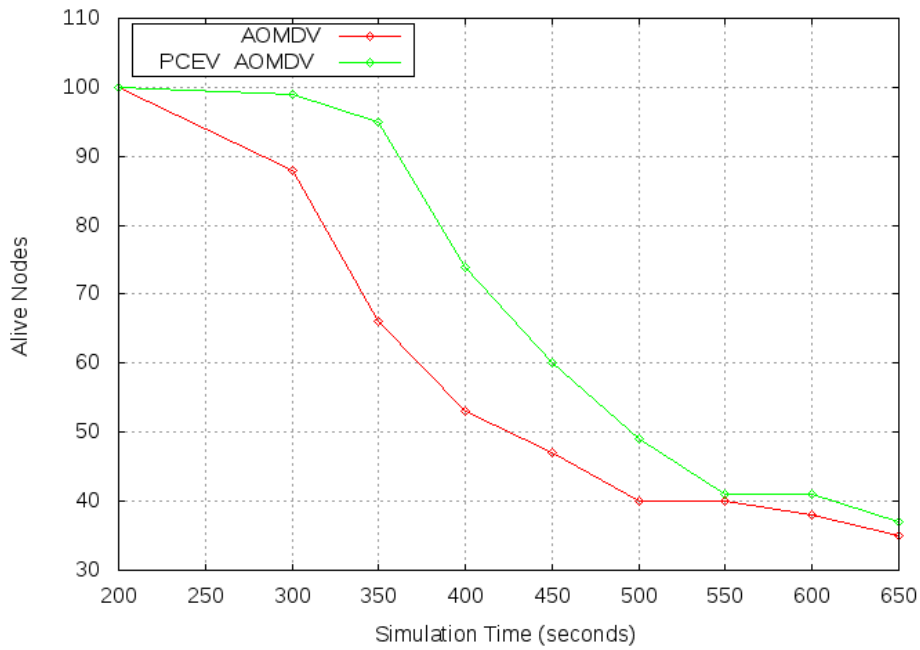


FIGURE 3.4 – Nombre de nœuds vivants

À cause des ruptures fréquentes des liaisons et la rediffusion des paquets RREQ pour trouver des itinéraires alternatifs, la congestion et la surcharge du réseau sont augmentées. L'approche proposée réduit la surcharge du réseau en réduisant le nombre de paquets RRER et RERR diffusés en raison d'épuisement des nœuds. La figure 3.5 montre une réduction de la surcharge du réseau en utilisant le protocole proposé PCEV_AOMDV en faisant varier le temps de pause. Lorsque le temps de pause est de 4 secondes, les frais généraux sont réduits de 16%.

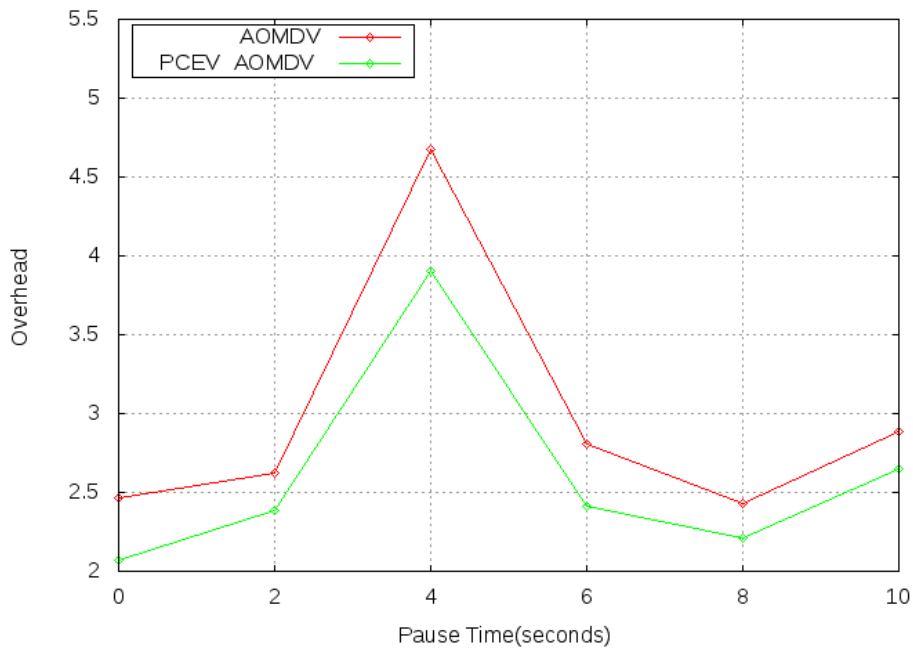


FIGURE 3.5 – Surcharge du réseau

Éviter l'épuisement des nœuds avec une surcharge de consommation d'énergie, due à la rediffusion des paquets RREQ et RRER provoqué par la maintenance des liens échoués. Cela va permettre de réduire la consommation d'énergie. La figure 3.6 montre la consommation d'énergie d'AOMDV par rapport à la solution proposée. Lorsque le temps de pause est égal à 0, la consommation d'énergie est réduite de 7049 J à 6678 J.

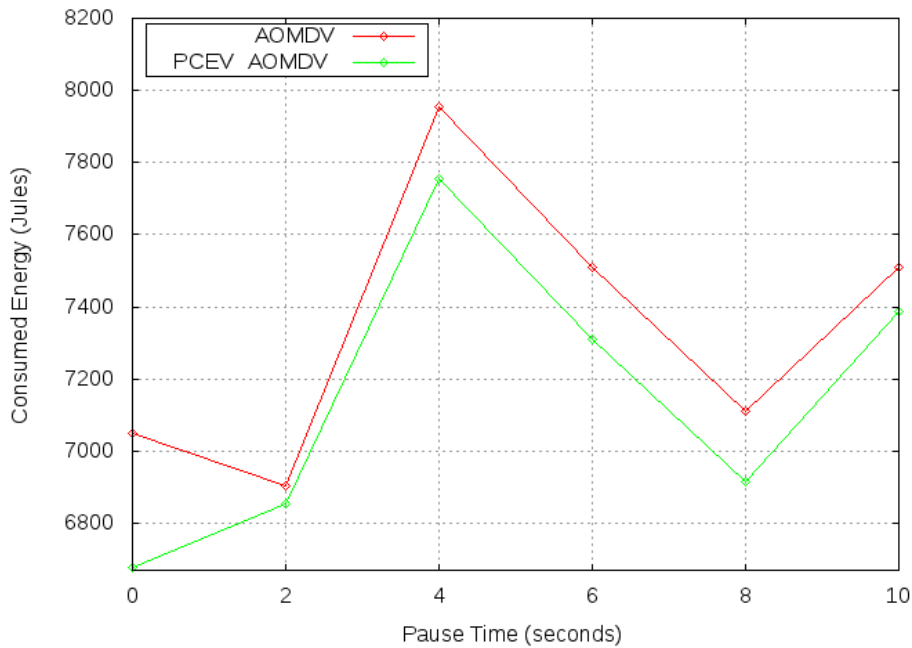


FIGURE 3.6 – Taux de consommation d'énergie

La figure 3.7 montre le taux de livraison de paquets avec succès du protocole AOMDV avec notre protocole proposé en variant le temps de pause. PCEV_AOMDV a un taux de paquets perdus réduit par rapport au protocole AOMDV, cela est dû au fait que PCEV_AOMDV évite d'acheminer les paquets en utilisant des chemins conçus avec des nœuds surchargés, ce qui aide à prolonger la durée de vie des nœuds et minimiser les pannes de liaison. Ainsi, Lorsque le temps de pause est égal à 0, le taux de livraison de paquets avec succès augmente à 4%.

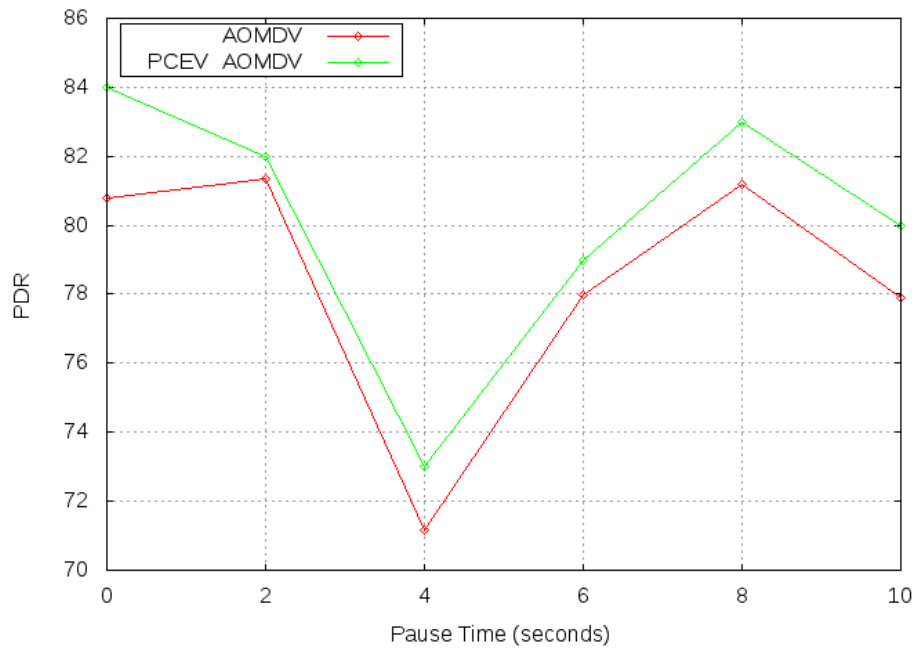


FIGURE 3.7 – taux- de livraison des paquets

CONCLUSION DU CHAPITRE

Le protocole AOMDV est efficace et peut réduire considérablement les délais de bout en bout, la perte de paquets et augmenter le taux de livraison de paquets avec succès. Cependant, il souffre toujours lorsqu'il s'agit d'une topologie hautement dynamique. Dans ce chapitre, une approche préventive basée sur la variation du taux d'énergie des nœuds est utilisée pour réduire le nombre de nœuds morts. Le protocole proposé PCEV_AOMDV détecte les nœuds surchargés en utilisant des informations historiques de consommation d'énergie et par la suite évite d'envoyer des paquets à travers ces nœuds. Notre approche a été validée par des simulations effectuées à l'aide du simulateur NS2. Plusieurs mesures de performance sont utilisées pour comparer PCEV_AOMDV avec l'AOMVD standard. Les résultats de la simulation montrent un nombre réduit de nœuds morts, une réduction de surcharge du réseau et de la consommation d'énergie, ainsi qu'un taux de livraison de paquets avec succès amélioré.

CONTRIBUTION II :PROTOCOLE D'ÉQUILIBRAGE DE CHARGE MULTI-CHEMINS BASÉ SUR LE TAUX D'ACTIVITÉ DE CANAL POUR LES RÉSEAUX AD HOC

4

SOMMAIRE

4.1	CONGESTION DANS LES RÉSEAUX MANET	61
4.2	ÉTAT DE L'ART	63
4.2.1	Détection et évitement des zones centrales encombrées . . .	63
4.2.2	Application du paramètre de taux d'activité du canal . . .	66
4.3	APPROCHE PROPOSÉE	68
4.3.1	définition de problèmes	68
4.3.2	Modèle du schéma proposé	70
4.4	RÉSULTATS DE SIMULATION	73
	CONCLUSION	79

DANS les zones de réseau dense, les principaux problèmes liés aux MANETS sont les défaillances de liaison fréquentes et les longs délais de bout en bout. Ces zones denses sont généralement situées au centre du réseau, où le nombre de nœuds comme pour le trafic réseau sont accrus. Un nouveau paramètre pour mesurer la centralité du réseau en basant sur le taux d'activité du canal est proposé. Le protocole proposé appelé CBMLB(Channel Busyness Based Multipath Load Balancing Routing Protocol) est une amélioration du protocole multi-chemins déjà existant AOMDV. CBMLB tente de réduire la charge sur les nœuds centraux congestionnés qui ont un taux d'activité élevé du canal, en répartissant la charge entre les chemins alternatifs disponibles. Le protocole proposé repose sur les chemins les moins encombrés pour acheminer les paquets. Les résultats de simulation en comparant CBMLB avec les protocoles AODV, AOMDV et QMLB montrent que CBMLB a des meilleures performances en terme de taux de livraison des paquets, délais de bout en bout et surcharge de communication.

4.1 CONGESTION DANS LES RÉSEAUX MANET

La congestion est une situation dans les communications des réseaux dans laquelle le nombre de paquets augmente au-delà de la limite et de la capacité pouvant être gérée par les ressources du réseau. Cela peut entraîner des pertes de paquets, une dégradation de la bande passante, et une surcharge supplémentaire de paquets de contrôle (Sharma *et al.* 2016).

Dans le cas des communications filaires, lorsque la congestion est produite, elle se concentre généralement sur un seul routeur, alors que, en raison de ressources limitées qui caractérisent les réseaux MANET, et le partage du médium de communication sans fil, la congestion ne concernera pas uniquement les nœuds mobiles, mais aura un effet sur la région totale de communication (Gowtham & Subramaniam 2018). Lorsque les nœuds mobiles sont dans le même espace de transmission, la contention pour cet espace augmente. Plus de nœuds pourraient vouloir transmettre, plus le médium de communication sera encombré (Sirajuddin *et al.* 2016).

La technique de contrôle de congestion est la méthode par laquelle la bande passante du réseau est répartie sur plusieurs connexions pour équilibrer le trafic et pour augmenter le débit du réseau (Rajesh & Gnanasekar 2016). En outre, il est possible de maximiser le rapport de livraison des paquets et de minimiser les encombrements du trafic et les délais de bout en bout (Bansal *et al.* 2015). Le contrôle de la congestion dans les réseaux MANET est une tâche difficile, où les principaux défis sont les suivants :

- Comment détecter la congestion du réseau.
- Comment notifier les nœuds à propos de la congestion du réseau.
- Comment contrôler la congestion pendant que les nœuds changent fréquemment leurs position.

Un meilleur contrôle de la congestion ne peut être atteint qu'en considérant simultanément le routage et le contrôle de flux. Les encombrements peuvent être détectés en évaluant ou en examinant le niveau d'activité des nœuds intermédiaires à l'aide de métriques de détection (Khurana & Kumar 2017).

Jusqu'à présent dans la littérature, de nombreuses stratégies de détection de la congestion sont utilisées et testées. Les paramètres de détection les plus utilisés sont les suivants : longueur de la file d'attente, taux d'activité du canal, perte de paquets et délai de transmission. La sélection d'un tel paramètre doit être fonction de la structure du réseau, de l'application et de la nature du trafic, du débit utilisé, etc. Dans la figure 4.1, Les principaux paramètres liés au contrôle de congestion sont présentés (Thrimoorthy & Anuradha 2016).

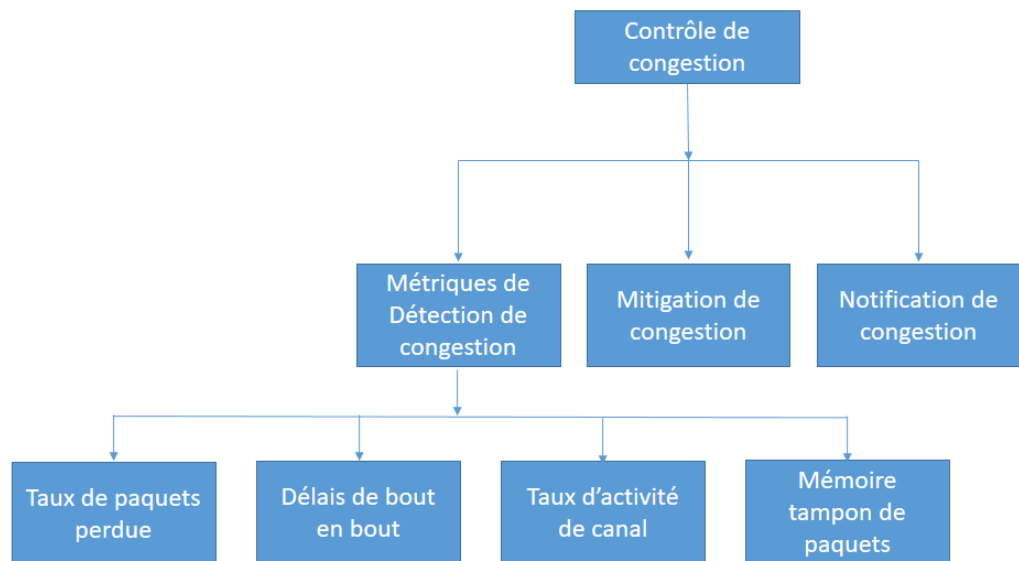


FIGURE 4.1 – Les principaux paramètres liés au contrôle de congestion

La congestion est située le plus souvent dans les zones où le support de communication est surchargé. Ces zones sont caractérisées par un nombre élevé de nœuds et de flux de données (Sowmya *et al.* 2018). Lorsque les paquets arrivent dans une zone encombrée, ils ne peuvent pas être transférés et ils sont abandonnés. Par conséquent, une quantité excessive de paquets arrivant à une zone encombrée du réseau entraîne de nombreuses pertes de paquets. Ces paquets abandonnés ont peut-être déjà parcouru un long chemin dans le réseau et ainsi consommé des ressources considérables (Vadivel & Bhaskaran 2017). De plus, les paquets perdus déclenchent souvent des retransmissions, ce qui signifie qu'un nombre encore plus important de paquets sont envoyés sur le réseau. Ainsi, la congestion du réseau peut gravement détériorer le débit du réseau. Si aucun contrôle de la congestion approprié n'est effectué, cela peut conduire à une rechute du réseau, où presque aucun donné n'est délivré (Rath *et al.* 2017).

De nombreux travaux de recherche sont présentés pour la détection des zones encombrées et le contrôle de congestion, la section suivante présente des travaux récents à propos de ce sujet.

4.2 ÉTAT DE L'ART

4.2.1 Détection et évitement des zones centrales encombrées

Les auteurs Pham et al. (Pham & Perreau 2003) ont proposé un modèle analytique pour décrire la congestion des nœuds centraux du réseau. Une comparaison analytique est effectuée entre les mécanismes de routage à chemin unique et à trajets multiples pour l'équilibrage de charge dans les réseaux MANETs. Trois paramètres ont été pris en compte : La surcharge du réseau, la distribution du trafic et le débit. Les résultats analytiques montrent qu'en prenant en compte les paramètres de réseau tels que la densité et la topologie, les protocoles multi-chemins peuvent avoir un nombre réduit de routes et de paquets. Par conséquent, les mécanismes de trajets multiples sont meilleurs en termes de réduction des encombrements. Un surdébit réseau supplémentaire est rajouté dû à la maintenance de chemins alternatifs.

Souihli et al. (Souihli *et al.* 2009), ont validé le modèle analytique déjà mentionné (Pham & Perreau 2003) par une simulation sous MATLAB. Les auteurs ont simulé une topologie de réseau de 100 nœuds communiquant sur une surface de 100 x 100 unités. Les chemins optimaux en termes de nombre de sauts en utilisant l'algorithme de Dijkstra sont choisis pour la communication. Les résultats de la simulation (figure 4.2) montrent clairement que la charge de communication est élevée au centre du réseau.

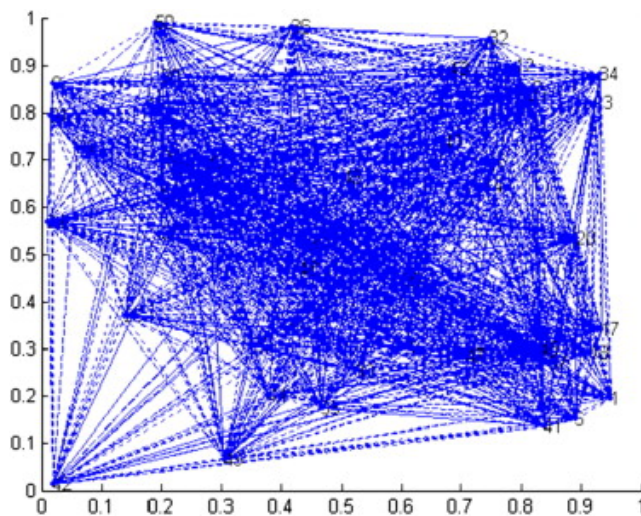


FIGURE 4.2 – densité des communications du réseau

La relation entre la distance entre les nœuds au centre du réseau et le nombre de routes a été étudié par les auteurs Souihli et al. (Souihli *et al.* 2009). Les résultats de simulation (figure 4.3) ont confirmé les résultats analytiques présentés dans (Pham & Perreau 2003). Un nouveau protocole de routage d'équilibrage de charge RTSLB, est proposé par les auteurs pour éviter les nœuds centraux encombrés en basant sur le nombre d'entrées dans la table de routage au lieu des chemins les plus courts. Une meilleure performance est remarquée en termes de rapport de livraison de paquets et de surcharge du réseau.

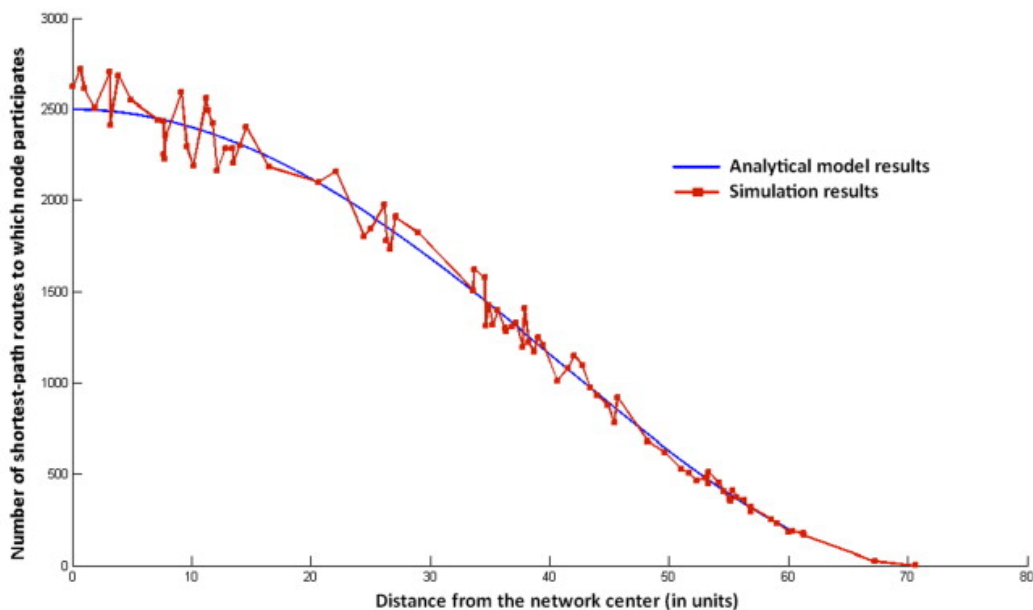


FIGURE 4.3 – distance vs nombre de routes

Dans (Naseem & Kumar 2017), les auteurs ont introduit deux inconvénients majeurs du protocole de routage RTSLB (Souihli *et al.* 2009) : premièrement, les entrées de table de routage ne signifient pas que toutes les routes de la table sont actuellement utilisées par les paires source-destination. Le deuxième inconvénient concerne le choix des chemins les plus longs entre les nœuds source et destination même si des raccourcis non utilisés sont disponibles.

Un protocole de routage uni chemin à équilibrage de charge basé sur la taille de la file d'attente ou QSLB est mis en œuvre par la suite par les auteurs Naseem *et al.* (Naseem & Kumar 2017). Dans cette approche, la charge est répartie sur les nœuds situés au centre du réseau en choisissant la métrique de taille de la file d'attente comme paramètre de centralité. Les nœuds ayant plus de paquets dans leurs files d'attente sont considérés comme des nœuds centraux surchargés. Les résultats de la simulation validés par le simulateur du réseau NS2 montrent une amélioration des performances du réseau en termes de PDR, surcharge et de délai, lorsqu'on compare QSLB avec les protocoles AODV et RTSLB.

Les auteurs (Mounagurusamy 2016) ont mis en œuvre un protocole conçu pour répartir le trafic du réseau sur différents chemins disjoints, afin de réduire l'encombrement du réseau. Le schéma proposé tente de résoudre le problème mentionné en introduisant une nouvelle valeur de seuil pour contrôler et limiter le nombre de chemins traversant des nœuds congestionnés en phase de découverte de route, cela peut réduire le trafic sur les nœuds congestionnés et répartir la charge sur le réseau. Les résultats de la simulation montrent une amélioration en termes de délai de bout en bout, de surcharge du réseau et de taux de paquets délivré avec succès (PDR).

Les auteurs ([Ramos et al. 2014](#)) se sont penchés sur la conception des WSN en tenant compte des aspects topologiques qui exploitent la centralité des nœuds. Les auteurs illustrent comment les aspects topologiques peuvent être exploités pour améliorer différentes fonctions de réseau dans les WSN, notamment la couverture des nœuds, la connectivité, et la fidélité des données, etc. Afin d'exploiter ces informations pertinentes pour ce type de réseaux, les auteurs ont proposé une nouvelle métrique de centralité, appelée Sink Betweenness (Sbet), dérivée de la théorie des réseaux complexes. Tout d'abord, un algorithme distribué est implémenté pour calculer la valeur SBet en tenant compte l'environnement des WSN. Deuxièmement, l'algorithme est appliqué pour assurer deux objectifs différents dans les WSN : exploiter la centralité des nœuds pour améliorer l'efficacité de la fusion des données, et repérer les nœuds proches du récepteur avec le plus grand nombre de paquets. Cette information est utile pour équilibrer l'énergie dans des applications de données continues. Les résultats de la simulation montrent que l'algorithme proposé génère systématiquement des infrastructures de collecte de données de bonne qualité nécessitant des frais de surcharge et énergie réduites. Les algorithmes proposés peuvent être intégrés aux protocoles de routage réseau qui reposent sur les plus courts chemins pour fournir les données.

Naseem et Kumar ont mis en œuvre un nouveau protocole de routage réactif à trajets multiples ([Naseem & Kumar 2015](#)). Les auteurs ont organisé les chemins disjoints entre la source et la destination dans l'ordre croissant du temps round-trip. Le temps round-trip est la somme des intervalles de la procédure de découverte. Ceci est fait de manière où le premier chemin a le minimum temps de découverte alors que le dernier chemin a le maximum temps de découverte. Tout d'abord, un numéro de Fibonacci est attribué à chaque chemin. Deuxièmement, la distribution de paquets est calculée en divisant le nombre de Fibonacci correspondant par le résumé de tous les numéros de Fibonacci correspondants. Enfin, le nœud source distribue le trafic sur les chemins disjoints en fonction de taux de distribution calculé.

Le protocole LCM (Load-Balancing and Coding-Aware Multicast) pour les réseaux mobiles Ad hoc avec une nouvelle métrique d'équilibrage de la charge appelée ETCL (Expected Transmission Time with Coding and Load Balancing) est présentée par les auteurs ([Geng et al. 2016](#)). La métrique ETCL peut être divisée en deux parties : le temps de transmission attendue avec codage et les facteurs d'équilibrage de la charge telle que la longueur de la file d'attente, le numéro de retransmission et le temps d'utilisation du canal. L'idée principale est d'améliorer le processus de découverte d'itinéraire en construisant l'arborescence multicast des nœuds disjoints sur la base de la métrique de routage présentée et d'employer le codage réseau en vue de maintenir les itinéraires. Les résultats de la simulation montrent que le protocole de routage LCM peut améliorer les performances du réseau en termes de taux de livraison des paquets, de délai de bout en bout et de surcharge du réseau.

Patel et al., ont proposés un nouveau protocole pour l'équilibrage de charge dans les réseaux Ad hoc (Patel & Kamboj 2020). Une nouvelle variable data-packet-counter est utilisée dans la table de routage de chaque nœud. Pour chaque paquet de donnée transmis, la variable de compteur du nœud est incrémentée d'une unité. La charge totale d'un chemin particulier est calculée en ajoutant le compteur de tous les nœuds sur ce chemin. Les paquets sont ensuite transmis via le chemin le moins chargé. Le protocole proposé s'est avéré moins complexe et simple ; il diminue le délai de bout en bout et le taux de perte de paquets. L'approche proposée améliore également le taux de livraison des paquets, le débit et la charge de routage normalisée.

4.2.2 Application du paramètre de taux d'activité du canal

Les auteurs dans (Nguyen *et al.* 2011) ont abordé le problème de la sélection des chemins efficaces dans les réseaux WSN. L'utilisation du canal et la fenêtre de contention moyenne de CSMA / CA sont utilisées comme métriques de routage pour l'équilibrage de charge. Les auteurs proposent une métrique de routage qui prend en compte la qualité de la liaison dans les réseaux WSN. L'évaluation quantitative montre que la métrique proposée peut aider à augmenter le débit moyen et à diminuer le taux moyen de perte de paquets. Les travaux présentés ouvrent également des perspectives futures, telles que l'extension du schéma proposé pour l'équilibrage de charge dans les réseaux multi-radio.

Balaji et al. (Balaji & Robinson 2018) ont proposé d'utiliser la technique de routage MRR (Multipath Resilience Routing) pour améliorer la tolérance aux pannes dans MANET. Pour cela, ils ont formé un réseau à l'aide d'un protocole de routage acquérant des mesures spatio-temporelles et proposé par la suite une représentation du réseau spatio-temporel. Le protocole de routage bien connu AOMDV a été utilisé pour valider leur contribution. Le nouveau algorithme de découverte choisit le chemin le plus court et le meilleur en utilisant la gestion minimale de spanning tree.

Dans (Autolitano *et al.* 2013), les auteurs ont abordé le problème de l'échange fréquent de messages de sensibilisation entre les véhicules de VANET. Les auteurs montrent que, sous forte densité de véhicules, le canal de communication devrait être congestionné. De nombreuses applications ont été conçues pour améliorer les communications en prenant en compte le paramètre de charge du canal. L'une de ces applications est le contrôle de congestion décentralisé (DCC) dans lequel différents états peuvent être attribués au nœud en fonction de la charge du canal, comme actif, assoupli et restrictif. La transition entre différents états est effectuée sur la base de la mesure de la charge du canal. Les auteurs ont présenté une analyse de simulation visant à enrichir la compréhension du comportement du DCC dans diverses conditions de charge de canal. Les résultats de la simulation montrent qu'une estimation plus fiable aurait pu aider à filtrer les effets transitoires sur les valeurs de charge. Le tableau 4.1 résume les travaux connexes déjà mentionnés.

TABLE 4.1 – Tableau de synthèse des travaux connexes.

Auteurs	Approche	Protocole Appellation	Métriques	Outils de simulation
Patel et al., (Patel & Kamboj 2020)	Un nouveau protocole pour l'équilibrage de charge dans les réseaux Ad hoc.	Proposed system	Une nouvelle variable data-packet-counter est utilisée dans la table de routage de chaque nœud.	NS2
Balaji et al., (Balaji & Robinson 2018)	Proposer une représentation du réseau spatio-temporel afin d'améliorer la tolérance aux pannes dans MANET.	MRR	Les caractéristiques spatio-temporelles de plusieurs itinéraires en cours d'utilisation dans le réseau.	NS2
Naseem et al., (Naseem & Kumar 2017)	La charge est répartie loin des nœuds situés au centre du réseau.	QSLB	La taille de la file d'attente est défini comme le paramètre de centralité.	NS2
Mounagurusamy (Mounagurusamy 2016)	Répartir le trafic du réseau sur différents chemins disjoints.	PE-AOMDV	Une nouvelle valeur de seuil pour contrôler et limiter le nombre de chemins traversant des nœuds congestionnés en phase de découverte de route.	NS2
Geng et al., (Geng et al. 2016)	Améliorer le processus de découverte d'itinéraire en construisant l'arborescence multicast des nœuds disjoints.	LCM	Une nouvelle métrique d'équilibrage de la charge appelée ETCL.	NS2
Naseem et Kumar (Naseem & Kumar 2015)	Organiser les chemins disjoints entre la source et la destination dans l'ordre croissant du temps round-trip.	FMLB	Le temps round-trip : qui est la somme des intervalles de la procédure de découverte.	GloMoSim
Ramos et al., (Ramos et al. 2014)	Exploiter les informations pertinentes notamment la couverture des nœuds, la connectivité, et la fidélité des données, pour améliorer différentes fonctions de réseau.	CT et randomSBetFree	Une nouvelle métrique de centralité, appelée Sink Betweenness (Sbet), dérivée de la théorie des réseaux complexes.	Omnet++
Nguyen et al., (Nguyen et al. 2011)	Proposer une métrique de routage qui prend en compte la qualité de la liaison dans les réseaux WSN.	C2WB	L'utilisation du canal et la fenêtre de contention moyenne de CSMA / CA sont utilisées comme métriques de routage pour l'équilibrage de charge.	NS2
Souhli et al., (Souhli et al. 2009)	Un nouveau protocole d'équilibrage de charge est proposé par les auteurs, pour éviter la transmission des paquets par les nœuds centraux encombrés.	RTSLB	Le nombre d'entrées dans la table de routage de chaque nœud du réseau.	NS2

4.3 APPROCHE PROPOSÉE

4.3.1 définition de problèmes

Dans cette section, nous comparons les mécanisme d'équilibrage de charge uni-chemin avec celle des mécanismes multi-chemins dans un réseau dense. Nous présentons aussi le modèle mathématique pour calculer le niveau de congestion des mécanismes multi-chemins. Cela est basé sur le travail des auteurs dans la citation (Pham & Perreau 2003).

Soit le réseau sans fil Ad hoc présenté sous la forme du graphe $G(N, L)$, où N représente les nœuds du réseau et L représente les liens unidirectionnels entre les nœuds. Les nœuds sont uniformément répartis avec la densité δ dans un cercle de rayon R . N peut être représenté en fonction du δ et R comme suit :

$$N = \pi R^2 \delta \quad (4.1)$$

Soit A un nœud du réseau N .

Soit D le disque où se trouve le nœud A .

Soit r la distance entre A et le centre du disque D appelé O .

Soit $x(i)$ un point du bord de D où i est l'angle entre $x(i)$ et OA .

Soit $S_{\alpha}d(\alpha)$ une partie de D .

La détermination du nombre de routes de trafic passant par le nœud A et provenant d'une source située dans la région $S_{\alpha}d(\alpha)$ est l'objectif principal. La figure 4.4 montre le modèle de réseau décrit.

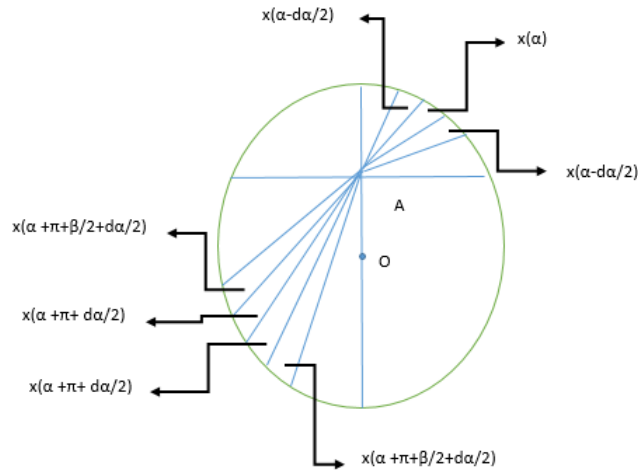


FIGURE 4.4 – Modèle du réseau

En raison des comportements des algorithmes de routage uni-chemin qui comptent sur les plus courts chemins pour acheminer les paquets dans le réseau, les liens entre les nœuds sont supposés être droit. Par conséquent, le nombre de routes N_A passant par le nœud A est approché approximativement de la ligne droite de nombre de routes N_S allant de $S_{\alpha}d(\alpha)$ à $S_{\alpha+\pi}d(\alpha)$.

$$N_S = N_A = \frac{\pi (R^2 - r^2) \delta^2 \beta d_{\alpha}}{4} \quad (4.2)$$

Un réel β positif est utilisé pour ajuster la valeur de N_S à la réalité. Vu que les liens dans le réseau sont bidirectionnels, le nombre total de routes générées par des nœuds situés dans le cercle D et passant par le nœud A est :

$$N_G = \frac{\pi (R^2 - r^2) \delta^2 \beta}{2} \quad (4.3)$$

Par conséquent, le trafic transféré de A et généré par la communication entre les nœuds sources et les destinations avec un taux constant λ est :

$$T_F = \frac{\pi (R^2 - r^2) \delta^2 \beta}{2} \lambda \quad (4.4)$$

Voici le trafic total passant par A avec une distance de r égal à la somme du trafic transféré et de la charge totale généré par les nœuds communiquant avec A :

$$T_{(r)} = \frac{\pi (R^2 - r^2) \delta^2 \beta}{2} + (\pi R^2 \delta - 1) \lambda \quad (4.5)$$

Soit σ le taux de traitement de chaque nœud du réseau, le nombre moyen de paquets dans la file d'attente qui se trouvent à la distance r du O est selon (théorème de Little) égal à :

$$N_{(r)} = \frac{T_{(r)}}{\sigma - T_{(r)}} \quad (4.6)$$

Voici le nombre total moyen de paquets en file d'attente utilisant les mécanismes des chemins les plus courts :

$$N_{pckt_s} = \frac{1}{\pi R^2 \delta} \int_0^R 2\pi r \delta N_{(r)} dr \quad (4.7)$$

Le trafic peut être distribué sur le réseau à l'aide de mécanismes de routage à trajets multiples. Soit L_m la longueur moyenne de liens dans le réseau, et λ_m le trafic de nœud à nœud, σ le taux de traitement comme indiqué précédemment. Le nombre moyen des paquets en file d'attente pour chaque nœud utilisant les mécanismes de routage à trajets multiples est :

$$N_{pckt_M} = \frac{(\pi R^2 \delta - 1) \lambda_m L_m}{\sigma - (\pi R^2 \delta - 1) \lambda_m L_m} \quad (4.8)$$

Comme mentionné précédemment, le niveau de congestion utilisant des mécanismes de routage à trajets multiples est supposé être inférieur à les mécanismes de uni-chemin. Pour cela, il faut satisfaire à la condition suivante :

$$L_m < \frac{N_{pckt_s} \sigma}{(N_{pckt_s} + 1) (\pi R^2 \delta - 1) \lambda_m} = L_{max} \quad (4.9)$$

Ceci peut être réalisé dans des conditions pratiques réelles en définissant des paramètres de réseau tels que la densité de nœuds, topologie du réseau, taux de trafic ... ect (Pham & Perreau 2003).

4.3.2 Modèle du schéma proposé

L'approche proposée est motivée par les résultats analytiques des auteurs de (Pham & Perreau 2003). Les auteurs ont prouvé mathématiquement que les nœuds centraux souffrent d'un surcôt de surcharge. Afin de réduire la charge sur ces nœuds centraux et d'éloigner le trafic des zones denses du réseau, différents paramètres ont été utilisés et appliqués pour mesurer la centralité du réseau, notamment le nombre d'entrées dans la table de routage et le paramètre de longueur de la file d'attente des nœuds. Les mécanismes proposés sont appliqués pour optimiser les performances dans les protocoles de routage uni-chemin.

Cela motive notre travail pour mesurer la centralité du réseau en utilisant les protocoles de routage à trajets multiples. Premièrement, nous avons implémenté le mécanisme existant de mesure de la centralité, en utilisant le paramètre de longueur de file d'attente, avec le protocole de routage multi-chemin AOMDV. Deuxièmement, nous avons présenté un nouveau paramètre permettant de mesurer le flux de surcharge au niveau des nœuds centraux en fonction du taux d'activité du canal (Aouiz *et al.* 2019).

Le choix du paramètre est motivé par le fait que, étant donné le nombre moyen de paquets envoyés par plusieurs chemins dans le réseau, quand on approche du centre du réseau, où le nombre de nœuds, de routes et de trafic sont élevés, le délai de nœuds qui attendent que le support de transmission soit libre pour pouvoir envoyer les paquets est multiplié. Ce délai est ajouté au délai de transmission du paquet; ainsi, le délai peut être augmenté lorsque le trafic réseau passe par des nœuds congestionnés avec un nombre accru de paquets dans la mémoire du tampon.

Le paramètre du taux d'activité du canal peut être le paramètre approprié pour détecter les zones encombrées centrales, où le délai de libération du support de communication et le temps de transmission des paquets à envoyer sont élevés. Le protocole de routage proposé s'appuie sur les nœuds avec le plus court temps d'activité du canal avec le plus court temps de transmission pour acheminer les paquets. Cela peut réduire l'encombrement au cœur du réseau, entraînant une diminution de la fréquence de collision des paquets et une réduction du délai de bout en bout.

La première étape consiste à mesurer la valeur de centralité $C(m)$ de chaque nœud m du réseau. Le taux d'activité du canal est défini comme le temps total pendant lequel le canal est détecté occupé, en plus du temps de transmission par la somme des temps d'inactivité, occupation et le temps de transmission (Nguyen *et al.* 2011). Nous donnons l'équation suivante pour calculer $C(m)$:

$$C(m) = \frac{\sum \text{Transmission} + \sum \text{Busyness}}{\sum \text{Idle} + \sum \text{Transmission} + \sum \text{Busyness}} \quad (4.10)$$

Où $\sum Transmission$ est le temps de transmission, y compris la transmission avec collision, $\sum Busyness$ est le moment où le canal est sensé être occupé en raison de la transmission par d'autres nœuds, et $\sum idle$ est le temps d'inactivité. La valeur de centralité globale d'un chemin $C(p)$ est défini comme la somme moyenne des valeurs de centralité des nœuds $C(p)$ dans le réseau :

$$C(p) = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n c(m) \quad (4.11)$$

Le chemin optimal $OPT(p)$ avec la valeur minimale de centralité $C(p)$ est choisi pour acheminer les paquets de données :

$$OPT(p) = \min \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n c(m) \quad (4.12)$$

En pratique, les valeurs de centralité des nœuds avec le nombre de sauts de route sont inconnues, ces deux paramètres sont nécessaires pour calculer la centralité des chemins. Pour cela, une nouvelle équation est définie, où le nœud $n + 1$ calcule la centralité du chemin actuel en simplifiant l'équation (4.11) en une équation à deux degrés comme suit :

$$C(p) = \frac{1}{n+1} \sum_{m=1}^{n+1} c(m) \quad (4.13)$$

$$C(p) = \frac{1}{n+1} \sum_{m=1}^n c(m) + \frac{1}{n+1} c(n+1) \quad (4.14)$$

$$C(p) = \frac{n}{n+1} \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n c(m) + \frac{1}{n+1} c(n+1) \quad (4.15)$$

$$C(p) = \frac{n}{n+1} c(n) + \frac{1}{n+1} c(n+1) \quad (4.16)$$

De l'équation (4.16), nous concluons que le nœud $n + 1$ peut calculer la centralité du chemin en fonction des valeurs de centralité précédentes calculées à partir de la source jusqu'au nœud n . Un timer a été fixé pour extraire le taux d'activité instantané entre deux créneaux de temps. Cette valeur extraite est utilisée pour détecter le nœud instantané encombré pendant une période de temps spécifique. Un champ double est ajouté aux deux paquets de découverte RREQ et RREP. Lorsqu'il faut établir une route, le nœud source S diffuse des paquets de demande de route dans le réseau. Lorsque les paquets RREQ sont reçus par les nœuds intermédiaires, chaque nœud ajoute son taux d'occupation au paquet. Le paquet est transféré jusqu'à ce qu'il atteigne la destination.

Lorsque la destination D reçoit le paquet de demande de route, elle envoie un paquet de réponse à la source. Plusieurs paquets de réponse peuvent être envoyés à la source afin d'établir plusieurs chemins disjoints. De la même manière, les nœuds intermédiaires ajoutent leur taux d'activité du canal au paquet RREP et le transmettent jusqu'à ce qu'il atteigne la source. La source et la destination choisissent le chemin optimal avec la somme minimale du rapport d'activité du canal pour acheminer les paquets.

Des paquets de maintenance sont diffusés à chaque intervalle de temps pour conserver une vue actualisée des itinéraires. Lorsque une défaillance de liaison est détectée, les nœuds parcourent des chemins alternatifs existants dans la table de routage pour acheminer les paquets. Le chemin le moins encombré avec le rapport de taux d'activité réduit du canal est choisi pour acheminer le paquet de données. Si aucun autre chemin n'est plus disponible dans la table de routage du nœud en cours, un nouveau processus de découverte d'itinéraire est lancé.

L'algorithme 4 présente l'algorithme d'établissement, maintenance des chemins et d'acheminement des paquets en utilisant les chemins optimaux en terme de congestion du canal.

Algorithme 4 : Établissement, maintenance des chemins et acheminement des paquets.

```

S, D or I broadcasts Cm;
When a node N receives Cm;
if Cm == RREQ or Cm == RREP then
    if RT[B] != NULL then
        if NP(RT[B]) < Mp then
            Add P to RT[B];
            C(p)=C(cm);
        else
            Create RT[B] ;
            Add P to RT[B] ;
            C(p)=C(cm);
        C(Cm)=(Hc/(Hc+1)) * C(Cm) + (1/(Hc+1)) * C(N);
        if N == S or N == D then
            Choose P with min C(p) from paths set ;
            Send DATA;
        else
            Keep forwarding Cm packet until N=S or N=D;
    else
        if Cm == RERR then
            if RT[D] != NULL then
                Choose P with min C(p) from paths set ;
                Send DATA;
            else
                Lunch the process of route discovery;

```

Les nœuds S, D et le nœud intermédiaire I diffusent des paquets de contrôle (C_m), les paquets C_m pouvant être respectivement RREQ, RREP ou RERR. Le nœud actuel N reçoit le message, vérifie si l'entrée de route RT [B] du nœud correspondant existe sinon il ajoute le nouveau chemin dans sa table. Le nouveau chemin est ignoré lorsque le nombre maximal de chemins est dépassé ($NP (RT [B]) > M_p$). La valeur de centralité du chemin inverse vers B est extraite du message C_m et sauvegardé avec l'entrée du chemin.

Le nœud courant N calcule la valeur de centralité du chemin C ; cette valeur est calculée à base de la valeur de centralité du nœud précédant $N-1$ et de la valeur de centralité C (N) du nœud N. La valeur de centralité est ensuite ajoutée au paquet C_m . La même procédure est répétée lorsque la destination envoie un paquet de réponse d'itinéraire. Les nœuds source et de destination ont maintenant des chemins alternatifs disjoints pour acheminer les paquets. Le chemin le plus optimisé avec la valeur de centralité réduite ($\min C (p)$) est choisi pour acheminer les paquets.

Lorsqu'une erreur de route se produit, un paquet d'erreur de route RERR est diffusé dans le réseau. Lors de la réception des paquets RERR, le nœud intermédiaire vérifie s'il existe un autre chemin à la destination pour continuer le transfert de paquets ($RT [D] \neq \text{NULL}$). Si ce n'est pas le cas, un nouveau processus de découverte d'itinéraire est lancé pour trouver le nœud correspondant.

4.4 RÉSULTATS DE SIMULATION

Une étude de comparaison est effectuée avec le protocole proposé appelé CBMLB (protocole d'équilibrage de charge multi-chemins basés sur le taux d'activité du canal), QMLB, et les protocoles standard AODV et AOMDV. Les simulations sont réalisées à l'aide du simulateur de réseau NS2 et réalisé en présence de mobilité et de défaillance de route. Les paramètres de simulation sont résumés dans le tableau 4.2.

Les métriques utilisées pour évaluer les protocoles mentionnés sont détaillées ci-dessous :

- Taux de livraison de paquets : Nombre de paquets livrés avec succès divisé par le nombre de paquets envoyés sur le réseau.
- Surcharge de routage : Nombre de paquets de contrôle divisé par le nombre total de paquets diffusés sur le réseau.
- Délai moyen de bout en bout : Délai moyen de bout en bout des paquets traversant des itinéraires allant de l'ensemble des sources à l'ensemble de destinations.

Le visualisation de fichier de sortie NAM de la simulation est présenté à la figure 4.5.

TABLE 4.2 – Paramètres de simulation

Paramètres	Valeurs
Protocole de routage	AODV,AOMDV, QMLB,CBMLB
Mac	802.11
Modèle de mobilité	Random Way Point
Modèle de propagation	Two ray ground
Porté de transmission	250 mètres
Vitesse maximal	10 m/S
Temps de pause	5 secondes
Modèle de communication	40
Taille du paquet	126 bytes
Taille du terrain de simulation	670 x 670
Nombre de nœuds	50
Temps de simulation	100

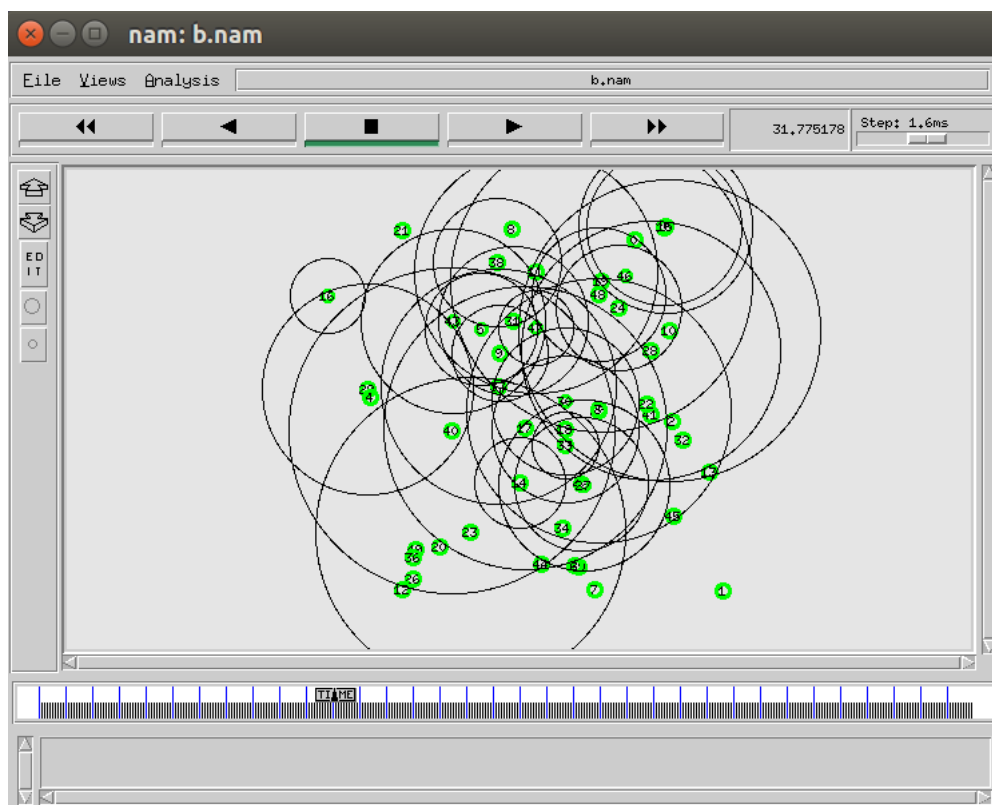


FIGURE 4.5 – Sortie de la simulation

La comparaison entre les protocoles déjà mentionnés se fait en faisant varier le modèle de communication. À faible débit de transmission, le flux de trafic sur le réseau est réduit ; par conséquent, la probabilité de collision de paquets est réduite et les délais de bout en bout sont limités. En conséquence, le taux de livraison de paquets avec succès est augmenté et la surcharge du réseau est réduite. Lorsque le débit du réseau est élevé, le flux de réseau se multiplie, ce qui peut surcharger les nœuds, et engendrer un encombrement du réseau. Par conséquent, la fréquence de collision des paquets augmente simultanément avec le délai de bout en bout.

En comparant AOMDV à AODV en termes de taux de livraison de paquets, la perte de paquets est considérablement réduite, car les nœuds intermédiaires utilisant le protocole AOMDV s'appuient sur les chemins disjoints disponibles dans la table de routage, pour acheminer les paquets en cas de défaillance de la liaison. D'autre part, les nœuds intermédiaires utilisant le protocole AODV abandonnent leur paquet lorsqu'une défaillance de liaison est détectée, ainsi qu'un nouveau processus de découverte est initié.

Le taux de livraison de paquets avec succès ou PDR est amélioré à l'aide de QMLB par rapport au protocole AOMDV. Cela peut être justifié par le fait que QMLB éloigne le trafic des nœuds centraux congestionnés en fonction de la longueur de file d'attente des paquets, ce qui peut réduire la collision de paquets et équilibrer la charge entre les différents chemins disjoints.

Enfin, le PDR est encore amélioré lorsque l'on compare CBMLB à QMLB. Le protocole proposé prend en compte : Le temps de transmission des paquets des nœuds, le temps d'inactivité des nœuds et le temps d'occupation du canal ou les autres nœuds utilisant le support de transmission. Cela peut donner une meilleure vue d'ensemble des zones de réseau encombrées, où la fréquence de transmission et le nombre de nœuds en communication sont élevés. L'utilisation de ces informations permet d'éviter les nœuds centraux congestionnés, ce qui peut réduire la collision de paquets ainsi que le taux de perte de paquets. La figure 4.6 montre les résultats du taux de livraison de paquets avec succès.

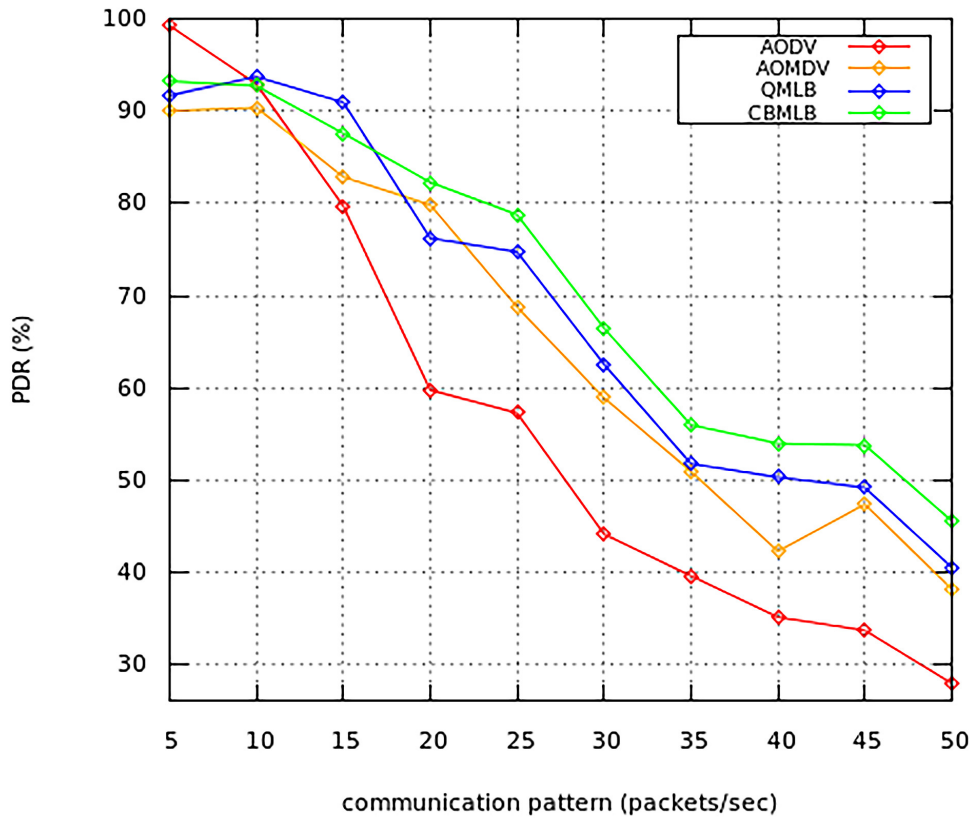


FIGURE 4.6 – Le taux de livraison de paquets avec succès

La comparaison entre les protocoles AODV et AOMDV en termes de surcharge du réseau montre qu'AOMDV offre de meilleures performances en raison du nombre réduit de paquets d'erreurs de route et de paquets de découvertes rediffuser provoquée par des défaillances fréquentes des liaisons. En fait, AOMDV s'appuie sur les chemins alternatifs disponibles dans la table de routage pour envoyer des paquets avant d'initier un nouveau processus de découverte.

La version multi chemins mise en œuvre du protocole QMLB pour prendre en charge les mécanismes de trajets multiples, fonctionne mieux qu'AOMDV en raison que le protocole QMLB s'appuie sur le chemin le moins encombré en termes de longueur de file d'attente pour acheminer les paquets au lieu du chemin optimal en fonction de nombre de sauts

Le protocole CBMLB compte sur les routes avec le plus faible taux d'activité du canal pour acheminer les paquets. Le taux d'activité du canal peut donner une meilleure vue d'ensemble du réseau et peut aider à détecter les nœuds encombrés aux zones denses avec temps de transmission et d'occupation du canal élevé. Une fois que les nœuds encombrés sont détectés, le trafic est dévié loin de ces nœuds et distribué entre les autres nœuds du réseau. La figure 4.7 montre les résultats de la surcharge du réseau.

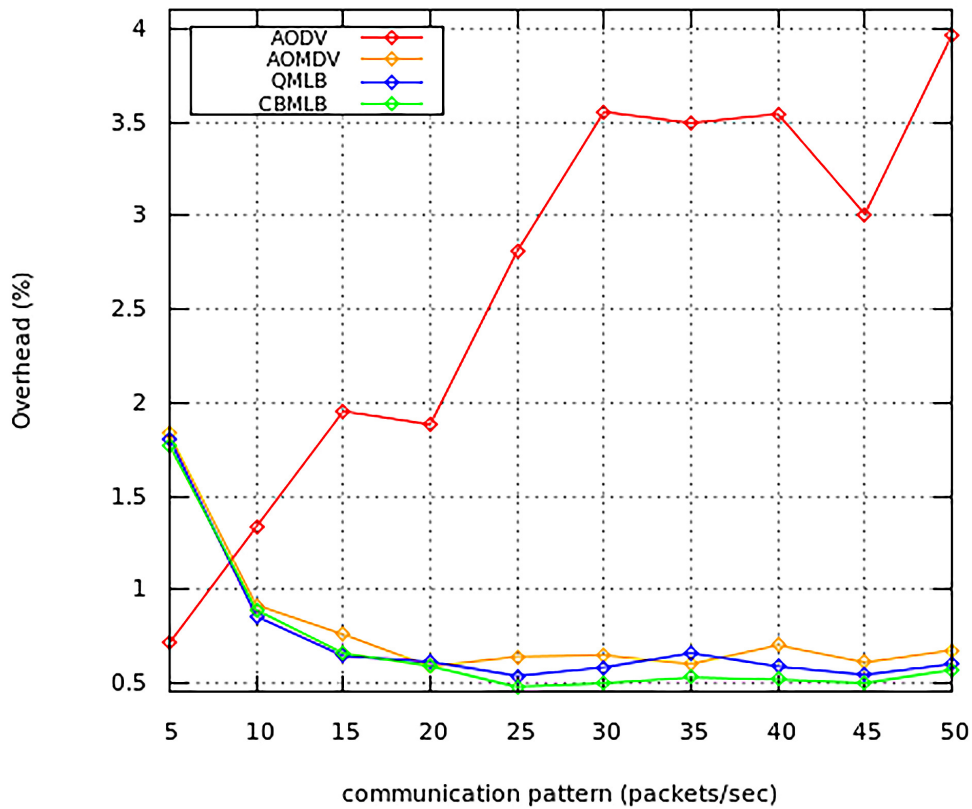


FIGURE 4.7 – Surcharge du réseau

Il est à noter que le lancement d'une nouvelle découverte d'itinéraire en raison d'une défaillance de la liaison affectera l'utilisation du canal. Les paquets de redécouverte diffusés pour trouver la destination inaccessible, ainsi que la retransmission du paquet perdu non livré, vont alourdir la charge sur les nœuds et générer plus de temps d'activité du canal. Un retard supplémentaire dans la transmission de paquet sera ajouté au temps de transmission. Éviter les nœuds avec un taux d'activité du canal élevé aidera à choisir des chemins plus fiables avec une fréquence de défaillance de liaison réduite, et peut réduire la charge sur les nœuds encombrés.

En termes de délai, le protocole AODV a un meilleur délai en comparaison avec le protocole de trajets multiples AOMDV, en raison du délai supplémentaire généré, en s'appuyant sur des chemins de substitution non valides pour poursuivre la transmission de paquets en cas d'échec du chemin principal. Dans le cas de protocole QMLB, les chemins non encombrés avec la longueur de mémoire tampon réduite sont choisis pour acheminer les paquets. Les paquets sont ensuite transférés plus rapidement, ce qui se traduit par de meilleures performances globales en termes de délais en comparant avec AODV et AOMDV. Cela peut être justifié par le fait qu'AODV abandonne immédiatement les paquets lorsque aucun autre chemin n'est trouvé. Dans le cas où le protocole QMLB essaie d'acheminer les paquets avec les chemins les moins encombrés avec la taille de mémoire réduite, cela peut s'avérer plus efficace qu'AOMDV.

En comparant le QMLB avec le protocole CBLMB proposé, l'approche proposée montre un délai de bout en bout réduit. Cela peut être justifié par le fait que CBLMB prend en compte le temps de transmission des paquets, ainsi que le temps de transmission des autres nœuds du réseau, cela peut donner une vue globale de l'état de la zone réseau. En outre, quand le nombre de nœuds augmente dans une zone de communication, les paquets, le délai et la congestion augmentent. Éviter de transmettre des paquets à travers ces zones denses peut aider à réduire les délais de bout en bout. La figure 4.8 montre les résultats de la comparaison des délais de bout en bout.

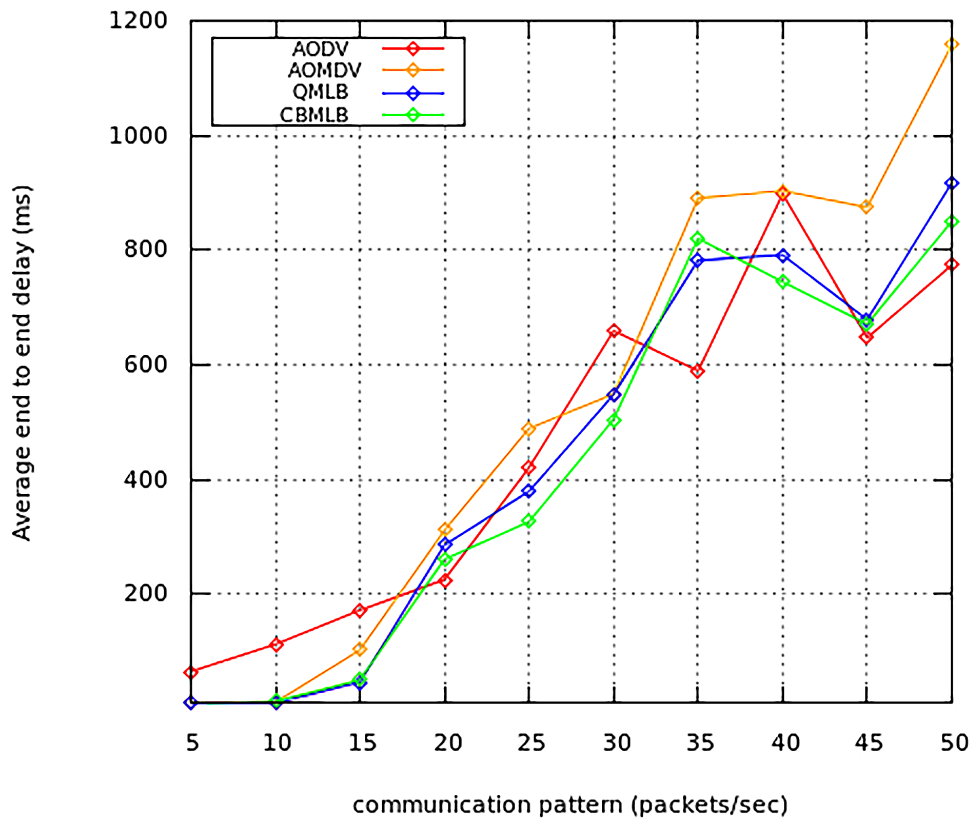


FIGURE 4.8 – Délai moyen de bout en bout

CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce travail est motivé par les travaux similaires existant dans la littérature. Un modèle analytique comparant les mécanismes de routage uni-chemin et multi-chemins est présenté. Le modèle analytique montre que les mécanismes multitrajets peuvent réduire la congestion du réseau. Un nouveau paramètre permettant de mesurer la centralité des nœuds du réseau est présenté. L'approche proposée est mise en œuvre avec le protocole de routage multi chemins AOMDV. Le protocole proposé utilise le taux d'activité du canal comme paramètre de centralité, le chemin optimal en termes de centralité est choisi pour acheminer les paquets. Notre approche a été comparée en utilisant le simulateur NS2 avec les protocoles AODV, AOMDV et QMLB. Une meilleure performance a été constatée en termes de taux de livraison des paquets, de délai de bout en bout, et de surcharge du réseau.

CONCLUSION ET PERSPECTIVE

5

SOMMAIRE

5.1	CONCLUSION	81
5.2	PERSPECTIVE	83

5.1 CONCLUSION

Les réseaux mobiles sans fil MANET ont connu au cours de ces dernières années différentes applications aussi bien dans l'industrie que dans le domaine éducatif. Cela est principalement lié à la facilité et la flexibilité d'installation qu'offre cette technique. Ces réseaux sont souvent caractérisés par un déploiement rapide et aléatoire dans des environnements limités en terme d'énergie, débit, capacité de traitement et de stockage. Il est donc largement reconnu que des différentes questions s'imposent aujourd'hui sur l'exploitation optimisée des ressources limitées de ces réseaux.

Bien que l'établissement de chemins correctes et efficaces soit un objectif important dans la conception des protocoles de routage pour les réseaux Ad hoc, mais l'objectif le plus important reste d'établir des chemins stables. Les protocoles de routages multi chemins définis précédemment apportent plus de performances par rapport au protocole à chemin unique, par contre ils ont un inconvénient qui consiste à ne pas prendre en considération les changements de la structure des réseaux au cours du temps, et par la suite les chemins alternatifs peuvent subir des ruptures à cause la mobilité des nœuds.

Nous avons tenté à travers ce mémoire d'apporter quelques solutions aux problèmes liés à la qualité de service dans les réseaux sans fil ad hoc notamment la maximisation de la durée de vie du réseau et la réduction de congestion aux zones denses de communication. Le travail a été focalisé sur l'optimisation de performance du protocole mutichemin AOMDV, et sur l'utilisation d'autres métriques de routage afin de répondre à l'exigence de certaines applications.

Nous avons proposé deux schémas pour l'optimisation d'énergie et la réduction de congestion du réseau. Nous avons dans un premier temps commencé par l'état de l'art qui nous a permis de bien comprendre la problématique et d'avoir une idée bien détaillée sur les solutions proposées par différents chercheurs. Cependant, la revue de cet état de l'art nous a permis de conclure qu'il reste encore des problématiques ouvertes.

Nous avons montré dans la première partie de notre étude que la durée de vie des réseaux MANET est liée à la durée de vie nodale. Une solution pour la maximisation de durée de vie des nœuds mobiles en utilisant les valeurs historiques de l'énergie nodale est présentée. Ces valeurs sont utilisées pour calculer le taux de variation de l'énergie et par la suite pour révéler les nœuds avec une consommation excessive d'énergie. Les nœuds avec une forte consommation d'énergie sont exclus de découverts des liens de communication pour éviter le risque d'épuisement rapide, cela peut aider par la suite à maintenir de la connectivité entre les nœuds communicants et maximiser la durée de vie du réseau.

Dans la deuxième partie de notre étude, un nouveau paramètre pour repérer les nœuds congestionnés au centre du réseau en fonction du taux d'activité du canal est présenté. Le choix de paramètre est motivé par le fait que le taux d'activité du canal peut être la métrique appropriée pour détecter les zones encombrées centrales, où le délai de libération du support de communication et le temps de transmission des paquets à envoyer sont élevés. Ceci motive l'approche proposée par repousser le trafic du centre du réseau en se basant sur la nouveau paramètre proposé, entraînant une diminution de la fréquence de collision des paquets et une réduction du délai de bout en bout.

Nous avons validé les deux contributions en utilisant l'outil de simulation NS-2 sous différents scénarios de trafic et de mobilité, en variant le nombre des nœuds, le nombre de communication ... etc. Nous avons montré à travers les simulations l'intérêt de nos contributions dans l'amélioration des performances du réseau en termes de maximisation de durée de vie des nœuds, réduction des délais de bout en bout, réduction de surcharge du réseau, et l'amélioration de taux de paquets délivré avec succès.

5.2 PERSPECTIVE

Toutefois, dans la continuité du travail présenté, nous pourrions approfondir notre étude afin d'améliorer les résultats obtenus. En particulier, l'étude de la qualité de service multicouche (MAC, Réseau) peut être améliorée pour inclure la couche physique. Dans ce cas, la couche réseau peut adapter le débit des flux en fonction des informations fournies par les couches basses. Parallèlement, un mécanisme de contrôle d'admission serait intéressant à étudier et qui permettrait de contrôler la charge du réseau et de réguler le nombre de trafic dans le réseau ad hoc.

Le protocole de routage réduisant les collisions et le nombre de re-transmissions ; a un impact positif sur la consommation énergétique des nœuds, vu que les nœuds consomment moins d'énergie pour transmettre correctement un paquet. La modélisation optimisée de la topologie du réseau, en gardant trace sur l'historique des communication pour améliorer la qualité de service, peut aussi améliorer les performances du réseau et permettre de surmonter rapidement et efficacement les problèmes de congestion et défaillance de liaisons.

En tant que travail futur, nous proposons de coordonner différents paramètres du réseau afin de mettre en œuvre une approche multicritères pour la détection de la congestion. Ensuite, une technique de prise de décision multicritère sera utilisée pour sélectionner le chemin de communication le plus optimal .

Enfin, bien que la réalisation de simulation est une phase importante car elle permet de comparer les protocoles de routage proposés avec les protocoles existants. Il peut être envisagé une expérimentation sur des équipements réels permettant l'évaluation de notre protocole dans des conditions réelles.

LISTE DES PUBLICATIONS

Journal international

Amir Abdelkader AOUIZ, Sofiane BOUKLI-HACENE, Pascal LORENZ, Marc GILG, "Network Life Time maximization of the AOMDV Protocol Using Nodes Energy Variation," *Network Protocols and Algorithms*, Vol. 10, No. 2, 2018, pp. 73-94.

Amir Abdelkader AOUIZ, Sofiane BOUKLI-HACENE, Pascal LORENZ, "Channel Busyness Based Multipath Load Balancing Routing Protocol for Ad hoc Networks," *IEEE Network*, Vol. 33, No. 5, 2019, pp. 118 - 125.

ANNEXES

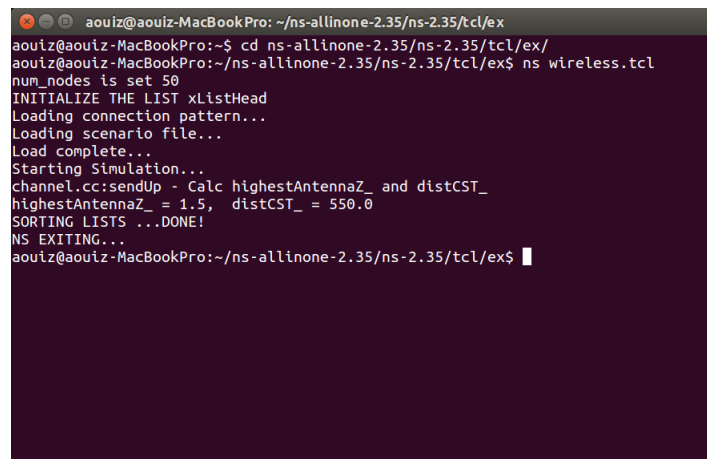
A

SOMMAIRE

A.1 SIMULATION AVEC NS2 (SCRIPTS ET DÉTAILS)	86
--	----

A.1 SIMULATION AVEC NS2 (SCRIPTS ET DÉTAILS)

L'outil NS2 est un outil open source exécutable sur des différentes plateformes comme Linux (voir figure A.1) et Windows via Cygwin. NS2 contient des différents modules nécessaire pour simuler le comportement des réseaux, dont : les modules pour la génération des scénarios de mobilité et de communication, les modules de configuration et de déploiement du réseau, ainsi que les modules de visualisation de simulation. NS2 coopère aussi avec plusieurs outils d'analyses et de visualisation des résultats de simulation comme Gnuplot.



```

aouiz@aouiz-MacBookPro: ~/ns-allinone-2.35/ns-2.35/tcl/ex
aouiz@aouiz-MacBookPro:~$ cd ns-allinone-2.35/ns-2.35/tcl/ex/
aouiz@aouiz-MacBookPro:~/ns-allinone-2.35/ns-2.35/tcl/ex$ ns wireless.tcl
num_nodes is set 50
INITIALIZE THE LIST xListHead
Loading connection pattern...
Loading scenario file..
Load complete...
Starting Simulation...
channel.cc:sendUp - Calc highestAntennaZ_ and distCST_
highestAntennaZ_ = 1.5, distCST_ = 550.0
SORTING LISTS ...DONE!
NS EXITING...
aouiz@aouiz-MacBookPro:~/ns-allinone-2.35/ns-2.35/tcl/ex$

```

FIGURE A.1 – L'interface de commande de linux

La première chose à faire pour simuler le comportement d'une communication d'un réseau, c'est de générer un scénario de mobilité, ce scénario décrit le nombre des noeuds dans la zone de communication, la vitesse, temps de pause ... etc. Cela est fait grâce au module dans le répertoire de fichiers : ns/indep-utils/cmu-scen-gen/setdest.

Deuxièmement, on doit générer le scénario de communication entre les différents noeuds mobiles, ce scénario précise les noeuds communiquant dans le réseau, la taille des paquets ... etc. Cela est fait grâce au module dans le répertoire de fichiers : ns/indep-utils/cmu-scen-gen.

Troisièmement, on doit configurer les différents paramètres de topologie comme le choix du protocole de routage, durée de simulation ... etc. Cela est fait grâce à un fichier d'extension TCL. L'extraction et l'analyse des résultats de simulation sont faites grâce à un fichier d'extension AWK. Les résultats de simulations sont visualisés grâce à l'outil GNU PLOT.

On a utilisé un fichier d'extension CSH, pour à la fois : inclure les scénarios de mobilité et communication avec le fichier de configuration réseau, la simulation et l'extraction des fichiers traces, ainsi que l'analyse des différents paramètres de performance. Les scripts de génération des scénarios avec l'explication des différents commandes sont détaillées dans les pages suivantes.

```

#=====
      Générateur de fichier de scénarios de communication
#=====

Répertoire:
~/ns/indep-utils/cmu-scen-gen

Fichier:
cbrgen.tcl -- pour générer des connexions CBR et pour générer des
connexions TCP

Méthode:

Pour créer des connexions CBR / TCP, exécutez-le en ligne de commande:

ns cbrgen.tcl [-type cbr|tcp] [-nn nodes] [-seed seed] [-mc connections]
[-rate rate]

Par exemple:

ns cbrgen.tcl -type cbr -nn 60 -seed 2 -mc 50 -rate 4 >name-file

#=====
      Un extrait du fichier de sortie
#=====
# 4 connecting to 5 at time 107.69501429409489
#
set udp_(0) [new Agent/UDP]
$ns_ attach-agent $node_(4) $udp_(0)
set null_(0) [new Agent/Null]
$ns_ attach-agent $node_(5) $null_(0)
set cbr_(0) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr_(0) set packetSize_ 512
$cbr_(0) set interval_ 0.04
$cbr_(0) set random_ 1
$cbr_(0) set maxpkts_ 10000
$cbr_(0) attach-agent $udp_(0)
$ns_ connect $udp_(0) $null_(0)
$ns_ at 107.69501429409489 "$cbr_(0) start"
#
# 4 connecting to 6 at time 112.66623783515126
#
set udp_(1) [new Agent/UDP]
$ns_ attach-agent $node_(4) $udp_(1)
set null_(1) [new Agent/Null]
$ns_ attach-agent $node_(6) $null_(1)
set cbr_(1) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr_(1) set packetSize_ 512
$cbr_(1) set interval_ 0.04
$cbr_(1) set random_ 1
$cbr_(1) set maxpkts_ 10000
$cbr_(1) attach-agent $udp_(1)
$ns_ connect $udp_(1) $null_(1)
$ns_ at 112.66623783515126 "$cbr_(1) start"

```

```
#=====
# Générateur de fichier de scénarios de mobilité
#=====
```

Répertoire:
~ns/indep-utils/cmu-scen-gen/setdest

Fichiers:
setdest.h setdest.cc

Méthode:

Exécutez-le en ligne de commande:

```
./setdest [-v version of setdest; 1 for original 1999 CMU version or 2
for modified 2003 U.Michigan version ] [-n num_of_nodes] [-p pausetime]
[-s maxspeed] [-t simtime] [-x maxx] [-y maxy] > [outdir/movement-file]
```

Example:

```
./setdest -v 1 -n 50 -p 5.0 -M 5.0 -t 400 -x 670 -y 670 >5-scen50-5
#=====
```

```
Un extrait du fichier de sortie
#=====
#
# nodes: 50, pause: 5.00, max speed: 5.00, max x: 670.00, max y: 670.00
#
$node_(0) set X_ 65.957791679357
$node_(0) set Y_ 420.681994513575
$node_(0) set Z_ 0.000000000000
$node_(1) set X_ 586.831478970346
$node_(1) set Y_ 560.940952600380
$node_(1) set Z_ 0.000000000000
$node_(2) set X_ 611.569458920613
$node_(2) set Y_ 353.358182171011
$node_(2) set Z_ 0.000000000000
$node_(3) set X_ 560.357777947657
$node_(3) set Y_ 168.701176468712
$node_(3) set Z_ 0.000000000000
$god_ set-dist 0 1 3
$god_ set-dist 0 2 3
$god_ set-dist 0 3 3
$ns_ at 5.000000000000 "$node_(0) setdest 382.133373137038
342.777467800238 4.753336728014"
$ns_ at 5.000000000000 "$node_(1) setdest 213.955167576828
423.033038629422 0.718727620434"
$ns_ at 5.000000000000 "$node_(2) setdest 142.100430616850
237.561774517607 0.438410202318"
```

```

#=====
# Paramètres de ligne de commande
#=====
global argv arg0

set opt(tr) [lindex $argv 0];# fichier trace
set opt(na) [lindex $argv 1];# fichier nam
set opt(cp) [lindex $argv 2];# fichier scénario de communication
set opt(sc) [lindex $argv 3];# fichier scénario de mobilité

global $opt(na)

# Define options

set opt(chan) Channel/WirelessChannel
set opt(prop) Propagation/TwoRayGround
set opt(netif) Phy/WirelessPhy
set opt(mac) Mac/802_11
set opt(ifq) Queue/DropTail/PriQueue
set opt(ll) LL
set opt(ant) Antenna/OmniAntenna
set opt(x) 670 ; # X dimension de la topographie
set opt(y) 670 ; # Y dimension de la topographie
set opt(ifqlen) 50 ; # max paquets dans la file d'attente
set opt(seed) 1.0
set opt(adhocRouting) AOMDVT
set opt(nn) 50 ; # nombre de noeuds
set opt(stop) 100 ; # temps de simulation 100
set val(energymodel) EnergyModel;
set val(rxPower) 1 ; # énergie consommé lors de réception des
paquets
set val(txPower) 1 ; # énergie consommé lors de transmission
des paquets
set val(initialenergy) 1000 ; # Energie initiale en Joules
set val(sleeppower) 0.00005 ;
set val(tp) 0.002 ;
set val(sensePower) 0.1 ;
set val(tt) 0.05 ;
set val(ip) 0,003 ;

#=====
# Main Program
# =====
# Initialiser les variables globales
# Créer une instance de simulateur
set ns_ [new Simulator]

# Définir des objets de canal sans fil, de modèle radio et de topographie
set wtopo [new Topography]

# Créer un objet trace pour ns et nam
set tracefd [open $opt(tr) w]
$ns_ trace-all $tracefd

```



```

set namtrace      [open $opt(na) w]
$ns_ namtrace-all-wireless $namtrace $opt(x) $opt(y)
$ns_ use-newtrace

# Définir la topologie
$wtopo load_flatgrid $opt(x) $opt(y)

set god_ [create-god 50]

# Définir comment le noeud doit être créé
$ns_ node-config -adhocRouting $opt(adhocRouting) \
    -llType $opt(ll) \
    -macType $opt(mac) \
    -ifqType $opt(ifq) \
    -ifqLen $opt(ifqlen) \
    -antType $opt(ant) \
    -propType $opt(prop) \
    -phyType $opt(netif) \
    -channelType $opt(chan) \
    -topoInstance $wtopo \
    -agentTrace ON \
        -routerTrace ON \
        -macTrace OFF

$ns_ node-config -energyModel $val(energymodel) \
    -rxPower $val(rxPower) \
    -txPower $val(txPower) \
    -idlePower $val(ip) \
    -sleepPower $val(sleppower) \
    -transitionPower $val(tp) \
    -transitionTime $val(tt) \
    -initialEnergy $val(initialenergy)

Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.2818
Phy/WirelessPhy set freq_ 914e+06
set dist(150m) 2.81838e-09
set dist(100m) 1.42681e-08
set dist(50m) 7.69113e-08
set dist(200m) 8.91754e-10
set dist(250m) 3.65262e-10
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ $dist(250m)
Phy/WirelessPhy set CStresh_ $dist(250m)
Antenna/OmniAntenna set Z_ 1.5
Antenna/OmniAntenna set Gt_ 1
Antenna/OmniAntenna set Gr_ 1

set num 0;
for {set i 0} {$i < $opt(nn)} {incr i} {
    set node_($i) [$ns_ node]
    $node_($i) random-motion 0;
}

```

```

puts "Loading connection pattern..."
source $opt(cp)

puts "Loading scenario file..."
source $opt(sc)

# Définir la position initiale du noeud dans nam
for {set i 0} {$i < $opt(nn)} {incr i} {

    $ns_ initial_node_pos $node_($i) 20

}
#for {set i 0} {$i < $opt(nn)} {incr i} {
#    $ns_ at 599.9 "[$node_($i) set ragent_] dump-table";
#}

# Indique aux nœuds la fin de la simulation
for {set i 0} {$i < $opt(nn)} {incr i} {
    $ns_ at $opt(stop).000000001 "$node_($i) reset";
}

$ns_ at $opt(stop) "stop"
proc stop {} {

    global ns_ tracefd
    $ns_ flush-trace
    close $tracefd
    exit 0
}
$ns_ run

```

```

#=====
      Le script CSH qui inclut les fichiers trace, nam et awk
#=====

unset noclobber

## répartition des fichiers de scénarios
set outdir = senario
## répartition des fichiers de trace
set outdir3 = rep3
## répartition des fichiers de resultats de simulation
set outdir4 = rep4

## pour chaque vitesse
foreach vt (10)
## pour chaque temps de pause
foreach pt (10)
## pour chaque scénario de mobilité
foreach scen (50)
## pour chaque scénario de communication
foreach cg(5 10 15 20 25 30 35 40 45 50)

#####

ns bsimple.tcl $outdir3/${vt}-resultscross${scen}-${pt}.tr
$outdir3/${vt}-resultscross${scen}-${pt}.nam $outdir/${cg}-cbrn-${pt}-50
$outdir/${vt}-scen${scen}-5

awk -f delay.awk $outdir3/${vt}-resultscross${scen}-${pt}.tr y=${pt} >>
$outdir4/${vt}-ENDcross${scen}
awk -f remain_energy.awk $outdir3/${vt}-resultscross${scen}-${pt}.tr
g=${pt} >> $outdir4/${vt}-remain_energycross${scen}
awk -f overhead.awk $outdir3/${vt}-resultscross${scen}-${pt}.tr z=${pt} >>
$outdir4/${vt}-OVERcross${scen}
awk -f Throughput.awk $outdir3/${vt}-resultscross${scen}-${pt}.tr g=${pt}
>> $outdir4/${vt}-Throughputcross${scen}
awk -f pdr.awk $outdir3/${vt}-resultscross${scen}-${pt}.tr g=${pt} >>
$outdir4/${vt}-PDRcross${scen}

echo "Results"

end
end

```

```

#=====
#          Script AWK pour calculer le taux de livraison de paquets PDR
#=====
BEGIN {
    sendLine = 0;
    recvLine = 0;
    fowardLine = 0;
}

$0 ~/^s.* AGT/ {
    sendLine ++ ;
}

$0 ~/^r.* AGT/ {
    recvLine ++ ;
}

$0 ~/^f.* RTR/ {
    fowardLine ++ ;
}

END {

print 100*(recvLine/sendLine);

}

#=====
#          Script AWK pour calculer la surcharge du réseau
#=====
BEGIN{
recvd = 0; # nombre de paquets de données
rt_pkts = 0; # nombre de paquets de routage
}

{
##### Check if it is a data packet
if (( $1 == "r" ) && ( $35 == "cbr" || $35 == "tcp" ) && ( $19=="AGT" ))
recvd++;

##### Check if it is a routing packet
if (( $1 == "s" || $1 == "f" ) && $19 == "RTR" && ( $35 == "AOMDV" ))
rt_pkts++;

}

END{
print (rt_pkts/recvd);
}

```

```

=====
      Script AWK pour calculer le délai de bout en bout
=====

BEGIN {

    highest_packet_id = 0;
}

{
    action = $1
    time = $3
    node_id = $5
    flow_id = $39
    packet_id = $41
    pkt_size = $37
    flow_t = $45
    level = $19

    if ( packet_id > highest_packet_id ) highest_packet_id = packet_id;

    if ( start_time[packet_id] == 0 ) start_time[packet_id] = time;
    if( start_time[packet_id] == 0 && $19 == "AGT" && $1 == "s" && ($35 ==
"cbr")) {
        start_time[packet_id] = time
    }

    if ( action != "d" ) {
        if ( action == "r" ) {
            end_time[packet_id] = time;
        }
    } else {
        end_time[packet_id] = -1;
    }
}
END {
    for ( packet_id = 0; packet_id <= highest_packet_id; packet_id++ ) {
        start = start_time[packet_id];
        end = end_time[packet_id];
        packet_duration = end - start;
        if ( start < end ) Endtoenddelay=Endtoenddelay+packet_duration;
    }
}
print Endtoenddelay;
}

```

```

#=====
      Script Gnuplot pour présenter les résultats de performance
#=====
set yrange [26:100]
set key off

set key samplen 2 spacing 0.55 font ",7"
set key on inside right box

set grid
set term pngcairo enhanced size 480,400
set output "pdr.png"
set xlabel "Xlabel"
set ylabel "{/*2 Ylabel}"
set xtics font ",8"
set ytics font ",8"
set xlabel "x-units" font "Times-Roman,8"
set ylabel "y-units" font "Times-Roman,8"
set xlabel "communication pattern (packets/sec)"
set ylabel "PDR (%)"

plot 'AODV.txt' title "AODV " lt 2 pt 12 lc rgb "red" with
linespoints, 'AOMDV.txt' title "AOMDV" lt 2 pt 12 lc rgb "orange" with
linespoints, 'QMLB.txt' title "QMLB " lt 2 pt 12 lc rgb "blue" with
linespoints, 'CBMLB.txt' title "CBMLB " lt 2 pt 12 lc rgb "green"
with linespoints,

replot with errorbars

```

BIBLIOGRAPHIE

- [Ahson & Ilyas 2018] Syed Ahson et Mohammad Ilyas. *Wimax : technologies, performance analysis, and qos*. CRC press, 2018.
- [Aouiz *et al.* 2018] Amir Abdelkader Aouiz, Sofiane Boukli Hacene, Pascal Lorenz et Marc Gilg. *Network Life Time maximization of the AOMDV Protocol Using Nodes Energy Variation*. *Network Protocols and Algorithms*, vol. 10, no. 2, pages 73–94, 2018.
- [Aouiz *et al.* 2019] Amir Abdelkader Aouiz, Sofiane Boukli Hacene et Pascal Lorenz. *Channel Busyness Based Multipath Load Balancing Routing Protocol for Ad hoc Networks*. *IEEE Network*, vol. 33, no. 5, pages 118–125, 2019.
- [Atelin 2009] Philippe Atelin. *Réseaux informatiques : notions fondamentales : normes, architecture, modèle osi, tcp/ip, ethernet, wi-fi,...* Editions ENI, 2009.
- [Autolitano *et al.* 2013] Alessia Autolitano, Claudia Campolo, Antonella Molinaro, Riccardo M Scopigno et Andrea Vesco. *An insight into Decentralized Congestion Control techniques for VANETs from ETSI TS 102 687 V1. 1.1*. In 2013 IFIP Wireless Days (WD), pages 1–6. IEEE, 2013.
- [Awduche *et al.* 2002] Daniel Awduche, Angela Chiu, Anwar Elwalid, Indra Widjaja et XiPeng Xiao. *Overview and principles of Internet traffic engineering*. Rapport technique, RFC 3272, may, 2002.
- [Azizi 2016] Ridha Azizi. *Consumption of Energy and Routing Protocols in Wireless Sensor Network*. *Network Protocols & Algorithms*, vol. 8, no. 3, pages 76–87, 2016.
- [Balaji & Robinson 2018] S Balaji et Y Harold Robinson. *Development of Multipath Resilience Routing Technique to Improve the Fault Tolerance in Mobile Ad-Hoc Networks*. In 2018 International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA), pages 743–747. IEEE, 2018.
- [Bansal *et al.* 2015] Bijender Bansal, Malay Ranjan Tripathy, Deepak Goyal et Monika Goyal. *Improved routing protocol for MANET*. In 2015 Fifth International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies, pages 340–346. IEEE, 2015.
- [BELKHEIR 2015] Mohammed BELKHEIR. *RESEAUX AD-HOC : Optimisation de la qualité de service QoS du réseau par conservation d'énergie*. Thèse de Doctorat, Université de Djillali Liabes de SBA, 2015.

- [Belkhira *et al.* 2019] Sid Ahmed Hichame Belkhira, Sofiane Boukli Hacene, Pascal Lorenz, Mohammed Belkheir, Marc Gilg et Merahi Bouziani. *WRE-OLSR, a new scheme for enhancing the lifetime within ad hoc and wireless sensor networks*. *International Journal of Communication Systems*, vol. 32, no. 11, page e3975, 2019.
- [Benmammar & Krief 2004] Badr Benmammar et Francine Krief. *La technologie agent et les réseaux sans fil*. Congrès DNAC, pages 1–12, 2004.
- [Bettstetter 2001] Christian Bettstetter. *Smooth is better than sharp : a random mobility model for simulation of wireless networks*. In *Proceedings of the 4th ACM international workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pages 19–27. ACM, 2001.
- [Bhatia & Verma 2015] Tarunpreet Bhatia et AK Verma. *QoS comparison of MANET routing protocols*. *International Journal of Computer Network and Information Security*, vol. 7, no. 9, pages 64–73, 2015.
- [Bouarafa *et al.* 2016] Saleh Bouarafa, Rachid Saadane et Driss Aboutajdine. *Reduction of energy consumption in WSN using the generalized Pythagorean theorem*. In *2016 5th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, pages 720–725. IEEE, 2016.
- [Bouazzi 2018] Imen Bouazzi. *Optimisation d'accès au medium afin d'économiser de l'énergie dans les réseaux de capteurs sans fils*. Thèse de Doctorat, Université de Monastir, 2018.
- [Bouchama *et al.* 2011] Nadir Bouchama, Nadia Nouali, Djamil Aïssani, Natalia Djellab et Houari Maouchi. *Extending the AODV protocol to provide quality of service in mobile ad hoc networks*. In *ICIST'2011 International Conference*, pages 1–7, 2011.
- [Camp *et al.* 2002] Tracy Camp, Jeff Boleng et Vanessa Davies. *A survey of mobility models for ad hoc network research*. *Wireless communications and mobile computing*, vol. 2, no. 5, pages 483–502, 2002.
- [Chettibi 2008] Saloua Chettibi. *Protocole de routage avec prise en compte de la consommation d'énergie pour les réseaux mobiles ad-hoc*. Mémoire de Magister, Université de Mentouri Constantine, 2008.
- [Chettibi 2009] Saloua Chettibi. *Un protocole de routage a basse consommation d'énergie pour les MANETs*. Rapport technique, Université Mentouri, Constantine, Algérie., 2009.
- [Chintawar *et al.* 2011] A Chintawar, M Chatterjee et A Vidhate. *AOMDV-APLP : an enhanced algorithm with accessibility and link breakage prediction*. In *Proceedings of the International Conference & Workshop on Emerging Trends in Technology*, pages 841–845, 2011.
- [Chitkara & Ahmad 2014] Mahima Chitkara et Mohd Waseem Ahmad. *Review on manet : characteristics, challenges, imperatives and routing protocols*. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, vol. 3, no. 2, pages 432–437, 2014.

- [Chouikhi 2016] Samira Chouikhi. *Tolérance aux pannes dans un réseau de capteurs sans fil multi-canal*. Thèse de Doctorat, Paris Est, 2016.
- [Clausen *et al.* 2003] Thomas Clausen, Philippe Jacquet, Cédric Adjih, Anis Laouiti, Pascale Minet, Paul Muhlethaler, Amir Qayyum et Laurent Viennot. *Optimized link state routing protocol (OLSR)*. Rapport de recherche, Unité de recherche INRIA, 2003.
- [Crawley *et al.* 1998] Eric Crawley, H Sandick, R Nair et B Rajagopalan. *A Framework for QoS-based Routing in the Internet*. RFC 2386 , 1998.
- [Dahlman *et al.* 2016] Erik Dahlman, Stefan Parkvall et Johan Skold. *4g, lte-advanced pro and the road to 5g*. Academic Press, 2016.
- [Defaye 2006] Jérémie Defaye. *Les différents types de réseaux sans fil*, 2006.
- [Doghri 2012] Inès Doghri. *Stratégies de routage multi-chemin dans les réseaux sans fil multi-sauts*. Thèse de Doctorat, École Normale Supérieure de Lyon, 2012.
- [Edney & Arbaugh 2004] Jon Edney et William A Arbaugh. *Real 802.11 security : Wi-fi protected access and 802.11 i*. Addison-Wesley Professional, 2004.
- [Essinger *et al.* 2015] Steven Essinger, Xiaoxun Zhu, Michael Schnee, JiBin Liu, Xin Shen, LiangLiang Chen et Jun Lu. *Wireless network device*, 2015.
- [Evennou & Marx 2006] Frédéric Evennou et François Marx. *Advanced integration of WiFi and inertial navigation systems for indoor mobile positioning*. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, vol. 2006, no. 1, pages 1–11, 2006.
- [Farahani 2011] Shahin Farahani. *Zigbee wireless networks and transceivers*. Newnes, 2011.
- [Garnepudi *et al.* 2013] Parimala Garnepudi, Tipura Damarla, Jyotshna Gaddipati et D Veeraiah. *Proactive, reactive and hybrid multicast routing protocols for Wireless Mesh Networks*. In 2013 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, pages 1–7, 2013.
- [Gautam & Sen 2015] Genita Gautam et Biswaraj Sen. *Design and simulation of wireless sensor network in NS2*. International Journal of Computer Applications, vol. 113, no. 16, 2015.
- [Geng *et al.* 2016] Rong Geng, Zhaolong Ning et Ning Ye. *A load-balancing and coding-aware multicast protocol for mobile ad hoc networks*. International Journal of Communication Systems, vol. 29, no. 17, pages 2457–2470, 2016.
- [Gowtham & Subramaniam 2018] MS Gowtham et Kamalraj Subramaniam. *Congestion control and packet recovery for cross layer approach in MANET*. Cluster Computing, pages 1–8, 2018.

- [Gupta *et al.* 2013] Anuj K Gupta, Harsh Sadawarti et Anil K Verma. *Performance analysis of MANET routing protocols in different mobility models*. International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS), vol. 5, no. 6, pages 73–82, 2013.
- [Gupta 2016] Prasad Ghanshyam Gupta Sunita. *Enhanced load balancing and delay constraint AOMDV routing in MANET*. In 2016 Symposium on Colossal Data Analysis and Networking (CDAN), pages 1–6, 2016.
- [Hall *et al.* 2015] Howard Hall, Ilia Sokolinski et Milan Merhar. *Tcp/udp acceleration*, Février 3 2015.
- [Hasrouny *et al.* 2017] Hamssa Hasrouny, Abed Ellatif Samhat, Carole Bassil et Anis Laouiti. *VANet security challenges and solutions : A survey*. Vehicular Communications, vol. 7, pages 7–20, 2017.
- [Hong *et al.* 2014] Youngtaek Hong, Jinpil Tak, Jisoo Baek, Bongsik Myeong et Jaehoon Choi. *Design of a multiband antenna for LTE/GSM/UMTS band operation*. International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2014, 2014.
- [Issariyakul & Hossain 2009] Teerawat Issariyakul et Ekram Hossain. *Introduction to network simulator 2 (NS2)*. In Introduction to network simulator NS2, pages 1–18. Springer, 2009.
- [Jaber 2018] Ghada Jaber. *A content-centric approach for wireless sensor networks*. Thèse de Doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2018.
- [Jamalipour 2003] Abbas Jamalipour. *The Wireless Mobile Internet, Architecture, Protocols and Services*. John Wiley & Sons Ltd, 368–384., 2003.
- [Jiang *et al.* 2011] James Jiang, Yonggang Fang, Rajesh Bhalla et Mary Chion. *Interworking mechanism between wireless wide area network and wireless local area network*, 2011.
- [Johnson *et al.* 2007] David Johnson, Yin-chun Hu et David Maltz. *The dynamic source routing protocol (DSR) for mobile ad hoc networks for IPv4*. Rapport technique, RFC 4728, 2007.
- [Jorgensen 2017] Jacob W Jorgensen. *Transmission control protocol/internet protocol (TCP/IP) packet-centric wireless point to multi-point (PtMP) transmission system architecture*, 2017.
- [Joshi *et al.* 2013] Vijaylaxmi Joshi, Mallangouda Biradar et Sanjeevkumar Jeevangi. *Predictive Pre-emptive Ad-hoc On Demand Multipath Distance Vector Routing Protocol for MANET*. International Journal of Engineering and Innovative Technology, vol. 3, no. 6, pages 280–287, 2013.
- [Jubair & Muniyandi 2016] M Jubair et R Muniyandi. *NS2 Simulator to Evaluate the Effective of Nodes Number and Simulation Time on the*

- Reactive Routing Protocols in MANET*. International Journal of Applied Engineering Research, vol. 11, no. 23, pages 11394–11399, 2016.
- [Kacimi 2009] Rahim Kacimi. *Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil*. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [Kaushik & Goyal 2013] Gaurav Kaushik et Saumya Goyal. *An Clustering based AODV approach for MANET*. In Proc. of Int. Conf. on Emerging Trends in Engineering and Technology, pages 901–904, 2013.
- [Khurana & Kumar 2017] Sapna Khurana et Suresh Kumar. *A Study of Congestion Control in MANET*. International Journal of Food Science & Technology, vol. 4, no. 5, pages 94–98, 2017.
- [Koubâa & Song 2002] Anis Koubâa et Ye-Qiong Song. *Evaluation de performances d'Ethernet commuté pour des applications temps réel*. In Proc. RTS'2002, 2002.
- [Labraoui 2012] Nabila Labraoui. *La sécurité dans les réseaux sans fil ad hoc*. Doctorat Spécialité : "Informatique", A L'université de TLEMCEM Faculté des sciences, 2012.
- [Lin et al. 2018] Chi-Han Lin, Yi-Ting Chen, Kate Ching-Ju Lin et Wen-Tsuen Chen. *FDoF : Enhancing channel utilization for 802.11 ac*. IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 26, no. 1, pages 465–477, 2018.
- [Mallapur 2010] Sujata Mallapur. *Predictive Preemptive Ad Hoc on-Demand Multipath Distance Vector Routing Protocol*. Int. Journal of Computer Science & Emerging Technologies (IJCSET), vol. 1, no. 2, pages 155–160, 2010.
- [Maloum & Bouallouche 2013] Farès Maloum et Louiza Bouallouche. *La norme IEEE 802.11 ac pou : les réseaux WLANs très haut débit Présentation et évaluation des performances*. Thèse de Doctorat, Université abderrahmane mira béjaia, 2013.
- [Mansouri 2007] Nadia Mansouri. *Protocole de routage multichemin avec équilibrage de charge dans les réseaux mobiles Ad Hoc*. Projet fin d'études, Ecole supérieure des communications de Tunis, 2007.
- [Marina & Das 2006] Mahesh K Marina et Samir R Das. *Ad hoc on-demand multipath distance vector routing*. Wireless communications and mobile computing, vol. 6, no. 7, pages 969–988, 2006.
- [Meraihi 2005] Rabah Meraihi. *Quality of service support and topology control in mobile ad hoc networks*. Thèse de Doctorat, Télécom ParisTech, 2005.
- [Miller & Bisdikian 2001] Brent A Miller et Chatschik Bisdikian. *Bluetooth revealed : the insider's guide to an open specification for global wireless communication*. Prentice Hall PTR, 2001.

- [Mittal & Kaur 2009] Shaily Mittal et Prabhjot Kaur. *Performance Comparison of AODV, DSR and ZRP Routing Protocols in MANET's*. In 2009 international conference on advances in computing, control, and telecommunication technologies, pages 165–168. IEEE, 2009.
- [Mohapatra & Kanungo 2012] Selli Mohapatra et Priyadarshi Kanungo. *Performance analysis of AODV, DSR, OLSR and DSDV routing protocols using NS2 Simulator*. *Procedia Engineering*, vol. 30, pages 69–76, 2012.
- [Mokrenko 2015] Olesia Mokrenko. *Gestion de l'énergie dans un réseau de capteurs au niveau application*. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2015.
- [Monika et al. 2020] P Monika, P Venkateswara Rao, BC Premkumar et Pradeep Kumar Mallick. *Implementing and Evaluating the Performance Metrics Using Energy Consumption Protocols in MANETs Using Multipath Routing-Fitness Function*. In *Cognitive Informatics and Soft Computing*, pages 281–294. Springer, 2020.
- [Mounagurusamy 2016] Eswaramurthy-Karthikeyan Mounagurusamy Kokilamani. *A Novel Load Balancing Scheme for Multipath Routing Protocol in MANET*. *Journal of computing and information technology*, vol. 24, no. 3, pages 209–220, 2016.
- [Naimi 2015] Sabrine Naimi. *Gestion de la mobilité dans les réseaux Ad Hoc par anticipation des métriques de routage*. Thèse de Doctorat, ÉCOLE DOCTORALE STITS, 2015.
- [Naseem & Kumar 2015] Mohd Naseem et Chiranjeev Kumar. *Congestion-aware Fibonacci sequence based multipath load balancing routing protocol for MANETs*. *Wireless Personal Communications*, vol. 84, no. 4, pages 2955–2974, 2015.
- [Naseem & Kumar 2017] Mohd Naseem et Chiranjeev Kumar. *QSLB : queue size based single path load balancing routing protocol for MANETs*. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, vol. 24, no. 1-2, pages 90–100, 2017.
- [Nayak & Vathasavai 2016] Padmalaya Nayak et Bhavani Vathasavai. *Impact of random mobility models for reactive routing protocols over MANET*. *International Journal of Simulation-Systems, Science & Technology*, vol. 17, no. 34, pages 112–115, 2016.
- [Nguyen et al. 2011] Lan Tien Nguyen, Razvan Beuran et Yoichi Shinoda. *An interference and load aware routing metric for Wireless Mesh Networks*. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, vol. 7, no. 1, page 25, 2011.
- [Nojima et al. 2012] Daisuke Nojima, Leonardo Lanante, Yuhei Nagao, Masayuki Kurosaki et Hiroshi Ochi. *Performance evaluation for multi-user MIMO IEEE 802.11 ac wireless LAN system*. In 2012 14th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), pages 804–808, 2012.

- [Obwang 2010] Patrick Sondi Obwang. *Le Routage à Qualité de Service dans les Réseaux Mobiles Ad Hoc*. Thèse de Doctorat, UNIVERSITÉ DE VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS, 2010.
- [Omar 2015] Smail Omar. *Routage multipath dans les réseaux ad hoc*. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie D'Oran Mohamed Boudiaf, 2015.
- [Patel & Kamboj 2020] Roshani S Patel et Pariza Kamboj. *An Efficient Delay-Based Load Balancing using AOMDV in MANET*. In Proceedings of First International Conference on Computing, Communications, and Cyber-Security (IC4S 2019), pages 81–94. Springer, 2020.
- [Pati et al. 2011] Annapurna P Pati, K Rajani Kanth, Bathey Sharanya, MP Dinesh Kumar et J Malavika. *Design of an energy efficient routing protocol for MANETs based on AODV*. International Journal Of Computer Science Issues (IJCSI), vol. 8, no. 4, pages 215–220, 2011.
- [Patil et al. 2014] Annapurna P Patil, B Varsha Chandan, S Aparna, R Greeshma et HP Akshatha. *An improved energy efficient AODV routing protocol for MANETs*. In 2014 Eleventh International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), pages 1–5. IEEE, 2014.
- [Periyasamy & Karthikeyan 2017] P Periyasamy et E Karthikeyan. *Link reliable energy efficient AOMDV routing protocol for mobile ad hoc networks*. International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, vol. 26, no. 2, pages 92–103, 2017.
- [Perkins et al. 2001] Charles E Perkins et al. *Ad hoc networking*, volume 1. Addison-wesley Reading, 2001.
- [Pham & Perreau 2003] Peter P Pham et Sylvie Perreau. *Performance analysis of reactive shortest path and multipath routing mechanism with load balance*. In IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No. 03CH37428), volume 1, pages 251–259. IEEE, 2003.
- [Pujolle 2014] Guy Pujolle. *Les réseaux*. Editions Eyrolles, 2014.
- [Rahman & Zukarnain 2009] Abdul Hadi Abd Rahman et Zuriati Ahmad Zukarnain. *Performance comparison of AODV, DSDV and I-DSDV routing protocols in mobile ad hoc networks*. European Journal of Scientific Research, vol. 31, no. 4, pages 566–576, 2009.
- [Rajesh & Gnanasekar 2016] M Rajesh et JM Gnanasekar. *Congestion control using aodv protocol scheme for wireless ad-hoc network*. Advances in Computer Science and Engineering, vol. 16, no. 1/2, page 19, 2016.
- [Rakesh et al. 2014] N Rakesh, B Uma Maheswari et SK Srivatsa. *Performance analysis of propagation models in different terrain conditions for IEEE standard 802.16 e WiMAX*. In 2014 International Conference on Communication and Signal Processing, pages 142–146, 2014.

- [Ramos *et al.* 2014] Heitor S Ramos, Alejandro C Frery, Azzedine Boukerche, Eduardo MR Oliveira et Antonio AF Loureiro. *Topology-related metrics and applications for the design and operation of wireless sensor networks*. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), vol. 10, no. 3, page 53, 2014.
- [Ranjan & Ahirwar 2011] Prabhakar Ranjan et Kamal Kant Ahirwar. *Comparative study of vanet and manet routing protocols*. In Proc. of the International Conference on Advanced Computing and Communication Technologies (ACCT 2011), pages 517–523, 2011.
- [Rath *et al.* 2017] Mamata Rath, Umesh Prasad Rout, Niharika Pujari, Surendra Kumar Nanda et Sambhu Prasad Panda. *Congestion control mechanism for real time traffic in mobile adhoc networks*. In Computer Communication, Networking and Internet Security, pages 149–156. Springer, 2017.
- [Ravindranath *et al.* 2016] NS Ravindranath, Inder Singh, Ajay Prasad et VS Rao. *Performance Evaluation of IEEE 802.11 ac and 802.11 n using NS3*. Indian Journal of Science and Technology, vol. 9, no. 26, 2016.
- [Remaker 2015] Phillip A Remaker. *Wireless access point MAC address privacy*, 2015.
- [Rieck & Laskov 2006] Konrad Rieck et Pavel Laskov. *Detecting unknown network attacks using language models*. In International Conference on Detection of Intrusions and Malware, and Vulnerability Assessment, pages 74–90, 2006.
- [Royer *et al.* 2001] Elizabeth M Royer, P Michael Melliar-Smith et Louise E Moser. *An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks*. In ICC 2001. IEEE International Conference on Communications. Conference Record (Cat. No. 01CH37240), volume 3, pages 857–861. IEEE, 2001.
- [Ryan 2013] Mike Ryan. *Bluetooth : With low energy comes low security*. In Presented as part of the 7th {USENIX} Workshop on Offensive Technologies, 2013.
- [SADDIKI 2019] Kamel SADDIKI. *Denial of services attack in wireless networks*. Thèse de Doctorat, Télécom ParisTech, 2019.
- [Sambasivam *et al.* 2004] Perumal Sambasivam, Ashwin Murthy et Elizabeth M Belding-Royer. *Dynamically adaptive multipath routing based on AODV*. proc MedHocNet, 2004.
- [Santhi & Sudha Sadasivam 2014] S Santhi et G Sudha Sadasivam. *Enhanced AOMDV for energy conservation in hybrid ad hoc networks*. International Journal of Information and Communication Technology, vol. 6, no. 2, pages 122–141, 2014.
- [Sendra Compte *et al.* 2011] Sandra Sendra Compte, Jaime Lloret, Miguel García Pineda et José Francisco Toledo Alarcón. *Power saving and energy optimization techniques for Wireless Sensor Networks*. Journal of communications, vol. 6, no. 6, pages 439–459, 2011.

- [Shang *et al.* 2016] Wentao Shang, Yingdi Yu, Ralph Droms et Lixia Zhang. *Challenges in IoT networking via TCP/IP architecture*. Technical Report NDN-0038. NDN Project, 2016.
- [Sharma *et al.* 2016] Neelam Sharma, Avadhesh Gupta, Shyam Singh Rajput et Virendra Kumar Yadav. *Congestion control techniques in MANET : a survey*. In 2016 Second International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology (CICT), pages 280–282. IEEE, 2016.
- [Shawara *et al.* 2017] Mahmoud M Shawara, Amany M Sarhan et Nawal A Elfishawy. *Energy aware ad-hoc on demand multipath distance vector (EA-AOMDV)*. In 2017 13th International Computer Engineering Conference (ICENCO), pages 317–322, 2017.
- [Shivahare *et al.* 2012] Basu Dev Shivahare, Charu Wahi et Shalini Shivhare. *Comparison of proactive and reactive routing protocols in mobile adhoc network using routing protocol property*. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, vol. 2, no. 3, pages 356–359, 2012.
- [Singla & Singh 2018] Mahak Singla et Paramjeet Singh. *Enhancing QoS In MANETs Using Preemptive AOMDV*. Global Journal of Computer Science and Technology, vol. 17, no. 5, 2018.
- [Sirajuddin *et al.* 2016] MD Sirajuddin, Ch Rupa et A Prasad. *Advanced congestion control techniques for MANET*. In Information Systems Design and Intelligent Applications, pages 271–279. Springer, 2016.
- [Sivaraman 2016] Karthikeyan Sivaraman. *EE-BWA-AOMDV : Energy Efficient and Bandwidth Aware On-demand Multipath Routing protocol for Mobile Ad hoc Networks*. International Journal of Computer Application, vol. 6, no. 2, pages 2250–1797, 2016.
- [Smith *et al.* 2016] KA Smith, SJ Galloway, A Emhemed et GM Burt. *Feasibility of Direct Current street lighting & integrated electric vehicle charging points*. In 6th Hybrid and Electric Vehicles Conference (HEVC 2016), 2016.
- [Souihli *et al.* 2009] Oussama Souihli, Mounir Frikha et Mahmoud Ben Hamouda. *Load-balancing in MANET shortest-path routing protocols*. Ad Hoc Networks, vol. 7, no. 2, pages 431–442, 2009.
- [Sowmya *et al.* 2018] MC Sowmya, Shish Ahmad et Preetam Suman. *congestion avoidance and control mechanisms for manet using aodv protocol : a survey*. International Journal of Advanced Research in Computer Science, vol. 9, no. Special Issue 2, page 19, 2018.
- [Taha *et al.* 2017] Aqeel Taha, Raed Alsaqour, Mueen Uddin, Maha Abdelhaq et Tanzila Saba. *Energy efficient multipath routing protocol for mobile ad-hoc network using the fitness function*. IEEE access, vol. 5, pages 10369–10381, 2017.

- [Talbi 2009] Hamza Talbi. Architecture et politique de robustesse par multihoming dans les réseaux ad hoc et les réseaux satellitaires. Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, 2009.
- [Thangaraj & Kumari 2016] Jaisingh Thangaraj et Shilpee Kumari. *Evaluating feasibility of using Wireless Sensor Network in agricultural land through simulation of DSR, AOMDV, AODV, DSDV protocol*. In 2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), pages 301–305. IEEE, 2016.
- [Thrimoorthy & Anuradha 2016] N Thrimoorthy et T Anuradha. *Congestion Detection Approaches In Wireless Sensor Networks :-A Comparative Study*. International Journal of Engineering Research and Development, vol. 12, no. 3, pages 59–63, 2016.
- [Trivedi & Sharma 2016] Munesh Chandra Trivedi et Anupam Kumar Sharma. *QoS Improvement in MANET using particle swarm optimization algorithm*. In Proceedings of the International Congress on Information and Communication Technology, pages 181–189. Springer, 2016.
- [Vadivel & Bhaskaran 2017] R Vadivel et V Murali Bhaskaran. *Adaptive reliable and congestion control routing protocol for MANET*. Wireless Networks, vol. 23, no. 3, pages 819–829, 2017.
- [Van Den Bossche 2007] Adrien Van Den Bossche. *Proposition d'une nouvelle méthode d'accès déterministe pour un réseau personnel sans fil à fortes contraintes temporelles*. Thèse de Doctorat, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II, 2007.
- [Van der Schaar & Chou 2011] Mihaela Van der Schaar et Philip A Chou. *Multimedia over ip and wireless networks : compression, networking, and systems*. Elsevier, 2011.
- [Watteyne *et al.* 2007] Thomas Watteyne, Isabelle Augé-Blum, Mischa Dohler, Dominique Barthel et France Meylan. *Probabilité de Collision lors du Choix du Noeud Relais sans Connaissance du Voisinage dans un Réseau de Capteurs*. In IRAMUS Workshop, Poster Session, Val Thorens, France, 2007.
- [Xuan 2007] A Xuan Y. *Defence system on DDos attack in Ad Hoc network*. Thèse de Doctorat, Thesis Auburn University Alabama, 2007.
- [Zarei *et al.* 2010] Bager Zarei, Mohammad Zeynali et Vahid Majid Nezhad. *Novel cluster based routing protocol in wireless sensor networks*. International Journal of Computer Science Issues (IJCSI), vol. 7, no. 4, page 32, 2010.
- [Zhang *et al.* 2020] De-Gan Zhang, Lu Chen, Jie Zhang, Jie Chen, Ting Zhang, Ya-Meng Tang et Jian-Ning Qiu. *A Multi-Path Routing Protocol Based on Link Lifetime and Energy Consumption Prediction for Mobile Edge Computing*. IEEE Access, vol. 8, pages 69058–69071, 2020.

- [Zier *et al.* 2018] Abdelhak. Zier, Abdelhafid. Abouaissa et Pascal. Lorenz. *E-RPL : A Routing Protocol for IoT Networks*. In 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), pages 1–6, Dec 2018.

NOTATIONS

MANET	Mobil Ad Hoc Network
AOMDV	Ad Hoc On-demand, multipath distance vector routing protocol
AODV	Ad-hoc On Demande Distance Vector
IEEE	Institue of Electricol and Electronicol Engenies
WPAN	Wireless Personal Area Networks
WLAN	Wireless Local Area Networks
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WMAN	Wireless Metropolitan Area Networks
WWAN	Wireless Wide Area Network
GSM	Groupe Spécial Mobile
GPRS	General Packet Radio Service
EDGE	Enhanced Data GSM Environment
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
LTE	Long Term Evolution
GPS	Global Position System
BSS	Basic Service Set
ESS	Extended Service Set
AP	Access Point
MAC	Medium Access Control
BTS	Base Tranceiver System
PDA	Personal Digital Assistant.
OSI	Open System Interconnexion

ISO	International Organization for Standardization
VANET	Vihicular Ad hoc NETwork
CPU	Central Processing Unit
FSR	Fisheye State Routing
DSDV	Destination Sequence Distance Vector
ZRP	Zone Routing Protocol
DSR	Dynamic Source Routing
CBRP	Cluster Based Routing Protocol
RREQ	Route Requeste
RREP	Route Reply
RERR	Route Error
OLSR	Optimized Link State Protocol
MPR	MultiPoint Rely
TTL	Time To Live
IETF	Internet engineering Task Force
ITU	International Télécommunications Union
RPL	Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks
NS	Netowrks Simulator
CBR	Constant Bit Rate
TCP	Transfer Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
OTCL	Object Tool Command Language
TCL	Tool Command Language
FTP	File Transfer Protocol
NAM	Network Animator
PDR	packet delivery ratio
QoS	Quality Of Service
HTTP	Hypertext Transfer Protocol

SMTP	Simple Mail Transfer Protocol
NTP	Network Time Protocol
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
ARP	Address Resolution Protocol
ICMP	Internet Control Message Protocol
IGMP	Internet Group Management Protocol
FHSS	Frequency-hopping spread spectrum
DSSS	Direct-sequence spread spectrum
IR	Infrared

الملخص

الشبكات الانية هي شبكات متنقلة قادرة على ربط الإتصالات اللاسلكية بدون الحاجة لأي بنية تحتية موجودة مسبقاً. تتميز الشبكات الانية ببيئتها الديناميكية ، هذه الميزة تجعل توجيه الحزم مشكلة في حالة عدم استقرار العناصر التي تشكل الاتصالات غير المباشرة. للتغلب على هذه الصعوبات ، ظهرت أنواع جديدة من بروتوكولات التوجيه ، بما فيك بروتوكولات التوجيه متعددة المسارات. التوجيه متعدد المسارات يعد حلاً فعالاً في الشبكات اللاسلكية متعددة القفزات ذات إمكانية تنقل عالية و / أو حمولة عالية ، مما يجعل من الممكن حل مشكل تعطل المسارات وتوزيع حركة مرور الحزم على عدة مسارات لتحسين أداء الاتصالات. الهدف الرئيسي من هذه الرسالة هو دراسة تقنيات توجيه المسارات في سياق لاسلكي من أجل الحصول على أداء أفضل.

Résumé

Les réseaux MANET sont des réseaux mobiles capables de fonctionner sans fil ni infrastructure préexistante. Les réseaux MANET sont caractérisés par leurs environnements dynamiques, cette particularité rend le routage problématique en cas d'instabilité des éléments qui composent les communications non directes. Pour surmonter ces difficultés, de nouveaux types de protocoles de routage sont apparus, dont les protocoles de routage multi chemins. Le routage multi chemin semble être une solution efficace dans les réseaux sans fil en permettant de se prémunir contre le problème de rupture de liens et de distribuer le trafic sur plusieurs chemins, ceci permet d'améliorer les performances des communications. L'objectif principal de cette thèse est d'étudier les techniques de routage multi-chemins dans un contexte sans fil en vue d'obtenir de meilleures performances.

Abstract

MANET networks are mobile networks capable of wireless communications without any pre-existing infrastructure. MANET networks are characterized by their dynamic environments, this feature makes routing problematic in case of instability of the elements that make up non-direct communications. To overcome these difficulties, new types of routing protocols have emerged, including multi-path routing protocols. Multi-path routing seems to be an effective solution in wireless networks by providing solutions to link failure with the distribution of the traffic on multiple paths, this improves the performance of communications. The main objective of this thesis is to study MC routing techniques in a wireless context in order to obtain better performance.