



Université Sidi Mohamed Ben Abdellah
Faculté des Sciences et Techniques de Fès

PROJET DE FIN D'ETUDE
MASTER SCIENCES ET TECHNIQUES
SYSTEMES INTELLIGENTS ET RESEAU

**Evaluation des performances des protocoles de
Routage GPSR et AODV dans Les Réseaux VANETs**



Lieu de stage : **laboratoire Systèmes Intelligents et Applications**

Réalisé par : **BOUZITE Bilal**
Soutenu le **14 juin 2017**

Encadré par :

Mr. Boushaba Abdelali
Mr. Zahi Azzedine

Devant le jury composé de :

Pr. Zahi Azzedine
Pr. Boushaba Abdelali
Pr. Mrabti Fatiha
Pr. Abbad Khalid
Pr. Najah Said

Année Universitaire **2016 - 2017**

Remerciement :

Avant tout, je tiens à remercier Allah de m'avoir donné la volonté pour réaliser ce travail.

Ce travail est l'aboutissement d'un long cheminement au cours duquel j'ai bénéficié de l'encadrement, des encouragements et du soutien de plusieurs personnes, à qui je tiens à dire profondément et sincèrement merci.

Je ne peux qu'être infiniment reconnaissant envers mes parents pour leur soutien indescriptible, leur patience, leur confiance, leurs sacrifices. Je leur dédie avec plaisir ce travail ainsi que à ma sœur et toute ma grande famille.

*À cet égard, je remercie tout particulièrement le **professeur ABDELALI BOUSHABA** pour tout ce qu'il a fait pour m'encadrer tout au long de ce stage. Il a dirigé et accompagné de très près, à vrai dire pas à pas, jour par jour, et avec beaucoup de patience, la longue et lente rédaction de ce travail. Et je veux aussi le remercier pour son assistance technique, sa disponibilité, ses remarques, ses conseils prodigués, sa gentillesse et son encouragement qui m'ont été adressés durant ce travail. Je lui en suis très reconnaissant.*

*Je formule de sincères remerciements au **professeur ZAHY AZZEDINE**, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail. Durant toute la période de mes études, j'ai été extrêmement sensible à ses qualités humaines d'écoute et de compréhension, sa droiture et son sérieux. Ainsi, que ses conseils avisés et sa disponibilité. Je suis très honoré qu'il ait accepté de me confier ces travaux.*

*J'aimerais remercier les membres de jury, les professeurs : **Abbad Khalid, Mrabti Fatiha** et **Najah Said**. D'avoir pris le temps d'évaluer et de juger mon travail.*

Pour son aide et soutien. Je vous prie, Mlle Safae Smiri - Doctorante au laboratoire SIA - de trouver dans ce travail toute la reconnaissance que je vous témoigne.

Finalement, je tiens à remercier tous mes amis du Master Systèmes intelligents et Réseaux, et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Résumé

Actuellement, la voiture est devenue le moyen de transport le plus utilisé, mais malheureusement, il est accompagné d'un certain nombre de problèmes (accidents, pollution, embouteillages, etc.), qui vont aller en s'aggravant avec l'augmentation prévue du nombre de voitures particulières, malgré les efforts très importants mis en œuvre pour tenter de les réduire, le nombre de morts sur les routes demeure très important.

Les réseaux sans fil de véhicules, appelés VANET, qui sont considérés comme un cas particulier des MANETs et qui sont constitués de plusieurs véhicules mobiles sans infrastructure préexistante pour communiquer, font aujourd'hui l'objet d'une attention accrue de la part des constructeurs et des chercheurs, afin d'offrir aux passagers des véhicules des services de sécurité routière (alerte accidents, assistance à la conduite, ...) et des services de confort (accès à Internet, jeux interactifs, partage de données multimédia, ...). Les protocoles de routage des MANETs peuvent également être applicables dans les VANETs. Cependant, la mobilité élevée des véhicules apporte de nouveaux défis à la communication de données dans les VANETs. Cela est dû à leurs grandes vitesses ainsi que leurs topologies hautement dynamiques.

Dans ce travail, nous avons étudié et évalué les performances et l'applicabilité des protocoles de routage Ad hoc que ça soit topologique ou géographique, à savoir, AODV et GPSR avec le mode de communication V2V (Véhicule à Véhicule), dans différents scénarios créés en utilisant, le générateur de mobilité (VANETMOBISIM) et le simulateur du réseau (NS2). Les résultats présentés sont encourageants et montrent une surperformance de GPSR.

Mots clés : MANET, VANET, Protocole de routage, AODV, GPSR, V2V, V2I, VANETMOBISIM, NS2.

Abstract

Currently, the car has become the most used means of transport, but unfortunately it is accompanied by a number of problems (accidents, pollution, traffic congestion, etc.), which will worsen with the expected increase Of the number of passenger cars, despite the very significant efforts made to try to reduce them, the number of road deaths remains very high.

Vehicle wireless networks, known as VANETs, which are considered a special case of MANETs and which consist of several mobile vehicles without pre-existing infrastructure for communication, are now receiving increased attention from manufacturers and Researchers, in order to provide passengers with road safety services (accident alert, driving assistance, etc.) and comfort services (Internet access, interactive games, multimedia data sharing, etc.). The routing protocols of MANETs can also be applied in VANETs. However, high vehicle mobility brings new challenges to data communication in VANETs. This is due to their high speeds as well as their highly dynamic topologies.

In this work, we studied and evaluated the performance and applicability of Ad-hoc routing protocols, whether topological or geographic, namely AODV and GPSR with the mode of communication V2V (Vehicle to Vehicle), in various scenarios created using the mobility generator (VANETMOBISIM) and the network simulator (NS2). The results presented are encouraging and show an outperformance of GPSR.

Keywords: MANET, VANET, Routing Protocols, AODV, GPSR, V2V, V2I, VANETMOBISIM, NS2.

Table des matières

Remerciement :	i
Résumé	ii
Abstract	ii
Liste des Tableaux	v
Liste de figures.....	vi
Introduction générale :	1
Chapitre I : Les Réseaux VANETs	3
1. Introduction.....	3
2. Les réseaux sans fil	3
3. Réseaux mobiles ad hoc «MANET»	3
a. Définition.....	3
b. Caractéristiques des réseaux Ad Hoc.....	4
c. Applications des réseaux mobile ad hoc.....	5
4. Les réseaux VANETs.....	7
5. Architecture des réseaux VANET.....	8
a. Communication véhicule-à-véhicule (V2V).....	8
b. Communication véhicules à infrastructure (V2I)	8
c. Communication hybride.....	9
6. Les caractéristiques des VANETs	9
7. Norme et standardisation dans les VANETs	10
8. Les applications des VANETs	12
9. Conclusion	14
Chapitre II : Le Routage dans les réseaux Ad hoc.....	15
1. Définition	15
2. Le routage dans les réseaux mobiles ad hoc «MANET».....	15
a. Difficulté de routage dans les réseaux mobiles ad-hoc	15
b. Classifications des protocoles de routage dans les réseaux ad-hoc	16
A. Les protocoles de routage topologiques :.....	16
B. Les protocoles de routage géographiques :.....	20
3. Le protocole AODV	24
4. Le protocole GPSR	26
a. Greedy Forwarding :	27
b. Perimeter Forwarding :	28

5.	Les travaux antérieurs	30
a.	Comparaison entre les protocoles topologiques (MANET):	30
b.	Comparaison entre les protocoles topologiques (VANET) :	31
c.	Comparaison entre les protocoles topologiques et les protocoles géographiques (VANET) :	32
6.	Conclusion	33
Chapitre III : La simulation des réseaux VANETs		34
1.	Introduction.....	34
2.	La simulation	34
3.	Les outils de simulations	35
4.	Simulateur NS2 :	36
5.	Générateurs de mobilité pour les VANETs	38
6.	Modèles de mobilité dans l'environnement VANET	39
7.	Processus de simulation	40
8.	Conclusion	42
Chapitre IV : Evaluation des performances des protocoles de routage dans un environnement VANET		43
1.	Introduction.....	43
2.	Les scénarios de simulation.....	43
3.	Les modèles de simulation	44
a.	Modèle de trafic.....	44
b.	Modèle de mobilité.....	44
4.	Caractéristiques physiques :	48
5.	Critères de performance :	49
6.	Résultats des simulations	50
a.	Scénario urbain :	50
b.	Scénario centre-ville :	56
7.	Conclusion	62
Conclusion et perspectives.....		63
Références		64

Liste des Tableaux

Tableau 1: Comparaison des simulateurs réseau	36
Tableau 2: comparaison entre les générateurs de mobilité [74]	39
Tableau 3 : Paramètres du modèle de trafic	44
Tableau 4 : Paramètres de l'environnement urbain	45
Tableau 5: Paramètres de l'environnement centre-ville	46
Tableau 6 : Paramètres microscopiques	47
Tableau 7: exemple de modèle de mobilité macroscopique	48
Tableau 8 : Paramètres de la couche liaison de données et physique	48
Tableau 9 : Interprétation des résultats du scénario urbain	55
Tableau 10: Interprétation des résultats du scénario centre-ville	61

Liste de figures

Figure 1 : Exemple de changement de la topologie d'un réseau mobile ad hoc	4
Figure 2: Réseau mobile ad-hoc	4
Figure 3: Exemples d'applications MANET[9]	6
Figure 4:Un exemple des réseaux VANETS [11]	8
Figure 5: Architecture véhicule à véhicule [12].....	8
Figure 6: Architecture véhicule à infrastructure [12].....	9
Figure 7: Architecture hybride [12]	9
Figure 8: la pile protocolaire WAVE	12
Figure 9: prise en compte de trafic	12
Figure 10: prise en compte d'obstacles et des accidents.....	12
Figure 11: assistance au niveau des intersections[22]	13
Figure 12: Parking intelligent [22]	13
Figure 13 : la messagerie inter-véhicule et l'accès à internet.....	14
Figure 14: Un simple réseau ad hoc constitué de trois unités mobiles	16
Figure 15: (a) Exemple de RZ et EZ dans l'espace du réseau (network space, NS), (b) sans l'utilisation du RZ et E [43]	22
Figure 16: Un exemple d'expected zone dans DREAM [43].....	23
Figure 17: Classification des protocoles de routage selon leurs modes de fonctionnement	23
Figure 18: Méthode de construction d'une route.....	25
Figure 19: Principe de détection d'un lien défaillant	26
Figure 20: Technique du Greedy Forwarding.....	27
Figure 21: scénario d'un maximum local.....	28
Figure 22: Exemple d'un graphe non planaire [43]	29
Figure 23: Mode Perimeter Forwarding et la règle de la main droite	30
Figure 24: architecture NS2.....	37
Figure 25: Système de simulation de VANET (VANETMOBISIM et NS2)[74]	38
Figure 26: le Processus de simulation	41
Figure 27: Environnement Urbain	45
Figure 28: environnement centre-ville.....	46
Figure 29: Taux de paquets délivrés en fonction de la charge CBR	50
Figure 30 : Délai en fonction de la charge CBR	51
Figure 31: Gigue en fonction de la charge CBR	51
Figure 32: cout de routage en fonction de la charge CBR.....	52
Figure 33 : Efficacité en fonction de la charge CBR.....	52
Figure 34 : Taux de paquets délivrés en fonction de la densité.....	53
Figure 35 :Délai en fonction de la densité.....	53
Figure 36: Gigue en fonction de la densité	54
Figure 37 : Cout de routage en fonction de la densité	54
Figure 38: Efficacité en fonction de la densité	54
Figure 39: Taux de paquets délivrés en fonction de la charge CBR	56
Figure 40: Délai en fonction de la charge CBR	57
Figure 41: Gigue en fonction de la charge CBR	57
Figure 42 : Cout de routage en fonction de la charge CBR	58

Figure 43: Efficacité en fonction de la charge CBR.....	58
Figure 44: Taux de paquets délivrés en fonction de la densité.....	59
Figure 45: Délai en fonction de la densité.....	59
Figure 46: Gigue en fonction de la densité	60
Figure 47: Cout de routage en fonction de la densité.....	60
Figure 48: Efficacité en fonction de la densité	61

Introduction générale :

Malgré l'amélioration de la qualité des véhicules et des infrastructures, les accidents et la mortalité routière restent des sujets de préoccupation importants. Les autorités s'impliquent fortement et en particulier financièrement dans toutes les solutions qui pourront améliorer la sécurité routière. Les progrès des communications sans fil offrent un ensemble de pistes intéressantes pour faciliter la mise en œuvre de nouvelles fonctionnalités liées à ce contexte. Elles s'inscrivent dans un cadre plus large connu sous le nom de « Systèmes de Transport Intelligents (ITS) »[1].

Ces communications peuvent s'adosser à une infrastructure de télécommunication existante ou bien se dérouler directement entre les véhicules. Outre les applications de sécurité que nous venons de mentionner, elles permettent également de déployer des applications dites de confort qui peuvent être liées au contexte véhiculaire (informations routières, embouteillages, places de parking) ou non (accès internet, jeux en réseau, ...).

La difficulté, aussi bien économique que logistique, de la mise en œuvre réelle des réseaux véhiculaires fait de la simulation le moyen le plus largement utilisé pour la conception et l'évaluation des solutions proposées. Cependant, la validité des résultats de simulation dépend fortement de la capacité des modèles utilisés à reproduire le plus fidèlement possible les situations réelles. Les ressources de calcul des serveurs d'aujourd'hui permettent de simuler les VANETs, et donc d'évaluer même les protocoles et les architectures les plus exigeantes à toute échelle raisonnable. Le problème se place au niveau du réalisme de la simulation et l'aspect dominant à aborder est celui de la mobilité. D'où l'utilisation d'un modèle réaliste pour la mobilité des véhicules conduirait à des résultats de simulation fiables. Récemment, plusieurs protocoles de routage dans les VANETs ont été développés pour maintenir les routes entre les nœuds du réseau, une conception de routage efficace et fiable dans ce type de réseau est nécessaire pour s'adapter aux conditions de changement du réseau tels que : la mobilité des nœuds, la taille du réseau, la densité du trafic, etc. Parallèlement, le protocole de routage doit fournir différents niveaux de qualité de service pour différents types d'applications. Les protocoles de routage existants dans la littérature, destinés à acheminer les informations entre les nœuds d'un réseau mobile *ad hoc* peuvent être classés en deux grandes familles selon leurs modes de fonctionnement. La première famille regroupe les protocoles qui se basent sur la topologie du réseau. Plus précisément, ces protocoles utilisent les informations sur les liens du réseau pour la transmission des paquets. Ils peuvent être classés en quatre catégories : les protocoles proactifs, les protocoles réactifs, les protocoles hybrides, et les protocoles hiérarchiques. La seconde famille se compose des protocoles géographiques qui se base sur le positionnement, la localisation et la production des informations géographiques liées aux nœuds dans un réseau mobile.

Nous nous sommes intéressés dans ce travail au protocole AODV (**Ad hoc On demand Distance Vector**)[2] et GPSR (**Greedy Perimeter Stateless Routing**)[3]. En effet, AODV est un protocole de routage Ad hoc topologique réactif à vecteur de distance. Il adopte à la fois une approche de découverte de route modifiée du protocole DSR[4], [5] et le numéro de séquence de la source du protocole DSDV. Le protocole de routage géographique GPSR utilise les coordonnées des nœuds pour le routage et il transmet un paquet saut par saut en se basant sur des informations locales.

L'objectif de ce travail de Master consiste à étudier et évaluer les performances de ces deux protocoles de routage, à savoir, GPSR et AODV dans les environnements VANETs, et ce par l'analyse des paramètres de performances (Taux de paquets délivrés(PDR), délai, gigue, coût de

routage et l'efficacité), à l'aide du simulateur réseau NS2 et l'outil de génération de mobilité VANETMOBISIM.

Ce stage est effectué au sein du laboratoire SIA, qui est créé en 2011, ce laboratoire est une unité de Recherche du Centre d'Etudes Doctorales en Sciences et Techniques de l'Ingénieur domicilié à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès et regroupant des laboratoires de recherche tous accrédités par l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah de Fès, et domiciliés à la Facultés des Sciences et Techniques, l'Ecole Supérieure de Technologie, la Faculté Poly disciplinaire de Taza, l'ENS de Fès et la Faculté de médecine et pharmacie de Fès.

Ce mémoire est organisé comme suit, une initiation sur les réseaux ad hoc mobile et véhiculaire dans le chapitre suivant, puis le principe et les différents protocole de routage seront citer dans le chapitre 2, et une description des différents simulateurs réseau et les outils de mobilités seront présenter au niveau du chapitre 3, et à la fin il y aura une évaluation des performances des protocoles GPSR et AODV à l'aide de la simulation dans le dernier chapitre.

Chapitre I : Les Réseaux VANETs

1. Introduction

L'évolution récente des moyens de communication sans fil a permis à des organes de calcul portables de faire partie d'un réseau par le biais d'une interface de communication sans fil. Les environnements mobiles offrent une grande flexibilité d'emploi (critère de mobilité) sans aucune restriction sur la localisation des organes communicants.

Les sections suivantes décrivent respectivement les concepts de base des réseaux sans fil, les réseaux mobiles ad hoc et leurs principales caractéristiques et domaines d'application. Ainsi que les réseaux véhiculaires ad hoc appelés (VANETs) qui sont l'objectif principale de notre travail, et qui sont considérés comme un type particulier du réseau MANET, puis une présentation de leurs architectures et caractéristiques et leurs normes, ainsi que les différents types d'applications liés à la technologie VANET.

2. Les réseaux sans fil

Les réseaux sans fil formés par des appareils, appelés nœuds, qui communiquent entre eux sans passer par une autre infrastructure et sans que ces communications nécessitent une administration centrale [6]. La façon dont sont organisés les différents nœuds et leurs interconnexions est appelée topologie du réseau. Des changements de topologie sont possibles et peuvent être introduits manuellement en modifiant des liens entre des nœuds. Ces derniers doivent communiquer via des ondes radios ce qui pose quelques contraintes supplémentaires. Premièrement, la composition d'un nœud sans fil est différente d'un nœud "classique". Celui-ci est composé d'un émetteur et d'un récepteur sans fil. L'émetteur est caractérisé par une puissance d'émission et le récepteur est caractérisé par une sensibilité de réception. Ensuite, des problèmes peuvent survenir au niveau de la fiabilité des échanges de données. En effet, des interférences peuvent se produire au croisement d'autres ondes.

3. Réseaux mobiles ad hoc «MANET»

a. Définition

Un réseau mobile Ad hoc, appelé généralement MANET (Mobile Adhoc NETwork) peut être défini comme une collection d'entités mobiles interconnectées par une technologie sans fil, formant un réseau temporaire, sans l'aide de toute administration, que ce soit pour sa configuration ou pour sa gestion. Les MANETs sont des réseaux, à peine initialisés, capables en un temps très court de communiquer indépendamment de leur localisation.

Les réseaux mobiles *ad hoc* sont des réseaux entièrement décentralisés et très dynamiques du fait de la mobilité des nœuds, un nœud peut rejoindre ou quitter le réseau fréquemment. Ces nœuds sont donc libres de se déplacer et de s'organiser arbitrairement, impliquant une grande variabilité de la topologie du réseau (voir figure 1)[7]. Cependant, la mobilité des nœuds limite l'applicabilité

des modèles et des systèmes conçus pour les réseaux filaires. Parmi les défis majeurs dans la conception des applications basées sur des systèmes mobiles *ad hoc* figure le routage des informations entre les nœuds. Ces nœuds ou unités mobiles ne peuvent communiquer directement qu'avec les nœuds qui sont immédiatement dans le rayon de leur portée de transmission comme cela est indiqué dans la figure 2. Pour communiquer avec d'autres nœuds hors de cette portée, un ou plusieurs nœuds intermédiaires doivent être utilisés pour acheminer les paquets de la source vers la destination. Le grand nombre des nœuds, la forte mobilité des nœuds, la faible bande passante, et la limitation des batteries des mobiles doivent aussi être pris en compte pendant la conception des protocoles de routage.

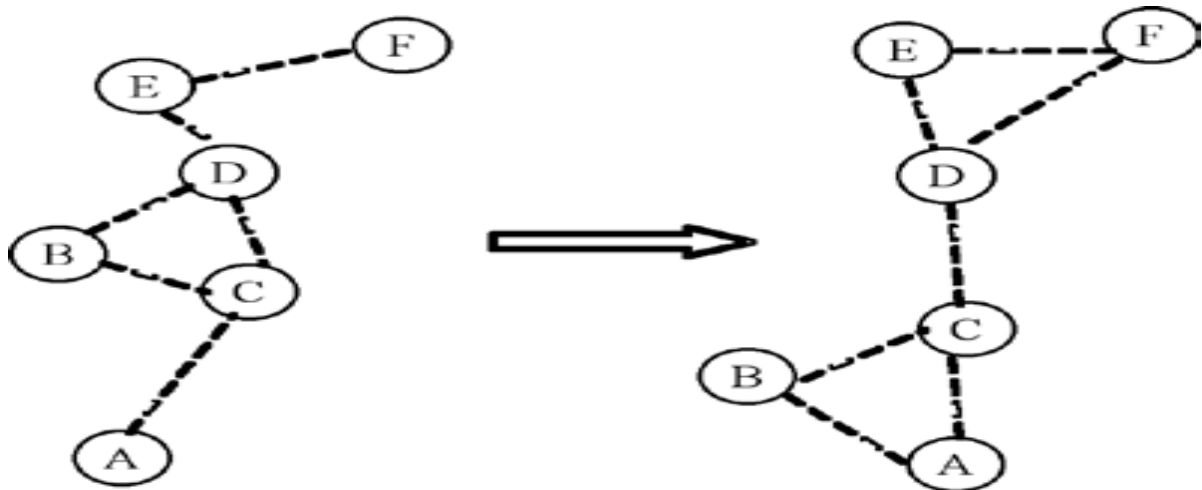


Figure 1 : Exemple de changement de la topologie d'un réseau mobile ad hoc

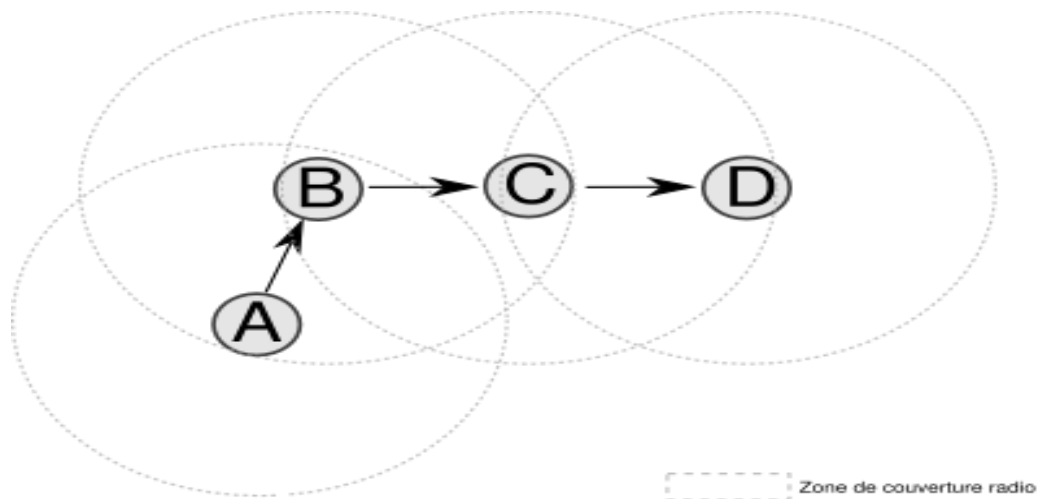


Figure 2: Réseau mobile ad-hoc

b. Caractéristiques des réseaux Ad Hoc

Les réseaux sans fil ad hoc se caractérisent par plusieurs caractéristiques parmi eux :

✚ Absence d'infrastructure :

Les nœuds d'un réseau Ad Hoc travaillent dans un environnement pair à pair totalement distribué, ce qui leur permet de se déplacer librement. Ces nœuds agissent en tant que routeurs pour relayer des communications ou générer leurs propres données.

✚ Routage par relais :

Dans un réseau Ad hoc, un terminal peut communiquer directement avec les terminaux à sa portée (ses voisins). Lorsqu'une machine veut communiquer avec une autre se trouvant hors de sa portée, chaque nœud actif du réseau sert de routeur pour ses voisins.

✚ Topologie dynamique :

Une particularité très importante qui distingue les réseaux mobiles Ad Hoc des réseaux filaires est la mobilité de ses nœuds. Les nœuds sont libres de se déplacer arbitrairement, des routes peuvent se créer et disparaître très souvent, ce qui provoque des changements fréquents dans la topologie du réseau. Ces modifications doivent être prises en compte par le protocole de routage. Cette caractéristique rend la topologie de ce type du réseau sans fil très dynamique.

✚ Contraintes d'énergie :

Les hôtes mobiles sont alimentés par des sources d'énergie autonomes comme les batteries ou les autres sources consommables. Le paramètre d'énergie doit être pris en considération dans tout contrôle fait par le système.

✚ La taille des réseaux ad hoc :

Elle est souvent de petite ou moyenne taille (une centaine de nœuds) ; le réseau est utilisé pour étendre temporairement un réseau filaire, comme pour une conférence ou des situations où le déploiement du réseau fixe ne sont pas appropriés. Cependant, certaines applications des réseaux ad hoc peuvent nécessiter une utilisation allant jusqu'à des dizaines de milliers de nœuds.

✚ Multi-sauts :

Les réseaux Ad Hoc utilisent souvent des sauts multiples pour éviter les obstacles, minimiser la consommation d'énergie ou pour joindre un nœud qui n'est pas dans la portée de communication de l'émetteur.

c. Applications des réseaux mobile ad hoc

D'une façon générale, les MANETs[8] sont utilisés dans toutes applications où le déploiement d'une infrastructure réseau filaire est trop contraignant. Les applications dédiées aux MANET couvrent un très large spectre. La figure 3 présente quelques exemples d'applications MANET. Ils sont caractérisés par l'absence d'une infrastructure préexistante. Une liste des applications est donnée ci-dessous :

✚ Les environnements militaires :

Les champs de bataille demeurent les toutes premières applications des réseaux ad hoc. Les nœuds mobiles de ce type de réseau peuvent être des soldats, des chars, des avions de chasse, etc. Pour les applications militaires, les MANET peuvent être utilisés afin de surveiller le déplacement de l'ennemi dans un espace géographique donné, ou de récolter des données dans une zone dangereuse où l'envoi d'êtres humains serait risqué.

✚ L'usage personnel :

Utilisé pour le partage des applications des équipements mobiles et des objets domestiques tels que smartphones, laptops, imprimantes, etc. Mais, les MANET sont déployés aussi pour contribuer au confort domestique en transformant les logements personnels en environnements intelligents qui s'adaptent automatiquement au comportement des utilisateurs et évitent le câblage à la maison.

✚ Les interventions d'urgence :

Opérations de recherche, de secourisme et de sauvetage en urgence durant les catastrophes naturelles comme lors du tremblement de terre, feux, inondation, etc.

✚ Applications commerciales :

Utilisés pour un paiement électronique distant (taxi, boutiques) ou pour un accès Internet mobile, etc.

✚ Réseaux de capteurs :

Généralement exploités pour des applications environnementales (météo, activité terrestre, suivi animale, etc.). Leur usage permet l'analyse et la gestion de phénomènes complexes sur une longue période de temps et sur une large zone géographique tel que : la température, l'humidité, la pression, le bruit, etc.

✚ VANET (Vehicular Ad hoc NETworks):

Est un groupe de véhicules à portée de communication les uns avec les autres, formant des systèmes de transports intelligents. L'intérêt optimal des VANET est de contribuer à des routes plus sûres et plus efficaces dans le futur en fournissant des informations opportunes aux conducteurs et aux autorités intéressées.

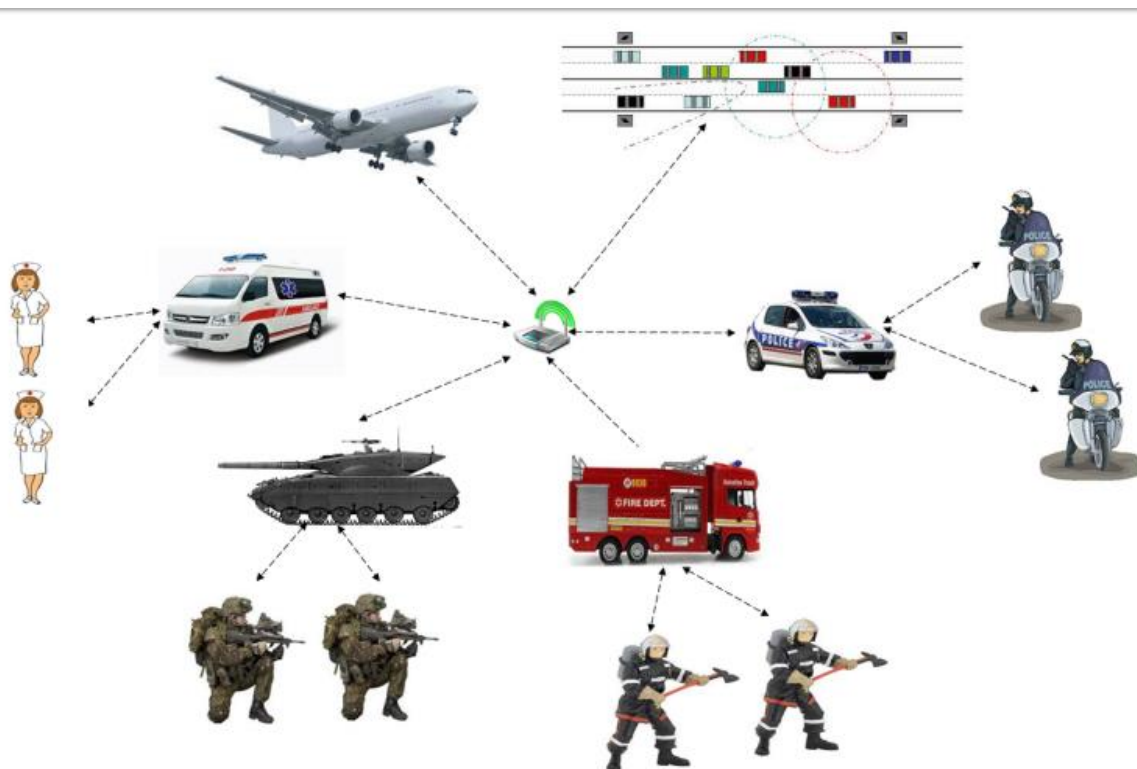


Figure 3: Exemples d'applications MANET[9]

Les réseaux VANETs (Vehicular Ad hoc NETWORKs) constituent une nouvelle forme de réseaux ad hoc mobiles permettant d'établir des communications entre les véhicules ou bien avec une infrastructure située aux bords de routes. Ils sont caractérisés par une topologie très dynamique et ils sont des réseaux sans infrastructure de gestion et de contrôle de la communication. Ces réseaux sont utilisés pour répondre aux besoins de communication appliquée aux réseaux de transport pour améliorer la conduite et la sécurité routière aux utilisateurs de la route. Pour la mise en place d'un tel réseau, certains équipements électroniques doivent être installés au sein de véhicules tel que : les dispositifs de perception de l'environnement (radars, caméras), un système de localisation GPS, et bien sûr une plateforme de traitement.

4. Les réseaux VANETs

Les réseaux véhiculaires aussi appelés VANETS (Vehicular Ad-hoc Network) constituent une sous-classe des MANETS, sont une projection des systèmes de transports intelligents (Intelligent Transportation Systems ITS) [1], réalisés par la réunion d'opportunités de plusieurs véhicules mobiles sans infrastructure préexistante pour communiquer [10].

Les véhicules communiquent les uns avec les autres par l'intermédiaire de la communication de V2V (véhicule-à-véhicule) aussi bien qu'avec les équipements de la route par l'intermédiaire de la communication de V2I (véhicules à infrastructure). L'objectif est que les réseaux VANETs contribueront à l'élaboration de routes plus sûres et plus efficaces à l'avenir en fournissant des informations opportunes aux conducteurs et aux autorités intéressées. Les réseaux VANETs se basent sur deux types d'applications. Les applications qui constituent le noyau d'un système de transport intelligent ITS (Intelligent Transport System), pour assurer l'amélioration de la sécurité routière, mais aussi des applications déployées pour le confort des passagers.

Un exemple de réseau VANET urbain est illustré dans la figure 9.

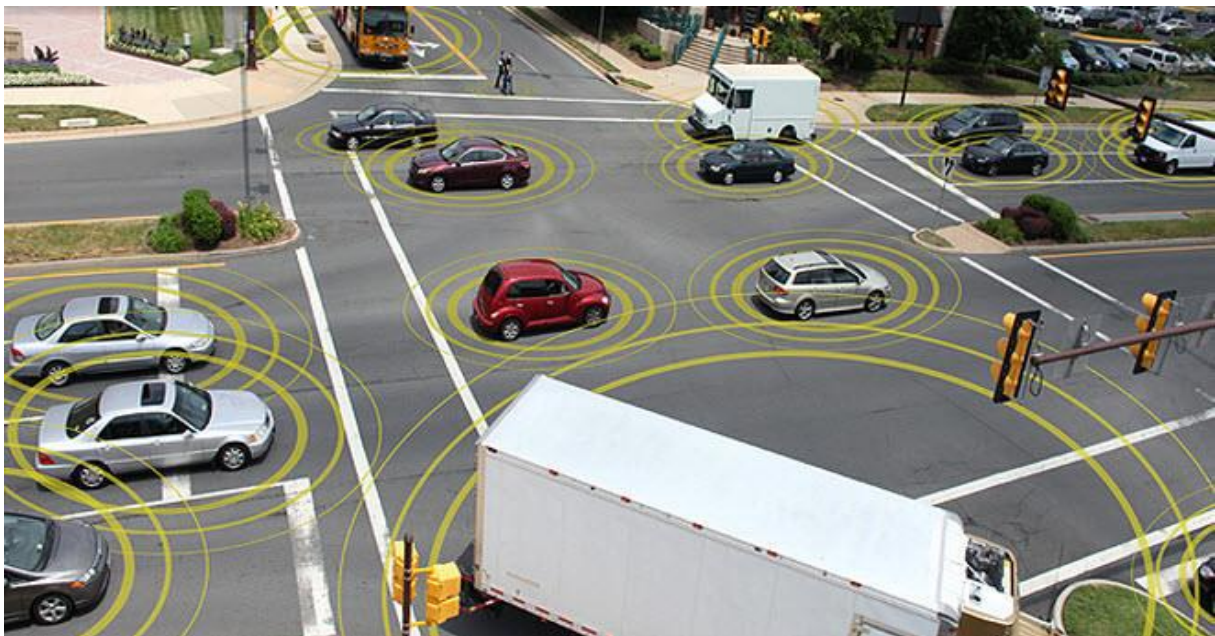


Figure 4: Un exemple des réseaux VANETS [11]

5. Architecture des réseaux VANET

Les avancées récentes dans le domaine des technologies sans fil permettent le déploiement d'architectures dédiées aux réseaux véhiculaires (dans les villes, les milieux urbains, sur les autoroutes, etc). Ces architectures permettent des communications entre les véhicules dotés d'équipements de communication adéquats. Plusieurs alternatives apparaissent :

a. Communication véhicule-à-véhicule (V2V)

Ce type de communication fonctionne suivant une architecture décentralisée. Il est semblable au type de communications entre les nœuds mobiles des réseaux MANETs. La communication entre deux véhicules se fait directement, en mode Ad hoc inter véhiculaire. Ils n'ont pas besoin de faire

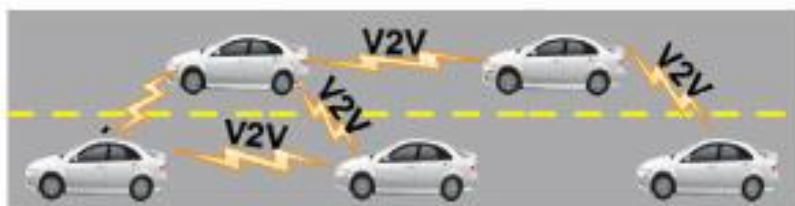


Figure 5: Architecture véhicule à véhicule [12]

appel aux infrastructures pour pouvoir communiquer entre eux. À condition que chaque véhicule soit à la portée de l'autre (zone radio). Sinon, ils font appel à d'autres véhicules, qui vont jouer le rôle d'un pont (intermédiaire) pour eux. Ce type de transmission est appelée communication à multi sauts.

b. Communication véhicules à infrastructure (V2I)

La communication véhicule à infrastructure (V2I) est aussi appelée une communication en mode infrastructure. Ce mode de communication est assuré grâce aux différentes entités du réseau VANETS. En effet, les véhicules et les RSUs (Road Side Unit) placés aux bords des routes contribuent tous entre eux pour assurer les communications dans le réseau véhiculaire. Ce mode de communication assure une connectivité relativement forte par rapport à la communication en mode V2V (véhicule à véhicule). Comme il assure une meilleure utilisation des ressources du réseau. Ainsi, elle permet aux véhicules de bénéficier de plus de fonctionnalités et services comme l'accès à l'Internet et les informations météorologiques, échange de données de voiture-à-domicile, communications de voiture-à-garage de réparation pour le diagnostic distant, etc.



Figure 6: Architecture véhicule à infrastructure [12]

c. Communication hybride

La combinaison des communications véhicule à véhicule avec les communications de véhicules avec utilisation d'infrastructures, permet d'obtenir une communication hybride très intéressante. En effet, les portées des infrastructures (stations de bases) étant limitées, l'utilisation des véhicules comme relais permet d'étendre cette distance. Dans un but économique et afin d'éviter la multiplication des stations de bases à chaque coin de rue, l'utilisation des sauts par véhicules intermédiaires prend tout son importance.



Figure 7: Architecture hybride [12]

6. Les caractéristiques des VANETs

Bien que les réseaux VANETs dérivent des réseaux Ad hoc mobiles, ils se distinguent avec certaines caractéristiques, qui retiennent une grande attention, à savoir :

✚ Capacité et autonomie d'énergie

Parmi les spécificités des réseaux VANETs, la grande capacité d'énergie caractérisant les véhicules qui les détiennent de leurs systèmes d'alimentation. Ce qui n'est pas le cas des autres types d'appareils des réseaux sans fil, qui incitent une grande préoccupation par rapport à la limite de leurs batteries [13].

✚ Communication, traitement et stockage

Les véhicules sont caractérisés par la diversification de leurs modes de communications, car ils sont équipés de différentes interfaces (WIFI, Bluetooth, Radio et autres). Ceci implique une grande capacité de traitement et de stockage des données, qui est assurée grâce aux nouvelles technologies et les nombreuses puces électroniques très puissantes qui sont installées dans les véhicules.

✚ Environnement de communication

Les réseaux VANETs sont caractérisés par la grande diversité de leurs environnements qui sont déployés dans la nature à grande échelle. Passant du milieu urbain qui présente différents obstacles (immeubles) qui peuvent réduire la qualité de transmission radio, à un environnement autoroutier affecté principalement par les très grandes vitesses des véhicules.

✚ Modèle de mobilité

Le modèle de mobilité des réseaux VANETs est lié à la diversité environnementale et les infrastructures routières [14]. Mais dans une certaine mesure, il est possible de prévoir l'évolution des déplacements des véhicules grâce à leurs vitesses, leurs directions et surtout la connaissance des cartes routières. Car les déplacements des véhicules sont structurés par les routes et les rues [15]. Le mode de mobilité des réseaux VANETs est affecté par la vitesse des véhicules et leurs déplacements aléatoires, qui peuvent réduire considérablement les durées de communications et leurs comportements face à des obstacles.

✚ Modèle de communication

Les réseaux VANETs ont été déployés principalement pour des raisons de sécurité routière (message d'alerte). Ils doivent relier une source d'alerte vers une multitude de destinations (véhicules ou infrastructures), par exemple, ce type de communication nécessite principalement un modèle de transmission en Broadcast. Néanmoins, les entités ont parfois besoin de communiquer en mode Unicast [16].

✚ Topologie et connectivité

Les réseaux VANETs sont caractérisés par une connectivité irrégulière et relativement faible, liée directement à la vitesse des véhicules, leurs déplacements aléatoires et leurs comportements face à des obstacles, qui peuvent réduire considérablement les durées des communications. En effet un véhicule peut rapidement rejoindre ou quitter un groupe de véhicules, ce qui rend les changements de topologie très fréquents et très dynamiques, constitués de plusieurs groupes séparés [13], ceci entraîne une réorganisation de la topologie du réseau.

✚ Technologies de communications

Pour mettre en place les différentes communications entre les entités du réseau VANET, diverses technologies ont été conçues, pour offrir les différents services et augmenter la portée des communications et des bandes passantes. Ainsi, une norme de communication appelée DSRC (Dedicated short Range Communication) [17] a été adoptée. Sa couche physique est basée sur la norme IEEE 802.11a [17]. Plus tard, l'IEEE s'inspira de cette norme pour créer la norme actuellement utilisée 802.11p [18], [19]. Cette norme définit essentiellement les services de sécurité et le format des messages.

7. Norme et standardisation dans les VANETs

La plupart des caractéristiques essentielles MANET soient en VANET avec quelques changements de comportement, notant que la norme IEEE 802.11 n'est pas très adapté à l'environnement VANET, c'est pour cela un groupe de travail IEEE a développé une nouvelle série de normes qui est conçu pour les VANETs, dont la composante essentielle est la norme 802.11p, depuis l'année 2003 l'organisme IEEE a entrepris des travaux pour définir un nouveau standard dédié aux communications dans la bande DSRC. Ce standard connu sous le nom d'IEEE 802.11p/WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments)[20] représenté dans la figure 8, utilise le concept de multicanaux afin d'assurer les communications pour les applications de sécurité et les autres services ITS. Ce protocole répond à un manque d'homogénéité entre les manufacturiers automobiles et fournit un support suffisant pour l'organisation des fonctions de gestion et mode d'opération pour la communication véhiculaire. WAVE fournit un ensemble de services et d'interfaces qui collectivement permettent d'assurer une communication V2V ou V2I sécuritaire.

WAVE se base sur la famille des protocoles IEEE1609 pour opérer dans la bande DSRC. Cette pile protocolaire présentée sur la figure 8 est formée des standards suivant :

 IEEE 802.11p

Qui décrit les couches physiques et MAC, correspondantes aux environnements VANETs.

 IEEE 1609.1

Pour la gestion des ressources au niveau des trois couches supérieures du modèle ISO. Il décrit les services de gestion et de données offerts dans l'architecture WAVE. Il définit le format des messages de commandes et la réponse appropriés à ces derniers, format de stockage de données utilisées par les applications pour communiquer entre les composantes de l'architecture et le format des messages.

 IEEE 1609.2

Pour la transmission et le traitement sécurisé des messages au niveau de la couche de transport. Il définit aussi les circonstances de l'utilisation d'un échange sécurisé et comment ces messages doivent être traités selon le but de l'échange.

 IEEE 1609.3

Définit les services de la couche réseau et transport incluant l'adressage et le routage pour le support d'échange de données sécurisés.

 IEEE 1609.4

Fournit une amélioration de la couche Medium Access Control (MAC) 802.11 afin de supporter les opérations de WAVE, la coordination et la gestion des sept canaux dans la bande DSRC et gestion des files d'attente et de l'ordre de priorité de l'accès au medium.

Les extensions de 802.11p MAC concernant la gestion de la priorité des messages pour mieux gérer les applications sensibles au retard.

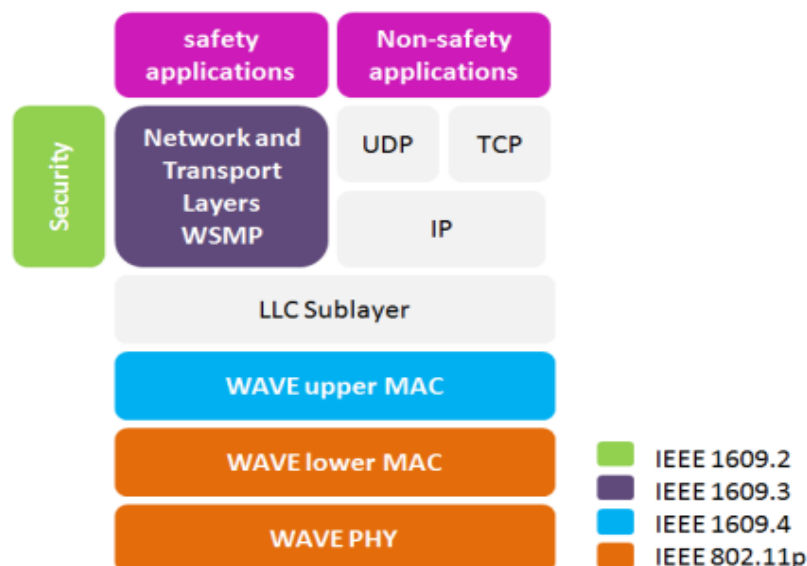


Figure 8: la pile protocolaire WAVE

8. Les applications des VANETs

Les communications véhiculaires peuvent être utilisées par de nombreuses applications qui peuvent être classées en applications de sécurité routière, applications pour les systèmes d'aide à la conduite et applications de divertissement qui nécessite une connexion internet. Ci-dessous, nous identifions un ensemble représentatif des applications des VANETs.

✚ Gestion du trafic routier

Les applications de gestion du trafic routier ont deux objectifs : Le premier est d'apporter au conducteur des informations concernant le trafic routier autour de lui ou dans un endroit précis. Ce sont des applications de planification permettant d'emprunter le trajet le plus court vers la destination du véhicule, en prenant en compte le trafic (figure 9), les différentes routes ainsi que les obstacles ou accidents potentiellement présents sur le trajet (figure 10).

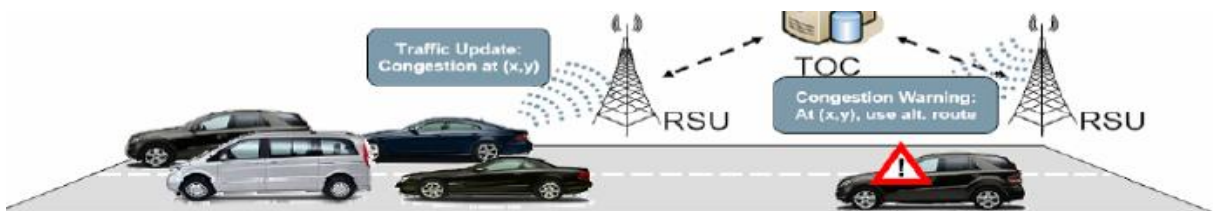


Figure 9: prise en compte de trafic

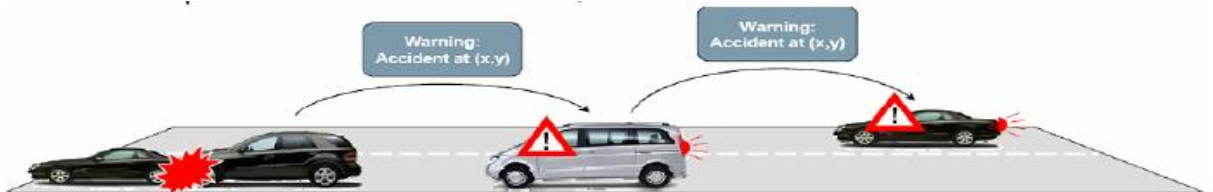


Figure 10: prise en compte d'obstacles et des accidents

Le deuxième objectif est d'apporter une assistance au niveau des intersections. En effet, en milieu urbain, c'est au niveau des intersections qu'il y a le plus d'accidents (figure 11) (que ce soit avec d'autres véhicules ou bien avec des piétons) [21]. Il y a donc beaucoup de recherche effectuée à ce sujet, surtout au niveau de la communication avec les feux de circulation. Ces recherches sont menées dans un premier temps, afin d'avertir le conducteur de l'état du feu lorsqu'il s'en approche, ainsi que de permettre à la voiture de freiner toute seule en cas de négligence de la



part du conducteur. Mais on pourrait aussi imaginer le contrôle des feux par les véhicules d'urgences. C'est une application que l'on retrouve d'ailleurs déjà dans certaines villes.

Figure 11: assistance au niveau des intersections[22]

✚ La localisation par carte

La localisation par carte est une application d'assistance au conducteur, dans laquelle par exemple une direction de trajet entre deux points dans une ville peut être tracée sur une carte afin d'aider des conducteurs perdus dans une partie inconnue de la ville.

✚ Parking intelligent

La localisation des emplacements de parking libre est une application d'assistance au conducteur qui permette de gagner le temps et le carburant gaspillé dans la recherche des emplacements libres pour une voiture.

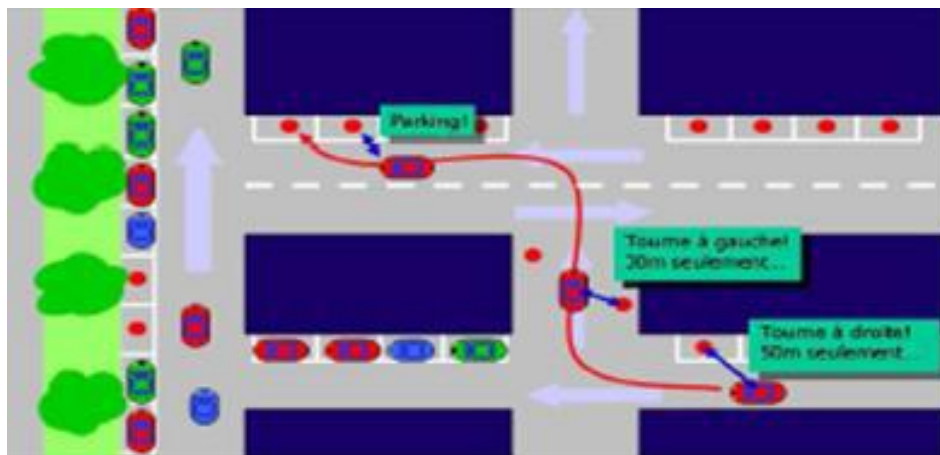


Figure 12: Parking intelligent [22]

✚ Applications de confort

Les applications de confort sont développées principalement pour divertir les passagers, mais aussi à des fins publicitaires et d'information. Les applications de divertissements permettent et/ou nécessitent un accès Internet. Cet accès peut être effectué à des points stratégiques, comme les stations essences, ou en remontant le réseau jusqu'à un RSU qui serait connecté. En plus de permettre la connexion Internet, il serait possible par exemple de télécharger du contenu payant, comme des jeux, de la musique ou des vidéos à ces points stratégiques et de pouvoir les partager ensuite sur le réseau. C'est donc l'accès à Internet, le partage et la messagerie inter-véhicule ou encore les jeux en réseau ou hors ligne, qui seraient permis sur le réseau. Les applications publicitaires sont destinées aux commerciaux présents sur les bords des routes. Ainsi, les hôtels, restaurants, stations essences et autres commerces pourraient annoncer aux véhicules, dans un certain rayon autour de leur commerce, leur présence à proximité. Les utilisateurs pourraient ainsi, consulter le type de commerce présent autour d'eux et sélectionner celui correspondant à leurs besoins.

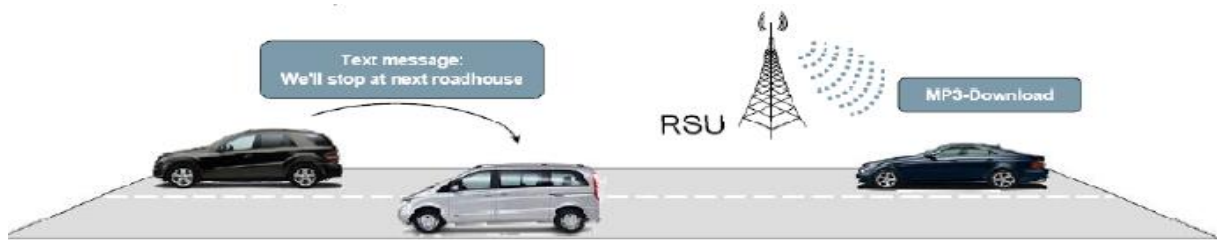


Figure 13 : la messagerie inter-véhicule et l'accès à internet

9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les réseaux ad hoc mobiles et les réseaux véhiculaires VANET qui ne sont qu'une particularité des réseaux MANET. Nous avons signalé également leurs caractéristiques, leurs applications ainsi que les normes adoptées à ces types de réseaux. Nous avons cité aussi que la communication dans les réseaux véhiculaires avec chacun de ces modes V2I, V2V et hybride servent à améliorer la sécurité routière ainsi que le confort du conducteurs en échangeant des messages entre les véhicules. Dans le chapitre suivant nous présenterons les difficultés de routage dans les réseaux ad hoc mobile et véhiculaire ainsi que les différents protocoles de routage adaptés à ce type de réseaux.

Chapitre II : Le Routage dans les réseaux Ad hoc

1. Définition

Dans ce chapitre nous présenterons les multiples difficultés de routage dans les réseaux ad hoc et les différentes familles de protocoles de routage, puis nous nous focaliserons sur les principes de ces protocoles et leurs fonctionnements. Puis nous citerons les travaux déjà faits dans le contexte de comparaison entre ces protocoles et l'évaluation de leurs performances.

2. Le routage dans les réseaux mobiles ad hoc «MANET»

a. Difficulté de routage dans les réseaux mobiles ad-hoc

Comme nous avons déjà vu, l'architecture d'un réseau mobile ad hoc est caractérisée par une absence d'infrastructure fixe préexistante, à l'inverse des réseaux de télécommunication classiques. Un réseau ad hoc doit s'organiser automatiquement de façon à être déployable rapidement et pouvoir s'adapter aux conditions de propagation, au trafic et aux différents mouvements pouvant intervenir au sein des unités mobiles.

Dans le but d'assurer la connectivité du réseau, malgré l'absence d'infrastructure fixe et la mobilité des stations, chaque nœud est susceptible d'être mis à contribution pour participer au routage et pour retransmettre les paquets d'un nœud qui n'est pas en mesure d'atteindre sa destination : tout nœud joue ainsi le rôle de station et de routeur.

Chaque nœud participe donc à un protocole de routage qui lui permet de découvrir les chemins existants, afin d'atteindre les autres nœuds du réseau. Le fait que la taille d'un réseau ad hoc peut être énorme, souligne que la gestion de routage de l'environnement doit être complètement différente des approches utilisées dans le routage classique. Le problème qui se pose dans le contexte des réseaux ad hoc est l'adaptation de la méthode d'acheminement utilisée avec le grand nombre d'unités existant dans un environnement caractérisé par de modestes capacités de calcul et de sauvegarde.

Dans la pratique, il est impossible qu'un hôte puisse garder les informations de routage concernant tous les autres nœuds, dans le cas où le réseau serait volumineux.

Certains protocoles, comme le DSR[4], [5] et le AODV[2], utilisent la sauvegarde des données de routage concernant une destination donnée (dans le cas où la source ne possède pas déjà de telles informations). Cependant, ces protocoles ne spécifient pas les destinations que les nœuds doivent garder leurs données de routage. Le problème ne se pose pas dans le cas de réseaux de petites tailles, car l'inondation (la diffusion pure) faite dans ces réseaux n'est pas coûteuse. Par contre, dans un réseau volumineux, le manque de données de routage concernant les destinations peut impliquer une diffusion énorme dans le réseau, et cela si on considère seulement la phase de découverte de routes. Le trafic causé par la diffusion, dans ce cas, est rajouté au trafic déjà existant dans le réseau ce qui peut dégrader considérablement les performances de transmission du système caractérisé principalement par une faible bande passante.

Dans le cas où le nœud destination se trouve dans la portée de communication du nœud source le routage devient évident et aucun protocole de routage n'est initié. Malheureusement, ce cas est généralement rare dans les réseaux ad hoc. Une station source peut avoir besoin de transférer des données à une autre station qui ne se trouve pas dans sa portée de communication.

Par exemple dans le réseau illustré par la figure 14 l'unité mobile W n'est pas dans la portée de communication de l'unité U (indiquée par le cercle d'origine U) et vice versa. Dans le cas où l'unité U veut transférer des paquets à W, elle doit utiliser les services de l'unité V dans l'envoi des paquets, puisque l'unité V contient dans sa portée de communication les unités U et W. Dans la pratique, le problème de routage est plus compliqué à cause de la non-uniformité de la transmission sans fil et de la possibilité du déplacement imprévisible de tous les nœuds concernés par le routage.

Comme nous avons cité avant les réseaux VANETs sont une application et un cas particulier des réseaux Mobiles, donc les difficultés présentés dans cette section existent aussi dans les réseaux VANETs, vu ces difficultés, il s'avère nécessaire de mettre en œuvre des protocoles de routage qui s'adaptent aux exigences de ces réseaux, les protocoles de routage que nous présenterons dans la section suivante sont convenables et applicables aussi dans les réseaux VANETs.

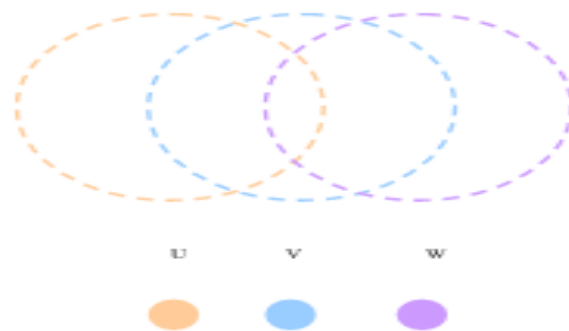


Figure 14: Un simple réseau ad hoc constitué de trois unités mobiles

b. Classifications des protocoles de routage dans les réseaux ad-hoc

Le principal but de toute stratégie de routage est de mettre en œuvre une méthode de gestion d'acheminement robuste et efficace. En général, toute stratégie de routage repose sur des mécanismes que nous pouvons regrouper en deux grandes classes : les protocoles de routage topologiques et les protocoles de routage géographiques.

A. Les protocoles de routage topologiques :

Ils sont les protocoles qui se basent sur la topologie du réseau. Plus précisément, ces protocoles utilisent les informations sur les liens du réseau pour la transmission des paquets [23]. Ils peuvent être classés en quatre catégories : les protocoles proactifs, les protocoles réactifs, les protocoles hybrides, et les protocoles hiérarchiques.

➤ Les protocoles de routage proactifs

Les protocoles de routage proactifs diffusent des messages de contrôle périodiques pour la création, la maintenance et la mise à jour des routes, et ce en parallèle de la transmission des données. Même s'il n'y a pas de trafic, cette maintenance reste toujours active. Cette classe de protocole est basée sur les mêmes méthodes utilisées pour les protocoles de routage dans les réseaux filaires. Les deux principales méthodes sont : la méthode à État de Liens (Link State) et la méthode du Vecteur de Distances (Distance Vector). Ces deux méthodes reposent sur la technique de plus court chemin ce qui permet à une source de trouver le chemin le plus court vers une destination.

✚ La méthode à État de Liens (Link State)

Dans cette méthode, chaque nœud maintient sa propre vision de toute la topologie du réseau. La mise à jour de cette vision se fait par diffusion périodique (par inondation) des requêtes par chaque nœud déclarant l'état des liens de ses voisins à tous les nœuds du réseau. L'opération de mise à jour peut se faire aussi dans le cas de changement d'un état des liens. Une fois que la mise à jour est effectuée, chaque nœud change sa vision de la topologie en se basant sur l'image complète du réseau formé des liens les plus récents. Ensuite, il applique un algorithme de calcul de route optimale pour calculer la distance qui le sépare d'une destination donnée. L'algorithme Dijkstra [24] est un exemple des algorithmes les plus couramment appliqués dans le calcul de plus court chemin.

✚ La méthode du Vecteur de Distances (Distance Vector)

Par contre dans cette méthode, chaque nœud diffuse à ses voisins sa vision des distances qui le séparent de tous les hôtes du réseau. Chaque nœud calcule le chemin le plus court vers n'importe quelle destination en se basant sur les informations reçues par tous ses voisins. Cette approche est basée sur l'algorithme distribué de Bellman Ford (BF)[25]. Le processus de calcul de plus court chemin se répète jusqu'à ce que le réseau atteigne un état stable.

Les protocoles de routage proactifs réunissent les idées des deux méthodes. Ils essayent de réduire leurs limitations, et de prendre en compte les caractéristiques des environnements mobiles afin de les adapter à ce nouvel environnement.

▪ Exemples :

Dans cette catégorie, les protocoles de routage proactifs maintiennent une vision de la table de routage dans chaque nœud, grâce aux messages de mise à jour communiqués aux nœuds à chaque changement de la topologie. Les protocoles basés sur ce principe, dits aussi à diffusion de table, sont entre autres : DSDV [26], GSR [27], OLSR [28], etc.

- Le protocole Dynamic destination Sequenced Distance Vector (DSDV) [26] : a été conçu spécialement pour les réseaux mobiles. Cet algorithme est dérivé de l'algorithme de vecteur de distances basé sur BF[25]. Mais, DSDV a été proposé dans le but d'éviter le problème de boucles qui peuvent apparaître avec les algorithmes de vecteur de distances. Pour commander l'information de routage, DSDV étiquette chaque entrée de la table de routage avec un numéro de séquence, permettant de distinguer les nouvelles routes des anciennes. Un des avantages principaux de DSDV est qu'il fournit des routes sans boucles, cependant, DSDV est très lent [29].
- Le protocole Global State Routing (GSR) [27] : est similaire à DSDV. Il est basé aussi sur la méthode d'état de liens et il utilise une vue globale du réseau. Mais GSR améliore ces deux algorithmes (l'algorithme DSDV et l'algorithme à état de liens) en évitant l'inondation des messages car il utilise une méthode de dissémination de BF, qui implique l'absence d'inondation. La façon dont les informations de routage circulent dans le réseau est la différence clé entre l'algorithme GSR et l'algorithme à état de liens. La maintenance dans GSR de la table la plus récente est effectuée à partir de l'échange périodique d'état des liens à travers les voisins locaux uniquement [29].
- Le protocole Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) [28] : est une optimisation de l'algorithme à état de liens. Ce protocole utilise aussi l'algorithme du plus court chemin pour la sélection des routes. Dans l'algorithme à état de liens, chaque nœud du réseau

déclare son voisinage à tout le réseau. Par contre dans OLSR, les nœuds ne déclarent qu'un sous-ensemble de leur voisinage grâce à la technique des relais multipoints.

➤ Les protocoles de routage réactifs

Comme nous l'avons mentionné au cours du paragraphe précédent, les protocoles de routage proactifs essaient de maintenir les meilleurs chemins vers toutes les destinations du réseau par l'échange périodique de messages de contrôle de mise à jour. Les routes sont sauvegardées même si elles ne sont pas utilisées ce qui induit un contrôle excessif surtout dans le cas des réseaux denses. Les protocoles de routage réactifs créent et maintiennent les routes selon les besoins des émetteurs et de leurs applications. Dans ce cas, une procédure de découverte globale de routes est lancée qui permet d'avoir une information bien spécifique mais inconnue au préalable. Dans ce cadre plusieurs politiques peuvent être adoptées, les plus importantes sont :

✚ La Technique d'apprentissage en arrière :

Le mécanisme d'apprentissage en arrière ou le backward learning [26] est basé sur le fait que lorsqu'un nœud source veut transmettre un message à une destination précise, il procède tout d'abord à l'opération d'inondation de sa requête sur tout le réseau. Ainsi chaque nœud intermédiaire dit de transit (appartenant au chemin par lequel va passer le message), indique le chemin au nœud source lors de la réception de la requête. On dit qu'il apprend le chemin au nœud source, tout en sauvegardant la route dans la table transmise. Enfin, lorsque la requête arrive à bon port, le nœud destinataire, et suivant le même chemin, transmet sa réponse sous forme de requête. Notons que le chemin établi entre les nœuds est un chemin Full duplex. Signalant aussi que la source garde trace du chemin tant qu'il restera en cours d'utilisation une fois que le chemin sera calculé.

✚ Technique du routage source :

Dans cette technique, le nœud source détermine toute la liste des nœuds par lesquels doit transiter le message, ainsi le nœud émetteur inclut dans l'entête du paquet une route source. En effet, afin de construire la route, le nœud source doit préciser les adresses exactes des nœuds par lesquels le message transitera jusqu'à atteindre le destinataire. Ainsi, le nœud source transmet le paquet au premier nœud spécifié dans la route. Notons que chaque nœud par lequel le paquet transit, supprime son adresse de l'entête du paquet avant de le retransmettre. Une fois que le paquet arrive à sa destination, il sera délivré à la couche réseau du dernier hôte.

▪ Exemple :

Les protocoles basés sur ce principe, dits aussi à la demande, sont entre autres : DSR [4], [5], AODV [2], etc.

- Le protocole Dynamic Source Routing (DSR) [4],[5] : considère le routage à la source, du fait que la source désigne le chemin complet vers la destination dans l'en-tête du paquet. Le long de ce chemin, chaque nœud expédie tout simplement le paquet destiné au prochain saut indiqué dans le chemin grâce à un cache route. Ainsi, une source cherche tout d'abord dans son cache de route pour déterminer la route à la destination. Si elle existe, la source utilise cette route. Sinon, la source lance une procédure de découverte de route pour construire une route. Dans cette procédure de découverte, le nœud source

diffuse une requête par inondation dans le réseau. La réponse est retournée par la destination ou un autre nœud si celui-ci a une route dans son cache pour cette destination. Dans DSR, peu de messages de contrôle circulent dans le réseau quand peu de sources veulent communiquer, ce qui représente l'avantage principal de ce protocole. Mais, dans le cas des réseaux de grande taille, DSR peut présenter des problèmes de passage à l'échelle (scalability). Dans ce cas, les paquets augmentent de taille car ils doivent véhiculer les adresses des nœuds existants dans le chemin et l'inondation pour la recherche de routes devient plus importante.

En plus des deux catégories de protocoles de routage, proactifs et réactifs, il existe une autre catégorie appelée hybride qui combine les précédentes. Cette catégorie fera l'objet du paragraphe suivant.

➤ Les protocoles de routage hybrides

Ces protocoles utilisent l'approche proactive pour déterminer le voisinage à deux sauts ou trois sauts. De cette manière, les routes dans le voisinage sont définies. Au-delà de cette zone prédéfinie, les protocoles hybrides utilisent l'approche réactive pour la recherche de route. De ce fait, le réseau est découpé en plusieurs zones. À la réception d'une requête de recherche de route réactive, le nœud peut signaler si la destination est dans son voisinage ou non pour renvoyer la requête vers les autres zones. Le protocole de routage Zone Routing Protocol (ZRP)[30], [31] présente un exemple de cette catégorie. Les protocoles hybrides s'adaptent bien aux grands réseaux, cependant, ils comportent aussi les inconvénients des protocoles réactifs tels que : les messages de contrôle périodiques, plus le coût de recherche d'une nouvelle route.

▪ Exemple :

- Le protocole de routage Zone Routing Protocol (ZRP)[30], [31]: découpe le réseau en zones. Chaque zone du réseau inclut un ensemble de nœuds dont le nombre de sauts ne dépasse pas un certain nombre prédéfini appelé aussi rayon de la zone. Des messages de mise à jour sont échangés localement dans chaque zone afin de permettre aux nœuds de connaître localement la topologie du réseau. Dans une zone, un protocole de routage proactif tel que DSDV est utilisé pour se renseigner sur la topologie. Pour déterminer un chemin vers un nœud d'une zone extérieure, un protocole de routage réactif tel que DSR est employé. Lors de la découverte de route dans ZRP, la source vérifie d'abord que la destination est hors de sa zone. Elle envoie alors un paquet de requête à tous les nœuds sur la périphérie de sa zone. Chacun des nœuds qui reçoit le paquet de requête lui ajoute son adresse et le transmet à ses nœuds périphériques, dans le cas où la destination n'est pas dans leur zone de routage. Dans le cas contraire, cas où un nœud identifie la destination comme membre de sa zone, le chef de cette zone envoie un paquet de réponse qui inclut la route complète vers la destination.

En conclusion, dans les protocoles réactifs, proactifs et hybrides, le routage doit être réalisable sans organisation fixée au préalable (hiérarchie). Ils utilisent le mécanisme d'inondation pour la découverte de routes ce qui limite leur passage à l'échelle.

➤ Les protocoles de routage hiérarchiques

Ils sont basés sur l'organisation des nœuds du réseau sous forme d'une structure connue dont le but de faciliter le routage dans les réseaux ad hoc mobiles à large échelle ont été proposés dans

[32], [33], [34], [35], [36], [37]. Par exemple, dans CBRP [33] les nœuds du réseau sont organisés en clusters où des nœuds sont élus pour coordonner le routage dans ces clusters.

Récemment, avec l'apparition de petits récepteurs GPS (Global Positioning System), qui représentent une classe des systèmes de navigation par satellite la plus utilisée jusqu'à présent – et qui est destinée à fournir des informations sur la position d'une unité mobile en temps réel et à assurer l'intégrité de ces informations, ainsi que les techniques de localisation [38], [39], un certain nombre de protocoles ont été développés [23]. Ces protocoles, communément appelés protocoles de routage géographiques, représentent la seconde famille que nous décrivons dans ce chapitre. La localisation et le routage géographique sont entendus comme toute solution ou fonction qui permet de positionner, de localiser et de produire des informations géographiques liées aux nœuds dans un réseau mobile, afin d'augmenter l'efficacité de la procédure de découverte d'itinéraires. Les protocoles géographiques répondent à certaines limitations des protocoles basés sur la topologie en utilisant des informations supplémentaires qui concernent les positions géographiques des nœuds. Plus précisément, les changements fréquents de la topologie, conséquence de la mobilité des nœuds, implique de grands problèmes de passage à l'échelle des protocoles de routage traditionnels, basés sur l'utilisation de la topologie [40]. Dans ces protocoles, chaque nœud a seulement besoin de connaître les coordonnées géographiques de ses voisins immédiats et du nœud destinataire pour prendre une décision d'acheminement des paquets. Chaque nœud peut déterminer sa propre position grâce à l'utilisation des données GPS ou d'un autre système de positionnement [39]. Un service de localisation est utilisé par l'expéditeur d'un paquet pour déterminer la position du nœud destinataire et pour l'inclure dans les paquets à transmettre. La décision de routage dans chaque nœud est alors basée sur la position du nœud destinataire et de la position des voisins immédiats. Par conséquent, ces protocoles ne nécessitent pas la création ou le maintien d'itinéraires et les nœuds n'ont pas besoin de stocker et de maintenir à jour les tables de routage. L'avantage majeur de cette approche est que les paquets peuvent être acheminés à tous les nœuds disponibles dans une région géographique donnée.

B. Les protocoles de routage géographiques :

Les protocoles de routage géographiques ont comme caractéristique commune deux étapes distinctes : la localisation d'un nœud destinataire et l'acheminement ou le routage des paquets vers ce nœud. Dans la première étape, il est nécessaire que le nœud source détermine la position géographique du nœud destinataire avant d'envoyer des paquets d'information. Pour cette opération de découverte de la position géographique, un service de localisation doit être utilisé [23]. Dans le contexte des réseaux ad hoc mobiles à large échelle, la fourniture d'un service de localisation efficace est un problème difficile vu l'absence d'une infrastructure fixe. L'acheminement ou le routage d'un message par un nœud est essentiellement basé sur la position de ses voisins immédiats et la position du nœud destinataire. Dans un protocole de routage géographique, un nœud est supposé aussi connaître sa position géographique en utilisant les données GPS. Les positions des voisins sont généralement connues puisque chaque nœud envoie périodiquement sa position à ses voisins immédiats. En d'autres termes, la connaissance du voisinage est périodiquement mise à jour à l'aide de messages échangés entre les nœuds voisins. Dans ce qui suit, nous décrivons les différentes techniques de localisation.

▪ Exemples :

Ils existent plusieurs protocoles géographiques, parmi eux : GPSR[3], LAR[41], DREAM[42].

Les deux protocoles LAR et DREAM sont basés sur une approche d'une inondation dirigée, cette approche est proposée dans le but de limiter la diffusion des requêtes de découverte d'itinéraire. Les requêtes sont diffusées seulement aux nœuds se trouvant dans la zone du nœud destinataire.

- Le protocole Location-Aided Routing (LAR) : Pendant la découverte d'un itinéraire, le protocole LAR ne définit pas un mécanisme de localisation des nœuds, mais il utilise des informations sur la position, considérée connue à l'avance, des nœuds dont l'objectif est de limiter la diffusion des paquets de découverte de routes. Deux approches ont été proposées.

Dans la première approche, deux types de zones ont été définis (voir figure 15(a)) : « *expected zone* » (EZ) et « *request zone* » (RZ). L'EZ est définie comme la zone où devrait se trouver le nœud du point de vue de la source. Cette zone, à l'instant t_1 , est calculée sur la base de sa position antérieure connue par le nœud source à l'instant t_0 et de la vitesse moyenne v du mouvement du nœud destinataire. En se basant sur ces informations, le nœud source définit cette zone comme un cercle du centre (X_d, Y_d) et de rayon $R=(t_1 - t_0) \cdot v$. La RZ est définie comme étant le plus petit rectangle comprenant la position actuelle du nœud source et de la zone EZ. La RZ contient généralement la zone EZ. Dans cette approche, lorsqu'un nœud S souhaite échanger des informations avec un nœud D, il calcule la zone EZ dans laquelle le nœud D peut être localisé. Si aucune information n'est disponible, LAR est réduite à des simples inondations. Si des informations de localisation sont disponibles, la zone RZ est définie. Durant la phase de découverte d'une route, les informations concernant la RZ sont jointes à la requête et seuls les nœuds appartenant à cette zone la diffuseront (ex. : les nœuds I et K dans la figure 15(a)). Cela permet de diminuer la charge des paquets de contrôles diffusés dans le réseau. À la réception du paquet, par le nœud destinataire, il génère une réponse en indiquant sa position actuelle, l'heure et sa vitesse moyenne.

Dans la deuxième approche, le nœud source calcule la distance $dist_S$ qui le sépare du nœud destinataire. Cette distance ainsi que les coordonnées (X_d, Y_d) de la destination D sont ensuite incluses dans le paquet de découverte d'itinéraires. Ce dernier est envoyé par la suite aux nœuds voisins (voir figure 15 (b)). Quand le nœud I reçoit ce paquet, il calcule la distance $dist_L$ qui le sépare de la destination D, et la compare avec la distance $\beta \times dist_S + \delta$, où $dist_S$ est la distance contenue dans le paquet, les paramètres β et δ sont des paramètres du système. Dans le cas où la distance calculée est inférieure ou égale à la distance $dist_L$, le nœud I envoie le paquet reçu. Lors de l'envoi, le nœud met à jour le champ de distance, $dist_L$, avec sa propre distance qui le sépare du nœud destination. Dans le cas contraire, le nœud I ne rediffuse pas le paquet. Quand un nœud J reçoit le paquet du nœud I pour la première fois, il procède de la même manière que le nœud I. Si aucune réponse de route n'est reçue après un certain temps (TTL par exemple), le nœud source rediffuse une nouvelle requête de découverte de route.

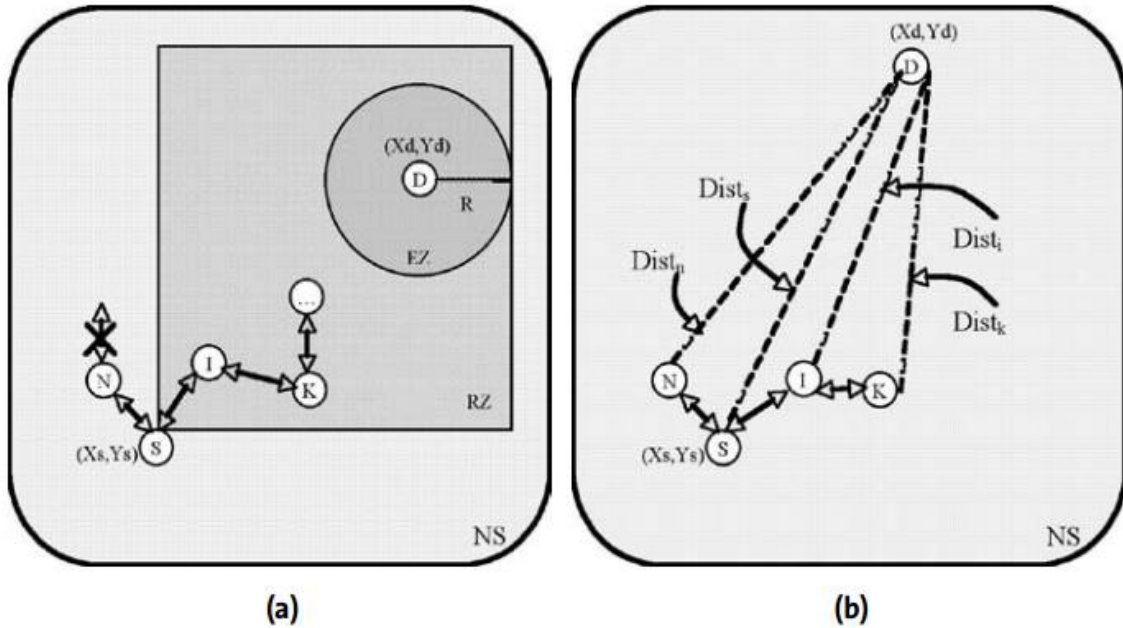


Figure 15: (a) Exemple de RZ et EZ dans l'espace du réseau (network space, NS), (b) sans l'utilisation du RZ et E [43]

- Le protocole **Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM)** : Dans le protocole DREAM, le nœud source S diffuse le paquet de découverte à tous les voisins immédiats (se trouvant à un seul saut) qui se trouve dans la direction du nœud destinataire D. Pour déterminer cette direction, le nœud S calcule la région susceptible d'englober le nœud D, appelée EZ, expected zone (voir figure 16). L'EZ est délimitée par un cercle autour de la position du nœud D. Puisque l'information à propos de cette position peut changer, le rayon r de cette région est calculé de la manière suivante : $r = (t_1 - t_0) v_{max}$, où t_1 est le temps actuel, t_0 est le temps associé à la dernière information que S possède à propos du nœud D, et v_{max} est la vitesse maximale d'un nœud dans le réseau. Rappelons que la position concernant le nœud D est déjà connue et stockée dans sa base de données à travers le processus de localisation utilisé par DREAM. Étant donné la région EZ, la direction vers le nœud D est définie par la ligne entre S et D et de l'angle 2φ (voir figure 16). Les nœuds voisins répètent cette procédure en utilisant les informations sur la position de D. Si un nœud ne dispose pas d'un voisin situé à un seul saut dans la direction du nœud destinataire, une procédure de recouvrement doit être démarrée.

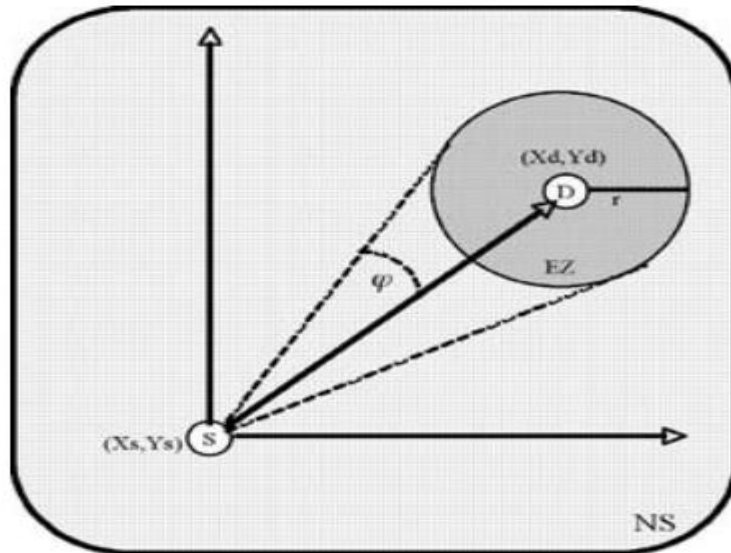


Figure 16: Un exemple d'expected zone dans DREAM [43]

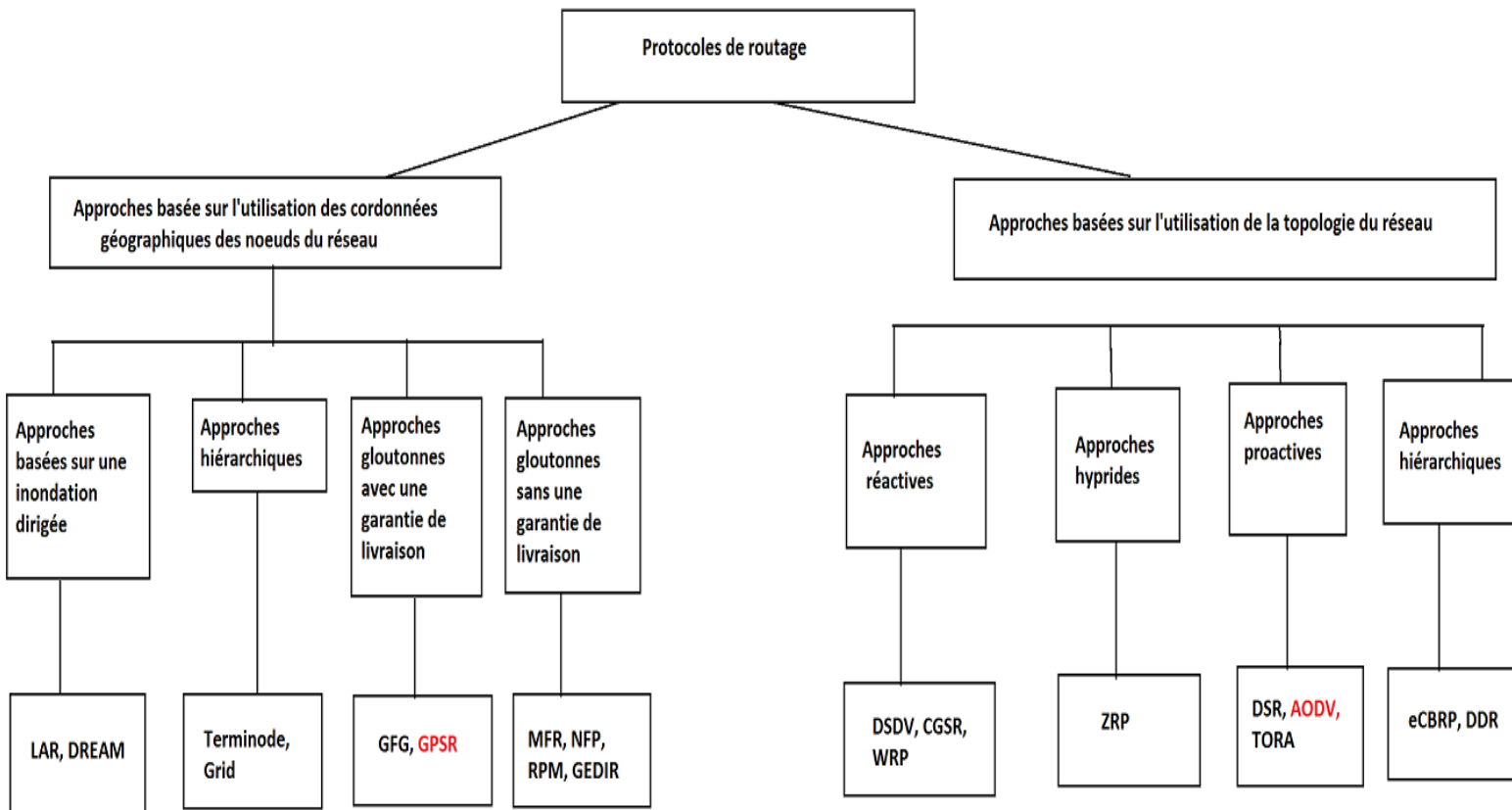


Figure 17: Classification des protocoles de routage selon leurs modes de fonctionnement

3. Le protocole AODV

Le protocole "Routage avec Vecteur de Distance à la Demande" (AODV : **Ad hoc Ondemand Distance Vector**), représente essentiellement une amélioration de l'algorithme DSDV. Il réduit le nombre de diffusions de messages en créant les routes au besoin, contrairement au DSDV qui maintient la totalité des routes. L'AODV est basé sur l'utilisation des deux mécanismes "Découverte de route" et "Maintenance de route" (utilisés par le DSR), en plus du routage nœud-par-nœud, du principe des numéros de séquence et de l'échange périodique du DSDV.

Ce protocole utilise le principe des numéros de séquence afin de maintenir la consistance des informations de routage. A cause de la mobilité des nœuds dans les réseaux ad hoc, les routes changent fréquemment ce qui fait que les routes maintenues par certains nœuds deviennent invalides. Les numéros de séquence permettent d'utiliser les routes les plus nouvelles ou autrement dit les plus fraîches (fresh routes).

Comme le fait DSR, l'AODV utilise une requête de route dans le but de créer un chemin vers une certaine destination. Cependant, l'AODV maintient les chemins d'une façon distribuée en gardant une table de routage au niveau de chaque nœud de transit appartenant au chemin cherché. Une entrée de la table de routage contient essentiellement :

- L'adresse de la destination.
- Le nœud suivant.
- La distance en nombre de nœud (i.e. le nombre de nœud nécessaire pour atteindre la destination).
- Le numéro de séquence destination.
- Le temps d'expiration de l'entrée de la table.

Quand un nœud de transit envoie le paquet de la requête à un voisin, il sauvegarde aussi l'identificateur du nœud à partir duquel la première copie de la requête est reçue. Cette information est utilisée pour construire le chemin inverse (figure 18) qui sera traversé par le paquet réponse de route (cela induit que l'AODV ne supporte que les liens symétriques). Puisque le paquet réponse de route va être envoyé à la source, les nœuds appartenant au chemin de retour vont modifier leurs tables de routage suivant le chemin contenu dans le paquet de réponse.

Un nœud diffuse une requête de route (RREQ : Route REQuest) dans le cas où il aurait besoin de connaître une route vers une certaine destination et qu'une telle route ne serait pas disponible (figure 18). Cela peut arriver si la destination n'est pas connue au préalable, ou si le chemin existant vers la destination est devenu défaillant (i.e. la métrique qui lui est associée est infinie). Le champ numéro de séquence destination du paquet RREQ contient la dernière valeur connue du numéro de séquence associé au nœud destination, cette valeur est recopiée de la table de routage.

Si le numéro de séquence n'est pas connu, la valeur nulle sera prise par défaut. Le numéro de séquence source du paquet RREQ contient la valeur du numéro de séquence du nœud source. Comme nous avons déjà dit, après la diffusion du RREQ, la source attend le paquet réponse de route (RREP : Route REPLY). Si ce dernier n'est pas reçu pendant une certaine période (appelée RREP_WAIT_TIME), la source peut rediffuser une nouvelle requête RREQ. A chaque nouvelle diffusion, le champ Broadcast ID du paquet RREQ est incrémenté. Si la requête RREQ est rediffusée

un certain nombre de fois (RREQ_RETRIES) sans la réception de réponse, un message d'erreur est délivré à l'application.

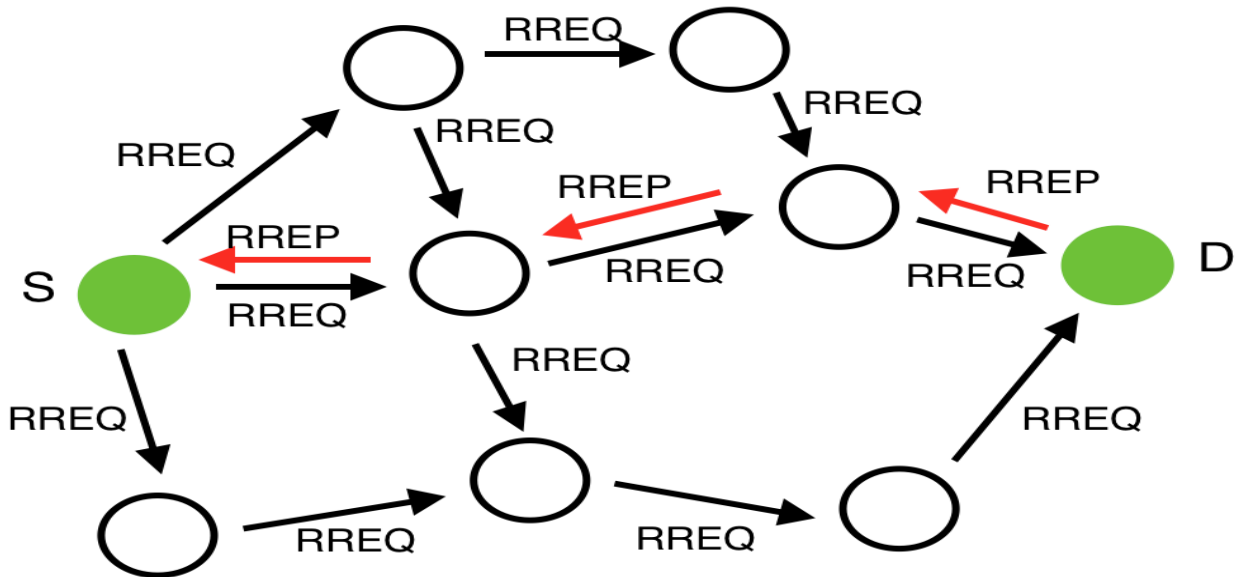


Figure 18: Méthode de construction d'une route

Afin de maintenir des routes consistantes, une transmission périodique du message "HELLO" est effectuée. Si trois messages "HELLO" ne sont pas reçus consécutivement à partir d'un nœud voisin, le lien en question est considéré défaillant. Les défaillances des liens sont, généralement, dû à la mobilité du réseau ad hoc. Les mouvements des nœuds qui ne participent pas dans le chemin actif n'affectent pas la consistance des données de routage. Quand un lien reliant un nœud p à un nœud qui le suit dans le chemin de routage devient défaillant, le nœud p diffuse un paquet UNSOLICITED RREP, avec une valeur de numéro de séquence égale à l'ancienne valeur du paquet RREP incrémentée de un, et une valeur infinie de la distance. Le paquet UNSOLICITED RREP est diffusé aux voisins actifs jusqu'à ce qu'il arrive à la source. Une fois le paquet est reçu, la source peut initier le processus de la découverte de routes.

L'AODV maintient les adresses des voisins à travers lesquels les paquets destinés à un certain nœud arrivent. Un voisin est considéré actif, pour une destination donnée, s'il délivre au moins un paquet de donnée sans dépasser une certaine période (appelée active timeout period). Une entrée de la table du routage est active si elle est utilisée par un voisin actif. Le chemin reliant la source et la destination en passant par les entrées actives des tables de routage est dit un chemin actif. Dans le cas de défaillances de liens, toutes les entrées des tables de routage participant au chemin actif et qui sont concernées par la défaillance sont supprimées. Cela est accompli par la diffusion d'un message d'erreur RERR (figure 19) entre les nœuds actifs.

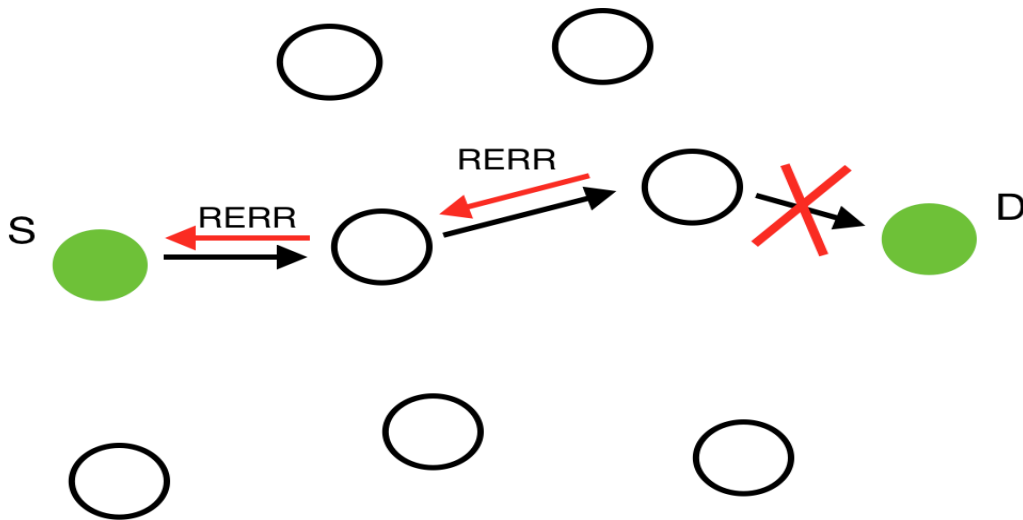


Figure 19: Principe de détection d'un lien défaillant

Le protocole de routage AODV (tout comme le protocole DSR), n'assure pas l'utilisation du meilleur chemin existant entre la source et la destination. Cependant, des évaluations de performances récentes ont montré qu'il n'y a pas de grandes différences (en terme d'optimisation) entre les chemins utilisés par le protocole AODV et celles utilisées par les protocoles basés sur les algorithmes de recherche des plus courts chemins. De plus, le protocole AODV ne présente pas de boucle de routage et évite le problème "counting to infinity" de Bellman-Ford, ce qui offre une convergence rapide quand la topologie du réseau ad hoc change.

4. Le protocole GPSR

GPSR (**G**reedy **P**erimeter **S**tateless **R**outing) est un protocole de routage réactif qui a été conçu et adapté pour les réseaux ad hoc mobiles. Son modèle de fonctionnement suppose que tous les nœuds se trouvent au niveau d'un même plan, il utilise la position géographique des nœuds pour l'acheminement des paquets de données ou de contrôle. Dans un réseau mobile, les nœuds sont susceptibles de se déplacer. Il faut ainsi un mécanisme permettant à chaque nœud de savoir la position de ses voisins. Afin de signaler leur présence et leur localisation, les nœuds inondent le réseau en envoyant un paquet de signalement (messages « beacon ») contenant la position et un identifiant (par exemple, son adresse IP). L'échange périodique de ces paquets de contrôle permet aux nœuds de construire leur table de position. La période d'émission des messages « beacon » dépend du taux de mobilité dans le réseau ainsi que de la portée radio des nœuds. En effet, lorsqu'un nœud ne reçoit pas de message « beacon » d'un voisin après un temps T , il considère que le voisin en question n'est plus dans sa zone de couverture et l'efface de sa table de position. Il faut donc adapter le temps d'émission des paquets de contrôle. Un des avantages du BP (Beaconing Protocol) est que chaque nœud n'a besoin que des informations sur ses voisins directs, ce qui nécessite peu de travail.

Alternativement, le protocole GPSR permet au nœud d'encapsuler sur quelques bits leur position dans les paquets de données qu'il envoie. Dans ce cas, toutes les interfaces des nœuds doivent être en mode promiscuité afin de recevoir les paquets s'ils se trouvent dans la zone de couverture de l'émetteur. L'acheminement des paquets par GPSR se fait selon deux modes suivant la densité du réseau : le « Greedy Forwarding » et le « Perimeter Forwarding ».

a. Greedy Forwarding :

Ce mode construit un chemin parcourant les nœuds de la source à la destination où chaque nœud qui reçoit un paquet l'achemine en faisant un saut vers le nœud intermédiaire le plus proche de la destination dans sa zone de couverture. La figure 20 montre un exemple de ce mode d'acheminement.

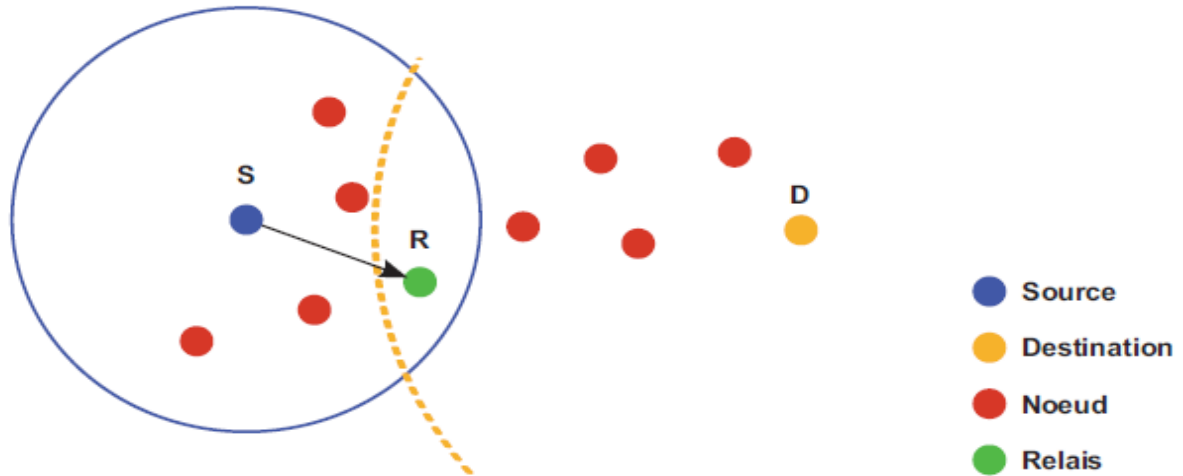


Figure 20: Technique du Greedy Forwarding

Un nœud de retransmission/relayage peut faire localement un choix gourmand (greedy) optimal dans le choix du prochain saut pour un paquet. Le choix localement optimal du prochain saut est le voisin le plus proche géographiquement à la destination du paquet. Cette technique est répétée de manière réursive jusqu'à ce que la destination soit atteinte.

La figure 20 ci-dessus représente un exemple de choix gourmand du prochain saut. Le nœud S reçoit ou génère un paquet destiné à D. la zone de couverture de S est désignée par le cercle plein de couleur bleue autour de S et l'arc dont le rayon est égal à la distance entre R et D est représenté par une ligne discontinue. S relaye le paquet à R, car la distance entre D et R est inférieure à celle entre D et n'importe quels autres voisins de S. Ce processus de transfert gourmand se répète jusqu'à ce que le paquet atteigne D. Cet algorithme d'acheminement offre un taux de réussite assez proche des réseaux filaires dans le cas où la mobilité de la destination n'est très forte. Lorsqu'un paquet de données atteint une région où le «Greedy Forwarding» échoue, alors le «Perimeter Forwarding» est utilisé.

Il existe des topologies dans lesquelles la seule voie qu'un paquet peut emprunter vers une destination est temporairement plus loin en terme de distance géométrique de la destination. Un exemple de telle topologie est représenté dans la figure 21 suivante.

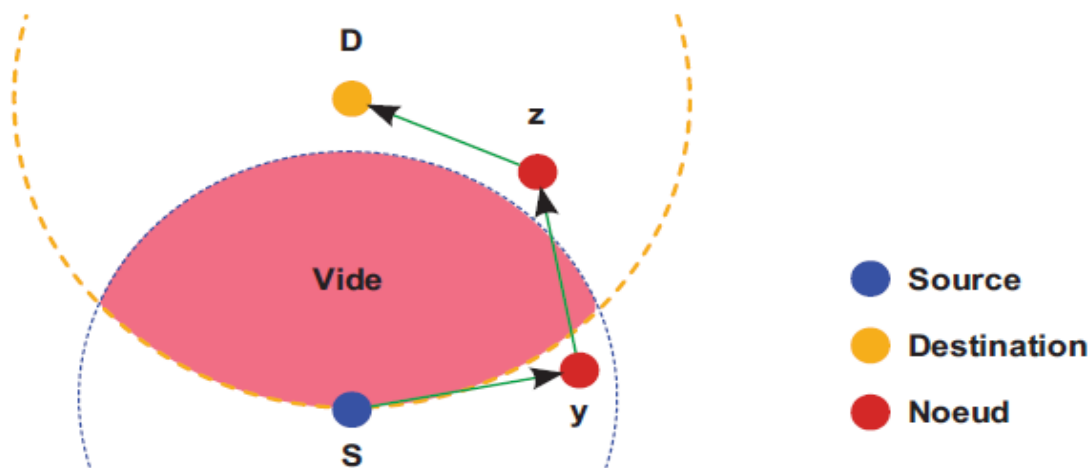


Figure 21: scénario d'un maximum local

Sur cette figure, S est plus proche de D que son voisin y. de plus le chemin ($x \rightarrow y \rightarrow z \rightarrow D$) existe vers D, S ne choisira pas de transmettre à y avec la technique du « Greedy forwarding », mais comme S est le maximum local dans son entourage par rapport à D, un autre mécanisme doit être utilisé pour acheminer les paquets dans ce type de situations c'est le cas de « Greedy forwarding ».

b. Perimeter Forwarding :

Cet algorithme utilise la règle de la main droite qui est définie comme suit : Lorsqu'un paquet arrive à un nœud x du nœud y, le chemin à suivre est le prochain qui se trouve dans le sens inverse des aiguilles d'une montre en partant de x et par rapport au segment [xy] tout en évitant les « crossing links » (route déjà parcourue). La figure 21 montre un exemple plus précis de ce mode.

Pour que le périmètre soit bien emprunté sans boucle, il est nécessaire de rendre au préalable le graphe planaire. Un graphe planaire est un graphe sans arêtes d'intersection. Un réseau *ad hoc* peut être modélisé par un graphe où les nœuds sont des sommets. Une arête existe entre deux sommets s'ils sont suffisamment proches pour communiquer directement les uns avec les autres. Le graphe représentant le réseau ad hoc n'est pas généralement planaire (voir figure 22, où la portée de transmission de chaque nœud contient tous les autres nœuds). Dans le but de construire un sous-graphe planaire connecté au graphe formé par les nœuds du réseau, un mécanisme proposé dans [44], a été utilisé comme suivant : une arête entre deux nœuds A et B est incluse dans le graphe que si l'intersection des deux cercles avec un rayon égal à la distance entre A et B autour de ces deux nœuds ne contient pas d'autres nœuds.

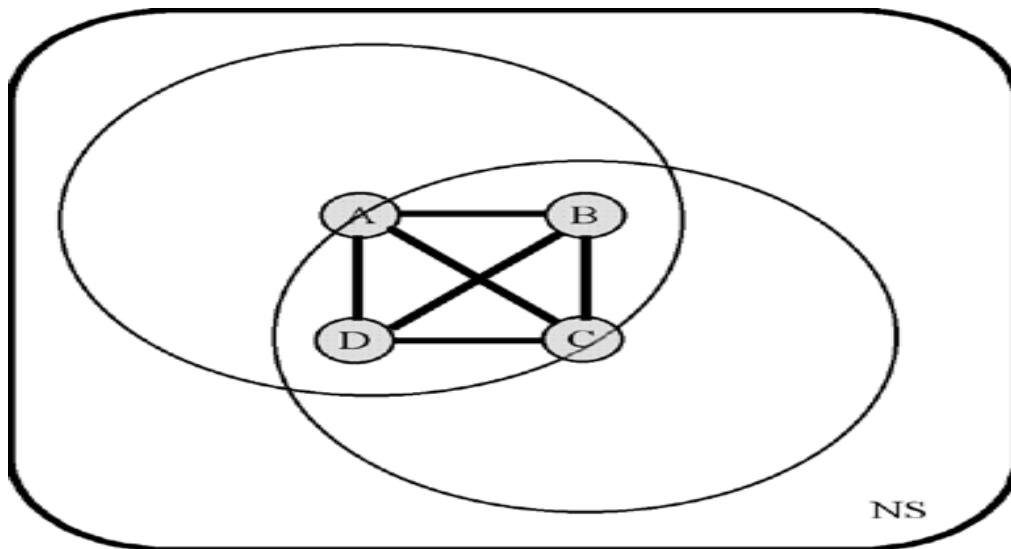


Figure 22: Exemple d'un graphe non planaire [43]

Par exemple, dans la figure 22, l'arête entre A et C ne serait pas incluse dans le sous-graphe planaire car B et D se trouvent dans l'intersection des deux cercles. Il est important de réaliser que la décision qu'une arête soit incluse ou non dans le graphe peut être prise localement par chaque nœud, dans la mesure où chaque nœud connaît la position de tous ses voisins. Après la construction du graphe planaire, le mécanisme suivant doit être utilisé pour trouver un chemin d'un nœud source vers un nœud destinataire. Le concept général est de transmettre progressivement le paquet sur les faces qui sont de plus en plus près de la destination en utilisant la technique **right-hand rule** (la règle de la main droite) : transmettre le paquet sur le prochain nœud **counter-clockwise** (contre le sens des aiguilles d'une montre) du nœud dont il vient. La figure 21 montre comment ce principe est effectué quand un paquet est transmis du nœud S vers le nœud D dans le mode de recouvrement (Perimeter Forwarding). Chaque fois que la ligne entre la source et la destination croise le nœud auquel le paquet est sur le point d'être transmis, on vérifie si cette intersection est plus proche de la destination que toutes autres intersections précédemment rencontrées. Par exemple, figure 23, dans le nœud A, le paquet est diffusé avec le mode périmètre aux nœuds B et C. Quand il arrive au nœud C, le paquet est diffusé en mode glouton (Greedy Forwarding) puisqu'il est proche du nœud destinataire. Cet algorithme garantit qu'un chemin sera trouvé à partir de la source vers la destination s'il en existe au moins un dans le graphe non planaire original. Pour qu'un nœud puisse décider localement du choix d'un nœud voisin pour diffuser le paquet, des informations supplémentaires doivent être incluses dans l'entête du paquet. Parmi ces informations on trouve la position du nœud, la position de la dernière intersection qui a causé le changement de mode, et la première arête parcourue sur le mode actuel. Par conséquent, chaque nœud de routage peut prendre toutes les décisions, basées uniquement sur ces informations et les informations relatives à ses voisins locaux.

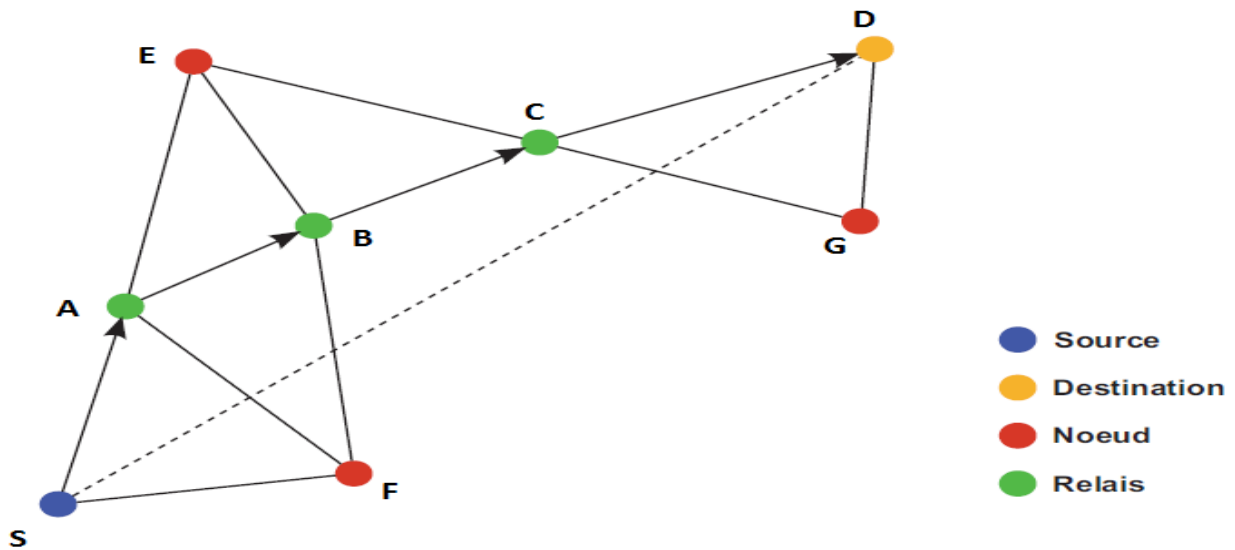


Figure 23: Mode Perimeter Forwarding et la règle de la main droite

5. Les travaux antérieurs

L'algorithme de routage consiste à assurer une stratégie qui garantit, à n'importe quel moment, la connexion entre n'importe quelle paire de nœuds appartenant au réseau. Cette stratégie doit prendre en considération les changements de la topologie du réseau, ainsi que d'autres caractéristiques comme la bande passante, le nombre de liens, la limitation d'énergie, etc. Avec l'émergence de ces dispositifs, de multiples recherches ont été menées notamment dans le domaine du routage. Ces recherches ont comparé et évalué plusieurs protocoles de routage suivant par rapport aux plusieurs métriques de performance. Dans la section suivante, nous présentons un état de l'art des principales comparaisons et évaluations de différents protocoles de routage dans les réseaux véhiculaires et mobiles ad-hoc, soit entre les protocoles de routage topologique ou entre ces derniers et leurs concurrents géographiques, et de présenter les outils utilisés ainsi que les résultats obtenus dans chaque étude.

a. Comparaison entre les protocoles topologiques (MANET):

Un grand nombre d'articles de recherche publiés au cours des dernières années ont simulé et assimilé à la performance des protocoles de routage MANET. Dans cette section, nous discutons une série d'études passées qui ont comparé différentes performances des protocoles de routage MANET.

Les auteurs en[45] ont comparé la performance de trois protocoles de routage : DSDV, AODV, DSR. Ils ont utilisé l'outil de simulation NS-2 pour l'évaluation des performances des trois protocoles de routage. Les paramètres utilisés sont le temps de pause, le nombre de connexions et la taille du paquet, alors que les paramètres de performance évalués sont la perte de paquets, le délai moyen et le débit de bout en bout. Les résultats de la simulation ont montré que l'AODV est le protocole le plus approprié pour le protocole de contrôle de transmission (TCP) et le trafic en temps réel, puisque AODV a surpassé les protocoles DSR et DSDV pour tous les paramètres de simulation.

Une autre étude effectuée par Niraj et Arora [46] a comparé les performances de l'AODV, du DSR et du DSDV en utilisant NS-2. Les paramètres de performance utilisés pour l'évaluation des protocoles étaient le temps de pause, la densité du réseau et la taille du paquet. Les paramètres

de performance utilisés étaient le débit, le cout de routage, le taux de livraison des paquets avec sucée et le délai moyen de bout en bout. Les résultats de la simulation ont montré que le DSR est supérieur à DSDV et AODV en fonction du débit et de la fraction de PDR. Le délai de bout en bout régulier et le cout de routage pour AODV se sont révélés meilleurs que ceux pour DSR et DSDV pour une variation de densité. En outre, Niraj et Arora ont signalé que les frais généraux d'acheminement dans AODV étaient meilleurs que DSDV et DSR avec des valeurs variables de temps de pause.

b. Comparaison entre les protocoles topologiques (VANET) :

Un certain nombre de protocoles de routage basés sur la topologie ont été suggérés et analysés par de nombreux chercheurs.

Dans [47], AODV, DSR, FSR et TORA ont été évalués dans le scénario de circulation urbain en utilisant le simulateur de réseau NS-2. Le modèle de mobilité de la ville est basé sur un réseau routier de Manhattan de huit routes horizontales et verticales. La vitesse des véhicules est déterminée sur la base du modèle de pilote intelligent (IDM). Cette étude est faite sur les paramètres de performances suivants : le débit, le PDR, le cout de contrôle, le délai. De l'étude, il a été constaté que l'AODV a les meilleures performances et le cout de contrôle les plus bas. Il est suivi par FSR, DSR, puis TORA.

Dans [48], l'analyse est basée sur la simulation d'AODV et le protocole DSR avec la norme IEEE 802.11 modifiée pour les couches PHY / MAC dans les modèles de mobilité VANET à l'aide de l'outil OPNET et en utilisant trois modèles de mobilité (l'autoroute, modèle avec des panneaux stop et avec des panneaux de signalisation). Cette analyse a été effectuée en termes de charge, de débit, de délai, nombre de sauts et tentatives de retransmission avec une variation de la densité du réseau dans les scénarios de mobilité urbaine / routière. Les résultats obtenus montrent que, le débit de DSR était meilleur que celui de AODV par contre le délai était mieux pour AODV et ils ont presque les mêmes performances pour les autres métriques de performance et ils variés selon la densité du réseau.

L'étude présentée dans [49] par J. Haerri, F. Filali, et C. Bonnet, analyse les performances de AODV et OLSR dans l'environnement de la ville à l'aide de l'outil NS2 dans sa version 2.27 avec une durée de simulation de 200s et une variation de nombre de nœuds entre 40 et 80. Ici, les résultats montrent que OLSR fonctionne mieux que AODV dans les VANETs au niveau de PDR ainsi il 'a un délai et un coût de routage inférieur à celui d'AODV.

Une autre étude présentée dans [50] compare les protocoles AODV, DSR et DSDV pour les réseaux de véhicules dans une plateforme Linux(debian) en utilisant le simulateur NS-2 et le générateur de mobilité SUMO, ainsi que le script Perl pour extraire les résultats à partir du fichier trace. Les auteurs ont conclu que l'AODV est le meilleur parmi les trois protocoles. La performance de AODV, DSR et DSDV a été comparée pour la mobilité routière dans [51]. DSDV fonctionne mieux en ce qui concerne le délai, mais AODV montre de meilleures performances en termes de débit, et de PDR.

c. Comparaison entre les protocoles topologiques et les protocoles géographiques (VANET) :

Un certain nombre de protocoles de routage topologique et géographique ont été suggérés et analysés par de nombreux chercheurs, dans la suite une présentation de quelques évaluations :

AODV, DSR et le protocole géographique GSR ont été comparés dans l'environnement de la ville [52] en utilisant l'outil de simulation NS2 et ils supposent que les nœuds transmettent selon la norme LAN sans fil IEEE 802.11 (2 Mbps) et ils ont choisi une gamme de transmission de 500m. Les résultats montrent que GSR est meilleur que le AODV et le DSR en ce qui concerne le taux de paquets délivré avec succès et la latence, même chose pour le débit.

AODV, DSR et LAR ont été évalués par les auteurs Akhtar Husain, Ram Shringar Raw, Brajesh Kumar, and Amit Doegar dans le scénario de la ville et de l'autoroute en utilisant l'outil IDM VanetMobiSim pour générer des traces de mobilité réalistes dans [53]. Les protocoles sont évalués selon le débit, le délai, et le PDR en faisant varier la densité du réseau de 10 à 80 véhicules avec un temps de simulation de 1500s, le protocole LAR était mieux performer que les autres protocoles de routage basé sur la topologie.

Dans [51], la performance de l'AODV et du GPSR a été comparée dans le scénario de la ville en utilisant les cartes TIGER et les traces de véhicules réels avec les normes MAC IEEE 802.11. Le MMTS a été utilisé comme modèle de mobilité pour VANET et aucun service de localisation n'a été utilisé dans GPSR pour connaître la position des destinations. Des coordonnées de destination ont été fournies à partir de la connaissance globale du simulateur. Ici, AODV fonctionne mieux que le GPSR en termes de taux de livraison de paquets, alors que le délai est plus élevé en AODV que dans le GPSR.

Dans [54], AODV, DSR et GPSR ont été comparés dans un scénario urbain en utilisant NS-2 et MITSIM pour simuler un mouvement de circulation réaliste. Au total, 400 nœuds ont été simulés à l'aide des normes LAN sans fil 802.11. Les sorties ont été comparées sur une distance de communication entre 200 et 1600 mètres. Il a été constaté que DSR et AODV souffrent d'une latence plus élevée et d'un PDR inférieur à celui de GPSR par rapport à la distance croissante entre la source et la destination ainsi le GPSR était performant en terme de cout de contrôle et le nombre de sauts.

Les auteurs Raj Bala et C. Rama Krishna analysent dans [55] les performances des protocoles de routage AODV et GPSR dans un VANET dans différents scénarios dans des conditions de trafic différentes, en ce qui concerne le taux de paquets délivrés (PDR) et le délai moyen de bout en bout. La simulation est effectuée en utilisant NS-2.35 en combinaison avec VanetMobiSim. Il a été constaté que AODV fonctionne mieux en ce qui concerne le PDR et le GPSR surclasse AODV par rapport au délai. En outre, les performances des deux protocoles de routage varient d'un scénario à l'autre et selon les types de trafic. La performance de AODV et de GPSR est améliorée en utilisant IEEE 802.11p au lieu d'IEEE 802.11.

À partir des études ci-dessus, nous avons conclu que parmi les protocoles de routage basés sur la topologie, AODV a les meilleures performances dans un VANET, ainsi que la majorité des Protocoles de routage dans un réseau MANET sont aussi adaptés pour les VANETs. Et on remarque que les protocoles géographiques sont plus performants que les protocoles topologiques. On conclut également qu'aucune des études mentionnées ci-dessus ne considère un vaste scénario

en tenant compte de diverses conditions de trafic et de densité du réseau ainsi que les architecture avec infrastructure. Donc dans ce travail l'objectif est l'analyse de performance de deux protocoles appartenant à deux familles différentes l'une topologique et l'autre géographique, plus particulièrement le protocole AODV et GPSR, cette analyse est basée sur différents scénarios de mobilité (Urbain, centre-ville) avec différentes conditions de trafic en utilisant la norme IEEE 802.11 p MAC / PHY. La simulation est effectuée à l'aide du simulateur NS2 dans sa version 2.35 et en combinaison avec le générateur de mobilité VANETMOBISIM pour donner plus de valeur et d'avoir une simulation plus proche à la réalité puisque ce générateur nous donne la possibilité de définir le comportement des conducteurs ainsi que les feux de signalisation, les voix, le doublage, etc. Et nous allons étudier l'impact de deux importants facteurs sur le réseau véhiculaire : la densité et la charge du trafic CBR dans une architecture V2V, nous allons essayer aussi de faire une simulation de l'architecture V2I avec une liaison filaire entre le RSU et des serveurs FTP et CBR.

6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons cité les difficultés et les problèmes liés au routage, nous avons décrit les différents types des protocoles de routage dans les réseaux ad hoc. Puis nous nous sommes focalisés principalement sur le protocole topologique réactif AODV et le protocole géographique GPSR, et nous les avons bien détaillés ainsi que d'expliquer leurs comportement et fonctionnement. Et à la fin nous avons présenté quelques études faites dans la littérature concernant la comparaison et l'évaluation de ces protocoles.

Dans le chapitre suivant nous présenterons le mécanisme de la simulation, et les différents simulateurs du réseau utilisés pour l'évaluation des performances des protocoles dans notre étude et nous focaliserons sur le simulateur NS2 ainsi que d'autres outils utilisés pour donner plus de fiabilité à nos simulations.

Chapitre III : La simulation des réseaux VANETs

1. Introduction

Les protocoles de routage doivent être évalués afin de mesurer les performances de la stratégie utilisée et de tester leurs fiabilités. L'utilisation d'un réseau ad hoc véhiculaire réel dans une évaluation est difficile et coûteuse, en outre de telles évaluations ne donnent pas généralement des résultats significatifs. Le réseau réel n'offre pas la souplesse de varier les différents paramètres de l'environnement et pose en plus le problème d'extraction de résultats; c'est pour cela la majorité des travaux d'évaluation de performances utilisent le principe de simulation vu les avantages qu'il offre.

En effet, la simulation permet de tester les protocoles sous une variété de conditions. Il permet de faire varier les différents facteurs de l'environnement tel que le nombre de véhicules, l'ensemble des véhicules en mouvement, les vitesses des mouvements, le territoire du réseau et la distribution des véhicules dans ce territoire. Initialement, chaque véhicule est placé aléatoirement dans l'espace de simulation.

Un véhicule reste dans sa position courante pendant une certaine durée (pause time), par la suite elle choisit une nouvelle vitesse et une nouvelle localisation vers laquelle elle se déplace. Chaque unité répète ce même comportement jusqu'à la fin de la simulation.

Les paramètres mesurés dans une évaluation dépendent de la stratégie de routage appliquée (par exemple dans le cas où on veut comparer deux versions d'un même protocole, ou deux protocoles différents), mais généralement tout simulateur doit être en mesure d'évaluer :

Le coût de routage et l'efficacité de chaque protocole.

Les délais de bout en bout du transfert des paquets.

Le taux de paquets délivrés avec succès.

Dans la suite de ce chapitre on présente l'évaluation des performances des réseaux sans fil, ainsi que les différents simulateurs réseaux qui sont disponibles, puis on décrit l'architecture du simulateur NS2 que nous avons choisi pour notre étude, ainsi que le générateur de mobilité VANETMOBISIM. Et finalement on présente le processus de simulation avec un schéma explicatif.

2. La simulation

Actuellement, la simulation constitue l'outil le plus pratique et le plus efficace pour évaluer le comportement d'un système complexe dont la formalisation à l'aide de méthodes analytiques est difficile. En effet, le fait de simuler, c'est le fait de modéliser un système complexe, afin de prévoir son comportement dans le monde réel. Il s'agit d'une approche permettant de représenter le fonctionnement et le comportement d'un système réel qui devient nécessaire dès lors que les modèles analytiques deviennent, soit trop complexes en termes de calcul et de temps de résolution, soit trop simplifié par rapport à son comportement réel, par ce fait, la simulation permet d'effectuer des recherches sur un système, en faisant varier plusieurs paramètres un à un et en recommençant avec les mêmes conditions initiales. Ainsi que la simulation est souvent moins coûteuse que l'expérimentation et comporte beaucoup moins de risques lorsque l'homme fait partie du système étudié. Vu que ce type d'évaluation présente un avantage économique et une souplesse dans la création des scénarios de simulation et permet d'envisager un grand nombre de

situations, la communauté de recherche scientifique a été très active en évaluant les performances des divers protocoles de routage Ad hoc, et il y a plusieurs recherches dans ce sens [56], [57], [58], et la majorité de ces travaux utilisent la simulation comme moyen d'évaluation des performances [59].

3. Les outils de simulations

Plusieurs et différents simulateurs ont été utilisés pour évaluer et simuler les performances des protocoles de routage dans les réseaux VANETs, d'où la nécessité de pouvoir comparer différents simulateurs réseaux en utilisant les critères d'évaluation, pour choisir le meilleur entre eux. Nous avons essayé de faire une comparaison entre certains simulateurs dans le tableau 1 y compris : NS2 [60] [61], OMNET++ [62], [63, p. 2], J-SIM [64], GLOMOSIM [65].

Après cette comparaison représentée dans le tableau 1. Il est clair que NS2 reste sans doute le simulateur le plus documenté et le plus polyvalent. Le seul point faible est que : son observabilité, c'est-à-dire l'interprétation et l'analyse des résultats assez difficile (utilisation des autres langages pour lire et interpréter les résultats), en le comparant à OMNet++ qui est largement clair et facile. Peut-être il y a aussi un manque de détail lors du paramétrage d'une simulation.

Pour Glomosim, on ne peut s'empêcher de noter qu'il est très performant pour la simulation des réseaux sans fil (il intègre un panel très important de protocoles de routage). Comme NS2, il possède un outil de visualisation de simulation. La documentation peut cependant sembler assez légère. Jsim est celui le plus à plaindre sur tout au niveau de la documentation : très difficile d'en trouver. C'est ce qui explique le manque de certitude lors de l'évaluation de ce simulateur. On sait toutefois qu'il est très performant (ce qui est dû au moteur codé en Java). L'ensemble de ces simulateurs sont multi-plateforme (Windows et Linux principalement).

Critères d'évaluations	OMNET++	GLOMOSIM	JSIM	NS2
Documentation	Oui	Oui	Non	Oui
Portabilité	Oui	Oui	Oui	Oui
Performance du moteur de simulation	*	*	Oui	Oui
Simulation temps réel	Oui	X	*	Oui
Evolutivité	Oui	X	Non	Oui
Modificabilité et extensibilité	Oui	Oui	X	Oui
Langage	C, C++	C, C++	C, C++	C++, OTCL

Modules représentant les couches OSI	Oui	*	Non	Oui
Plateforme	Linux / Windows	Linux / Windows	Linux / Windows	Linux / Windows
Modules représentant les protocoles de routages sans fil	Oui	Oui	X	Oui
Interface utilisateur	Non	*	Oui	Oui
Acceptabilité dans le milieu de la recherche scientifique	Oui	Oui	X	Oui
Génération de trafic de données	Oui	Oui	X	Oui
Modèles de mobilité	X	X	X	Oui

Tableau 1: Comparaison des simulateurs réseau

Légende : * : Fiabilité non vérifiée

X : Donnée inconnue

4. Simulateur NS2 :

NS2 est le simulateur des réseaux informatique, le plus populaire et le plus utilisé par les chercheurs. Il a commencé comme une variante du simulateur de réseau REAL en 1989 et a évolué au cours des dernières années. En 1995, son développement a été soutenu par la DARPA à travers le projet Virtual InterNetwork Testbed (VINT)[66]. Actuellement, le développement est réalisé par l'Institut des sciences de l'information à Californie. Il est écrit en C++. Il propose de base des implémentations de quelques protocoles. Il supporte aussi le mode sans fil et dispose de modèles de propagation pour gérer l'atténuation de signal. Il est possible de créer des scénarios, de capturer du trafic extérieur. Des outils graphiques sont disponibles pour gérer les topologies. Les inconvénients rapportés sont la complexité du logiciel, et la grande quantité de ressources utilisées. Il fonctionne sur plates-formes UNIX, et Windows.

NS2 a la possibilité d'utiliser des nœuds mobiles et offre aux utilisateurs un moyen pour spécifier les protocoles réseau et simuler leurs comportements correspondants. En raison de sa flexibilité et sa nature modulaire. La mobilité de ces nœuds peut être spécifiée soit directement dans le fichier de simulation ou en utilisant un fichier de mobilité. Dans notre cas, le fichier de mobilité est généré par le générateur de mobilité VanetMobiSim qui sera présenté en détail dans une prochaine section.

Le simulateur NS2 a une riche librairie d'objets réseau et protocoles. Il se compose de deux langages principales : Une librairie d'objets écrit en C++ et un interpréteur script OTcl (Tool Command Language orientée objet). Le C++ définit le mécanisme interne, à savoir, un arrière-plan des objets de simulation, la simulation OTcl met en place par l'assemblage et la configuration des objets. Les deux sont reliés entre eux en utilisant tclcl [50].

Chaque simulation dans NS2 est exécutée à partir d'un script écrit en Tcl (Tool Command Language), qui est un langage de commande interprété, multiplateforme, puissant, conçu pour être facilement inclus dans une application (C, C++). Dans ce script, on spécifie les paramètres de simulation « temps de simulation, modèle de mobilité, nombre de nœuds dans le réseau, type de protocole, transmission radio, type de trafic, ... ».

Nous faisons la simulation avec la commande `ns nom_fichier.tcl` pour un protocole déjà intégré dans la bibliothèque NS2, mais pour les protocoles ajoutés à l'aide d'un patch on doit spécifier la commande de l'exécution durant l'étape de l'installation du protocole, un fichier de trace de simulation est créé (`.tr`) est utilisé pour tracer le graphique et décrire le fonctionnement du protocole et le transfert de données durant la simulation et le fichier d'extension (`.nam`) pour créer une animation et montrer le la circulation des données dans le réseau ainsi que les mouvements et la mobilité des nœuds et la topologie de réseau.

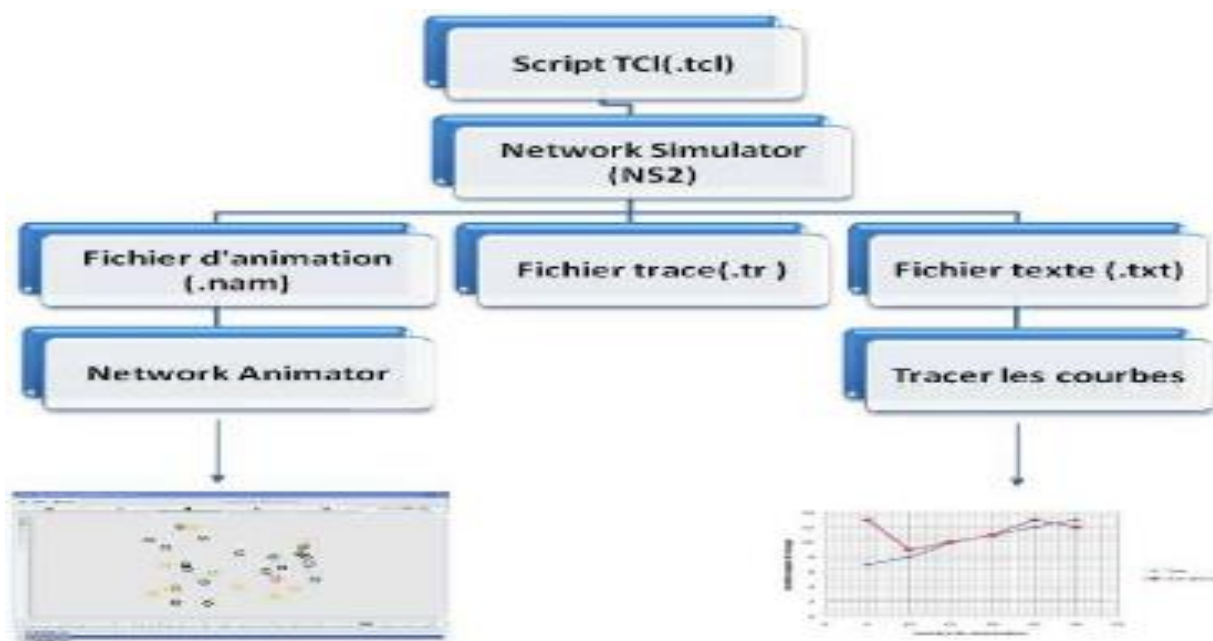


Figure 24: architecture NS2

5. Générateurs de mobilité pour les VANETs

Il n'y a pas un générateur de mobilité qui peut répondre à toutes les fonctionnalités souhaitées requises par la communauté de recherche. Les deux FreeSim et *Citymob* présente de bonnes caractéristiques de logiciels, mais ses plus grandes limitations apparaissent dans le fait de générer des traces qui ne supporte pas NS2 et aussi des cartes non définies par l'utilisateur. Par contre, SUMO, MOVE et VanetMobiSim tous ont de bonnes caractéristiques comme la portabilité, open source, interface graphique, la console, un grand nombre d'exemples disponibles en ligne, la facilité d'installation et d'utilisation. En particulier, VanetMobiSim fournit un excellent support de trace et peut importer des cartes de base de données TIGER / Line, VORONOI[67]. Sa description détaillée sera présentée par la suite. Ainsi une comparaison des différents générateurs de mobilité comme VanetMobiSim, SUMO[68], MOVE[69], FreeSim [70] et Citymob [71], est présenté dans le tableau 2

Pour notre étude nous avons utilisé le générateur de mobilité VanetMobiSim [72] qui est une extension de CanuMobiSim[73], un simulateur de mobilité basé sur Java et peut générer un mouvement dans différents formats, supportant différents outils de simulation pour les réseaux mobiles (NS2, QualNet, etc) CanuMobiSim fournit une architecture de mobilité efficace, facilement extensible, VanetMobiSim vise à élargir le soutien à la mobilité des véhicules de CanuMobiSim à un degré plus élevé de réalisme.

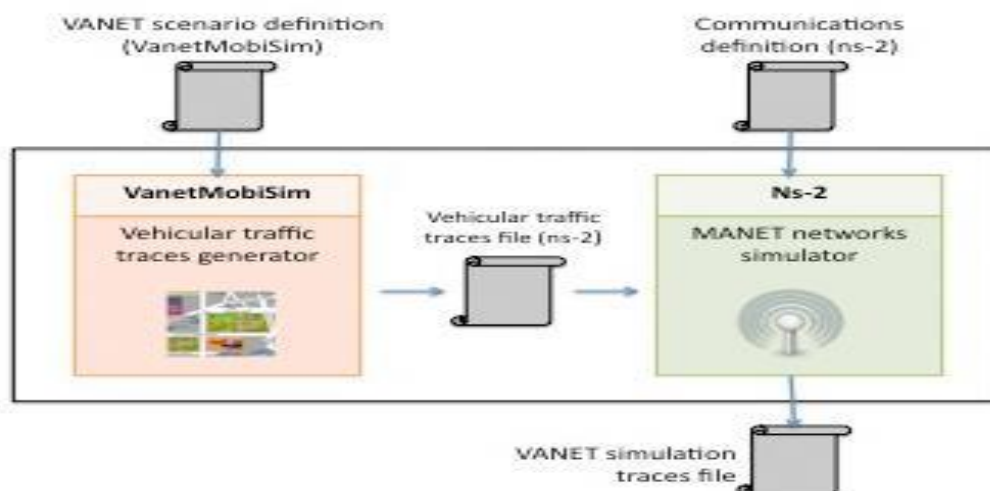


Figure 25: Système de simulation de VANET (VANETMOBISIM et NS2)[74]

Après la définition d'un scénario de mobilité dans un fichier XML, on lance VanetMobiSim qui est nécessaire pour produire un fichier de trace de mobilité en format NS2 (identificateur de nœud, le temps, la position, la vitesse, etc). Ce fichier doit être intégré dans le fichier de définition des communications du simulateur NS2, afin de produire en sortie un fichier trace de simulation des VANETs (voir figure 25).

Pour atteindre la circulation automobile réaliste des simulations du modèle de mobilité qui doit prendre en compte à la fois des caractéristiques macro-mobilité et de micro-mobilité du scénario qui seront présentés dans le chapitre suivant. VanetMobiSim a été sélectionné parce que les modèles de mobilité générés avec cet outil répondent à cette exigence. En outre, il a été choisi

parce qu'il est disponible gratuitement et ses traces de mobilité résultant peut avoir plusieurs formats pour être compatible avec plusieurs simulateurs de réseaux.

Métriques	VANETMOBISIM	SUMO	MOVE	FreeSim	CityMob
Portabilité	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Open source	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Interface graphique	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Exemples disponibles	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
Facilité d'installation	Moyen	Moyen	Facile	Facile	Facile
Facilité d'utilisation	Moyen	Difficile	Moyen	Facile	Facile
Utilisateur définit une carte	Oui	Oui	Oui	Non	Non
Support de trace NS2	Oui	Non	Oui	Non	Oui
Support de trace basé sur XML	Oui	Non	Non	Non	Non

Tableau 2: comparaison entre les générateurs de mobilité [74]

Parmi les caractéristiques principales de VANETMOBISIM on peut citer:

- Un générateur de modèle de mobilité open source.
- Spécifique pour les VANETs.
- Prend en charge à la fois spécification macro-mobilité et micro-mobilité.
- Utilise le code XML intuitive pour spécifier les différentes simulations.

Parmi Les points faibles de l'utilisation de ce logiciel est que : pour un modèle de mobilité complexe, la spécification d'un code XML énorme est nécessaire et il est partiellement pauvre en documentation offerte.

6. Modèles de mobilité dans l'environnement VANET

Les nœuds dans les réseaux Ad-Hoc peuvent être mobiles. L'évaluation des performances des protocoles dans les réseaux Ad-Hoc nécessite donc des tests dans des conditions réelles. Or, dans NS2 il est possible d'intégrer des modèles de la mobilité des nœuds pour rendre les simulations proches de la réalité. Un modèle de mobilité permet de générer un scénario de mouvement des nœuds et qui présente un modèle le plus proche du comportement humain normal.

Les modèles de mobilité utilisés pour la simulation des VANETs sont :

IDM :

Intelligent Driver Model est un modèle de mobilité pure, qui ne considère que l'ajustement de la vitesse du véhicule sur la base des paramètres du véhicule « accélération/décélération ». Chaque véhicule est limité par la vitesse du véhicule qui le précède, cela fonctionne bien avec les routes d'une seule voie, tandis que dans la plupart des scénarios (c -à- d. urbain ou autoroute) où les routes sont plus susceptibles d'être avec des voies multiples. En raison de cette limitation, l'IDM a été étendu avec les changements de voie (IDM-LC) et gestion de l'intersection (IDM-IM).

IDM-IM :

Intelligent Driver Model[75] with **Intersection Management** est une extension du modèle IDM, qui est capable de gérer d'une manière intelligente les intersections ainsi que de ralentir et s'arrêter ou agir selon des feux de circulation. Dans les deux cas, le conducteur doit réagir seulement en fonction du premier véhicule sur chaque route. Lorsqu'un véhicule se dirige vers une intersection gouvernée par des feux de signalisation, Il est informé par la description macroscopique de l'état. Si la couleur est verte, le passage est accordé et la voiture conserve sa vitesse actuelle à travers l'intersection. Si la couleur est rouge, la traversée est rejetée et que la voiture est forcée de ralentir et s'arrêter à la jonction de la route.

IDM-LC :

Intelligent Driver Model with Lane Changes[75], s'étend à l'origine du modèle IDM, c'est un modèle de mobilité qui offre des possibilités pour les véhicules d'alterner les voies et de dépasser les autres véhicules, en présence de routes à plusieurs voies «Multi-voies ». Ces deux caractéristiques se produisent avec la séparation des flux de trafic sur les différentes voies des routes similaires. Cependant, comme le nombre de voies peut varier d'une route à l'autre, dans le cas où un véhicule s'approche d'une intersection, il peut décider de continuer à circuler sur la même voie dans le côté de la route ou essayez de fusionner à sa droite (si la voie n'est pas présente dans le nouveau segment). Sinon, le véhicule doit s'arrêter et d'attendre jusqu'à ce qu'une place devient disponible.

7. Processus de simulation

L'objectif de cette étude est l'analyse et l'évaluation des protocoles de routage dans les VANET. Ces protocoles sont intégrés dans le simulateur NS2 et il y 'on a d'autres qui sont ajoutés à l'aide d'un patch et sont configurés par le langage C++ et le script TCL. Dans un premier temps, les fichiers de mobilité avec une variation de densité associé aux deux scénarios (urbain et Manhattan) et de trafic CBR avec une variation de charge sont générés et compilés séparément avant cz qui nous donne en résultat des fichiers en format tcl, ces fichiers vont être ajouter et intégrer dans le fichier tcl principal. Afin d'y avoir des fichiers trace et NAM contenant les données qui seront filtrer à l'aide du script AWK pour le calcul des métriques de performance des protocoles AODV et GPSR. En effet, l'utilitaire AWK est une extraction de données qui utilise un langage de script qui traite les fichiers de données, et plus particulièrement les lignes de ces fichiers qui ont un format similaire à celui des matrices. Il lit l'entrée d'une ligne à la fois. Puis la ligne est analysée ensuite l'action associée est exécutée. Et enfin on présente les résultats obtenus sur des graphes tracer avec EXCEL pour pouvoir évaluer les performances de chacun des protocoles. La figure 26 suivante résume et explique mieux le processus de simulation.

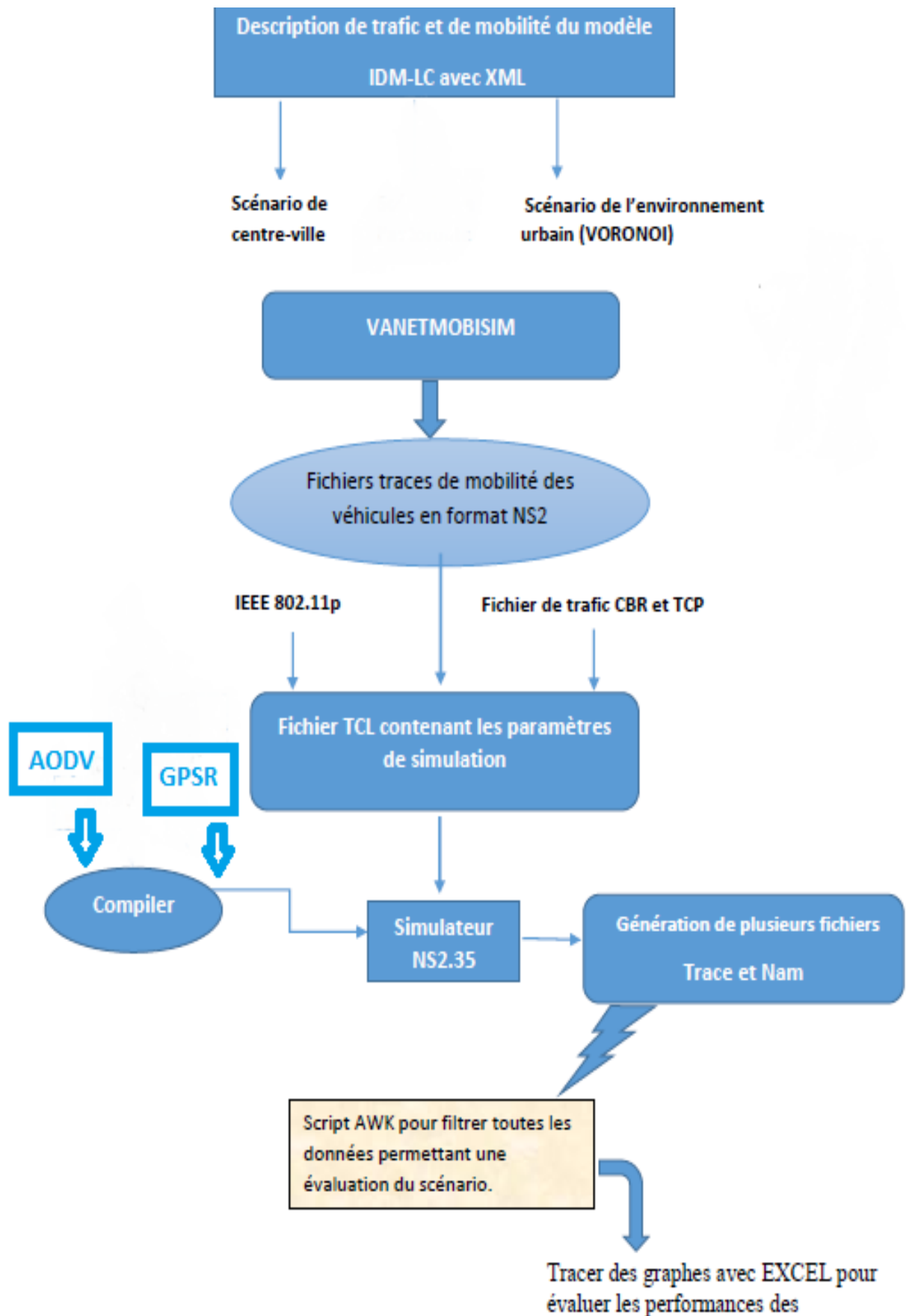


Figure 26: le Processus de simulation

8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté plusieurs outils de simulations ainsi que les différents générateurs de mobilité mais nous nous sommes focalisés principalement sur les outils choisis pour la simulation des protocoles ad hoc dans notre étude, l'outil de simulation sélectionné est composé d'un générateur de modèle de mobilité pour les VANETs, VanetMobiSim, et par un outil de simulation de réseau largement accepté comme NS2. Ce dernier fournit une réelle assistance dans le cas d'élaboration des réseaux complexes, pour pouvoir simuler les comportements théoriques des différents éléments du réseau. Le logiciel NS2 et son outil de visualisation NAM sont particulièrement adaptés à l'étude de réseaux complexes mettant en œuvre de nombreuses files d'attente, procédés de routage, types de trafics, etc.

Donc, toutes les fonctionnalités introduites par les deux, VanetMobiSim et NS2, sont nécessaires pour atteindre un niveau de réalisme suffisant pour simuler en toute confiance un réseau de type VANETs. Des résultats de simulation obtenus avec VanetMobiSim et NS2 seront présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre IV : Evaluation des performances des protocoles de routage dans un environnement VANET

1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter une étude comparative des performances et de fonctionnement de deux protocoles de routage ad hoc dans l'environnement VANET, dont l'un est Géographique (GPSR) et l'autre topologique (AODV), le routage de l'information dans les réseaux VANETs reste un domaine de recherche très intéressant et qui se développe très rapidement pour répondre au besoin des conducteurs et passagers. Plusieurs protocoles de routage ont été proposés pour les réseaux ad hoc notamment les réseaux véhiculaires Ad hoc pour bien circuler et acheminer les données en se basant sur plusieurs méthodes et algorithmes. Dans notre étude nous avons choisi les deux protocoles cités précédemment, notre objectif est d'analyser et étudier ces deux protocoles dans le scénario de centre-ville (Manhattan), et le scénario de l'environnement urbain. Afin d'examiner l'impact de la charge de trafic et de la densité du réseau sur leurs comportements.

Pour atteindre nos objectifs durant cette étude, nous avons suivi les étapes d'expérience présentés ci-dessous :

1. Réaliser plusieurs scénarios de mobilité (vitesse, nombre de véhicules, topologie).
2. Réaliser plusieurs variétés de trafic CBR en changeant le nombre de connexions CBR possibles.
3. Lancer les simulations des scénarios (Urbain et centre-ville), dans l'architecture de communication V2V avec une variation de la charge de trafic CBR de 5 à 25 connexions, et une variation de densité de 10 jusqu'à 50 véhicules.
4. Décrire, analyser et interpréter les résultats de la simulation.

Dans ce qui suit nous essayerons de bien décrire les deux scénarios utilisés ainsi que les différents critères de performance, et en spécifiant les paramètres qui nous ont permis d'avoir les résultats et d'établir les différentes courbes représentatives. La phase de choix de paramètres est une étape critique et très importante parce que le choix pertinent des métriques et des variables permet d'obtenir des résultats plus crédible.

2. Les scénarios de simulation

Durant cette étude nous avons utilisé deux différent scénario un pour le milieu urbain et l'autre pour le milieu centre-ville dans l'objectif d'être plus proche à la réalité, ces deux scénarios sont bien détaillés dans la suite.

Scénario urbain :

La topologie de route est basée sur un Graphe de Voronoi [67] dont la topologie de route est générée de façon aléatoire en créant une mosaïque de Voronoi sur un ensemble de points non uniformément répartis. Il reflète la distribution non uniforme des obstacles dans une zone urbaine. Le modèle de mobilité contient des chemins horizontaux et verticaux. Les nœuds sont placés au hasard sur la carte au début de la simulation et ils sont autorisés à changer leurs voies. Quand un nœud atteint l'intersection, il peut continuer de tourner à gauche, tourner à droite, ou aller au hasard.

✚ Scénario de centre-ville(Manhattan) :

Dans l'environnement de centre-ville, les rues sont disposées d'une manière prédéfinie. Dans ce modèle de mobilité, la vitesse de chaque véhicule sera lente par rapport au scénario urbain. Il y'aura des obstacles tels que les bâtiments, les arbres, etc. Ces obstacles vont conduire souvent à la déconnexion des liens de communication. Dans ce scénario, il existe des endroits d'arrêt aux feux de circulation, une grande densité de voitures, et des routes plus fréquentées que d'autres (routes principales, endroit commercial ou touristique). Il est nécessaire d'avoir une communication dans les deux sens, l'information se propage dans toutes les directions sur la densité du trafic, en particulier dans le cas des accidents routières.

3. Les modèles de simulation

a. Modèle de trafic

Dans un réseau, plusieurs protocoles sont utilisés en fonction du type de trafic nécessité par l'utilisateur (voix, données, photos ou vidéo). L'un des protocoles les plus connus et le plus utilisé dans les simulations est le protocole Constant Bit Rate (CBR), ce protocole est utilisé pour générer un trafic constant caractérisé par un taux de transmission des paquets fixe, et il est utilisé au niveau application du modèle OSI [76]. Et il nécessite une utilisation du protocole UDP au niveau de la couche transport de ce modèle. Tous ces protocoles sont détaillés dans le manuel d'utilisation du simulateur NS2, et pour faire cela nous avons utilisé le générateur de trafic automatique appelé CBRGEN, qui permet de générer le trafic d'une manière aléatoire.

Pour analyser le fonctionnement des protocoles de routage Ad hoc GPSR et AODV dans les deux scénarios utilisés, nous avons choisi un taux de transmission des paquets fixé à 8 paquets par seconde, avec variation du nombre de connexions entre 5 et 25 connexions CBR pour décrire l'impact de la charge sur les performances des protocoles de routage Ad hoc. Le trafic entre les nœuds est produit en utilisant le générateur de trafic CBRGEN cité avant, qui commence à des instants distribués uniformément entre 50s et 300s. Les paramètres de simulation NS2 utilisés dans les deux scénarios sont présentés dans le tableau suivant.

Paramètre	Valeur
Type de trafic	CBR/UDP
Taux de transmission pour le trafic CBR	8 paquets/seconde
Nombre de connexion	5, 10, 15, 20, 25

Tableau 3 : Paramètres du modèle de trafic

b. Modèle de mobilité

Pour la mobilité nous avons choisi l'outil VanetMobiSim qui est un simulateur de mobilité très puissant et qui permet de simuler des scénarios très proche à la réalité. Cet outil offre la possibilité d'utiliser le modèle de mobilité IDM-LC pour simuler des véhicules qui peuvent changer de voie et dépasser les uns les autres. Ce modèle est utilisé souvent dans l'analyse de performance des protocoles de routage. Les nœuds mobiles se déplacent dans une surface carrée de dimension 1000x1000 m² pour les deux scénarios centre-ville et urbain. Afin de décrire l'impact de la charge de trafic et de la densité sur les performances des protocoles AODV et GPSR, dans un premier temps on a fait varier le nombre de connexions entre 5 et 25 connexions pour un nombre de

véhicules fixé à 50, et dans un deuxième temps on a fixé le nombre de connexions à 15 et fait varier le nombre de nœuds entre 10 et 50. Les différents paramètres pour chaque scénario sont présentés ci-dessous :

▪ *Scénario urbain :*

Les véhicules se déplacent dans une section de 1 km x 1km, d'une vitesse entre 20km/h et 100km/h. L'ensemble de routes comprennent plusieurs intersections de routes réglementées par les feux de circulation ou des panneaux d'arrêt. Les paramètres sont présentés ci-dessous.

Paramètres	Valeurs
Générateur de mobilité	VanetMobiSim
Temps de simulation	300s
Aire du réseau Ad hoc	1000 m x 1000 m
Nombre de voie par route	2
Nombre de nœuds	10, 20, 30, 40, 50
Vitesse min – max	20 km/h – 100 km/h
Nombre maximum de feu de circulation	6
Modèle de mobilité	IDM-LC (Lane change)
Direction de la circulation routière	multidirectionnel

Tableau 4 : Paramètres de l'environnement urbain

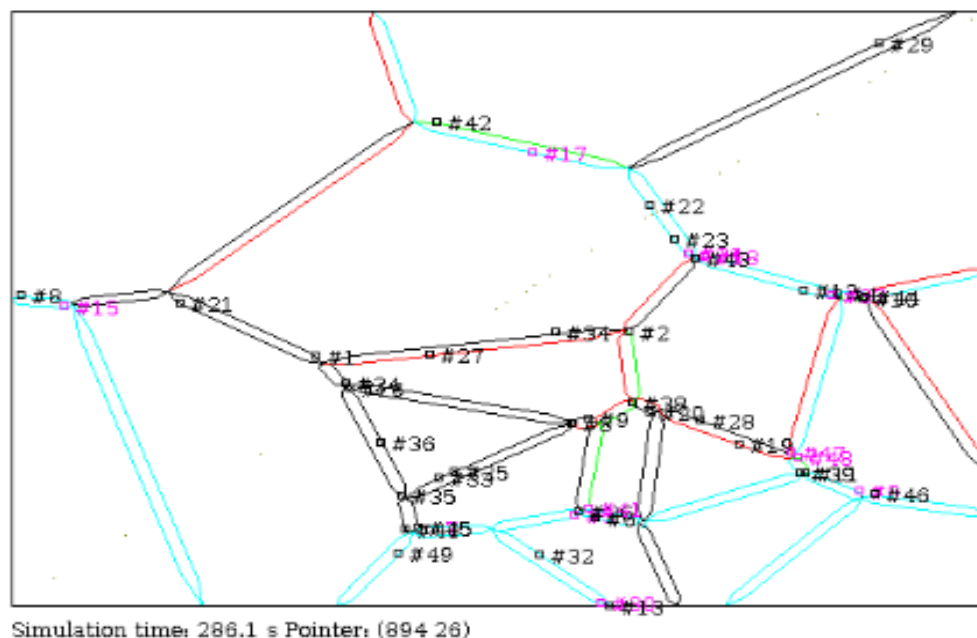


Figure 27: Environnement Urbain

▪ *Scénario de centre-ville :*

La vitesse des véhicules utilisés peut aller de 20km/h à 65 km/h. la communication est dans les deux sens et l'information se propage dans toutes les directions. Les différents paramètres sont montrés dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeurs
Générateur de mobilité	VanetMobiSim
Temps de simulation	300s
Aire du réseau Ad hoc	1000 m x 1000 m
Nombre de voie par route	2
Nombre de nœuds	10, 20, 30, 40, 50
Vitesse minimale	20km/h ← → 5.55m/s
Vitesse maximale	65km/h ← → 18.05m/s
Nombre d'intersection routière	25
Nombre maximum de feu de circulation	6
Modèle de mobilité	IDM-LC (Lane change)
Durée d'attente dans un feu de circulation	20s
Direction de la circulation routière	Multidirectionnel

Tableau 5: Paramètres de l'environnement centre-ville

Le résultat de la simulation est montré dans la figure suivante :

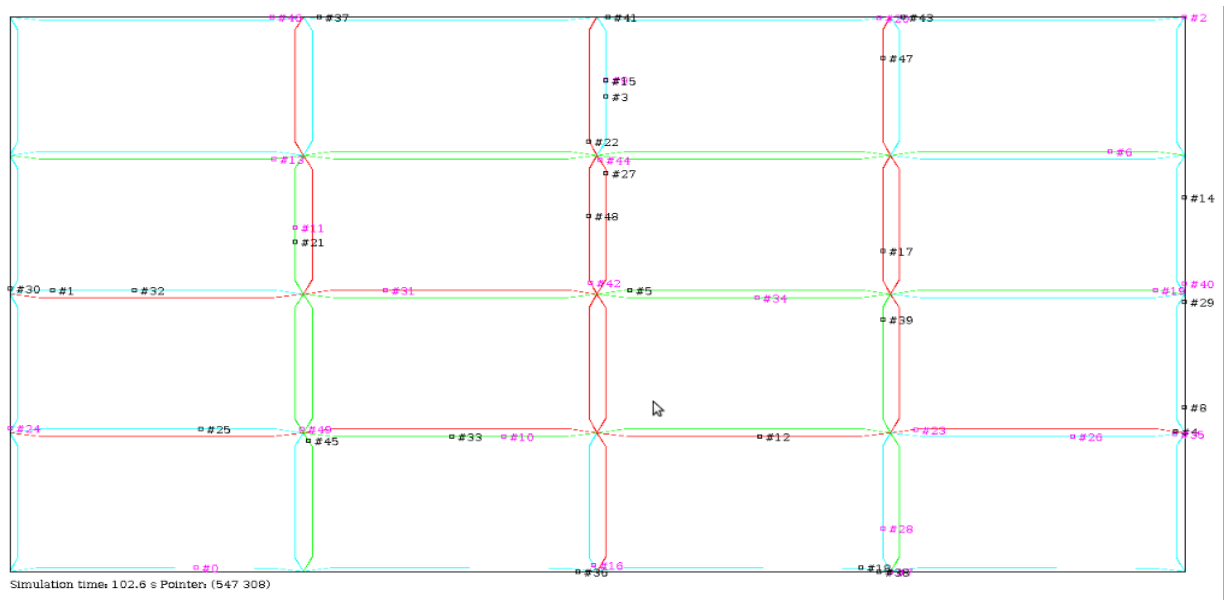


Figure 28: environnement centre-ville

Pour garantir la validité et la confidentialité du modèle de mobilité utilisé par rapport à l'environnement réel, il faut ajouter et intégrer deux modèles de mobilité : macroscopique et microscopique.

 Paramètres microscopique :

Pour simuler le mouvement de nœud à l'aide du modèle IDM_LC, qui régule la vitesse du véhicule en fonction des mouvements des véhicules voisins (par exemple, si une voiture à freins avant, les véhicules suivants ralentissent également).

Paramètres	Descriptions	Valeurs
L	Longueur de véhicule	5 m
A	Accélération maximale	0.6 m/s ²
B	Décélération	0.5 m/s ²
T	La distance de sécurité mesurée en seconde	1.5 s
S0	distance minimale de congestion	2 m
P	Facteur de politesse des conducteurs lors du changement de voie	0.5 s
ath	Seuil de l'accélération	0.2 m/s ²

Tableau 6 : Paramètres microscopiques

 Paramètres macroscopique :

Ils considèrent principalement les contraintes de topologie de routes, les bâtiments, panneaux de signalisation, etc. pour le modèle urbain un graphe aléatoire VORONOI est créé, il est construit en appliquant l'algorithme de tessellation de VORONOI à un ensemble de points répartis au hasard (obstacles). Il est possible de définir des zones (clusters) avec différents densité.

Clusters	Obstacles par 100m x 100m	Pourcentage de cluster dans la zone de simulation	Vitesse (km/h)
Centre-ville	2	10%	60
Résidentiel	5	40%	40

Rural	1	50%	100
-------	---	-----	-----

Tableau 7: exemple de modèle de mobilité macroscopique

4. Caractéristiques physiques :

Durant la simulation des trois scénarios, on utilise la norme IEEE 802.11p comme protocole de la couche MAC. Le modèle de propagation radio implémenté par les véhicules est le modèle Two-Ray-Ground pour prédire la puissance d'un paquet reçu par un véhicule récepteur qui se trouve à une distance d de l'émetteur.

Paramètres	Valeurs
Protocole MAC	IEEE 802.11p
Modèle de réflexion	Two-Ray-Ground
Portée de communication	250 m
Type de la file d'attente	Priqueue
Taille maximale de la file d'attente	50 paquets

Tableau 8 : Paramètres de la couche liaison de données et physique

Le modèle Two-Ray-Ground permet d'obtenir la puissance d'un signal reçu à une certaine distance d'un émetteur dans un environnement vide, tout en prenant en compte la réflexion des ondes sur le sol. Pour ce faire, les hauteurs d'antennes d'émission et de réception sont incluses dans l'équation du signal suivante :

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L}$$

Avec :

P_t la puissance du paquet envoyé.

G_t et G_r les gains, respectivement, de l'antenne de l'émetteur et de récepteur.

h_t et h_r les hauteurs, respectivement, de l'antenne de l'émetteur et de récepteur.

L est la probabilité de perte des données.

d est la distance entre le récepteur et l'émetteur.

5. Critères de performance :

L'objectif des expériences réalisées est d'analyser les métriques de performance des protocoles de routage AODV et GPSR. Chacune de ces métriques nous aide à mieux départager les protocoles suivant leurs propriétés dans différents scénarios. Elles nous aident aussi à trouver les écarts entre les protocoles simulés. Ces métriques sont :

✚ Le taux de paquet délivrés avec succès ou **PDR (Packet Delivery Ratio)** :

Il est défini comme le rapport, multiplié par 100, entre les paquets de données reçus au niveau de la destination sur le nombre de paquets de données envoyés par les sources.

✚ Le délai de bout en bout :

C'est le temps écoulé entre l'envoi d'un paquet par un émetteur et sa réception par le destinataire. Il comprend tous les retards possibles dans le réseau causé par la retransmission par les nœuds intermédiaires, retard de traitement, délai de file d'attente, et le retard de propagation.

✚ La gigue :

Elle est définie comme étant la différence de délai de bout en bout entre des paquets sélectionnés appartenant au même flux de données. Tous les paquets perdus sont ignorés de cette métrique.

✚ Le coût de routage :

C'est le rapport entre le nombre de tous les paquets de contrôle de routage envoyé et les paquets reçus par tous les nœuds. Cette mesure révèle le degré d'efficacité du protocole de routage. En effet, plus le nombre de paquets de contrôle est élevé, moins le protocole est efficace.

✚ L'efficacité :

C'est le rapport entre le nombre de paquets livrés qui sont transmis (les paquets de données) et les paquets de données plus les paquets de routage.

6. Résultats des simulations

Etude de l'influence de la charge et la densité sur le fonctionnement des protocoles de routage en mode de communication V2V :

Les simulations ont été faites en prenant en considération le plus possible des conditions réalistes à l'aide de l'outil de simulation NS2 et le générateur de mobilité VanetMobisim, ce dernier nous a permis de simuler deux scénarios différents, un Urbain et l'autre ressemble au centre-ville (Manhattan). Pour faire cela dans un premier temps nous avons fixé le nombre de nœud à 50 avec variation du nombre de connexion dans le réseau de 5 jusqu'à 25 connexions CBR, et dans un deuxième temps nous avons varié le nombre de nœuds appartenant à notre réseau de 10 à 50 nœuds en gardant la même charge CBR qui est fixé à 15 connexions.

a. Scénario urbain :

✚ Variation de la charge :

Dans la figure 29 illustre la variation du taux de paquets délivrés avec succès en fonction de la charge CBR, on remarque que le PDR était supérieur à 37% pour les deux protocoles, le PDR atteint le sommet pour les deux protocoles dans le cas de 5 connexions il atteint jusqu'à 100% pour le GPSR et 76% pour l'AODV, Les deux courbes décroissent en augmentant le nombre de connexion mais celle d'AODV décroît plus vite jusqu'elle atteint presque la moitié, par contre le PDR de GPSR diminue de 20%, ce qui montre que le protocole GPSR était plus performant que l'AODV en terme de PDR.

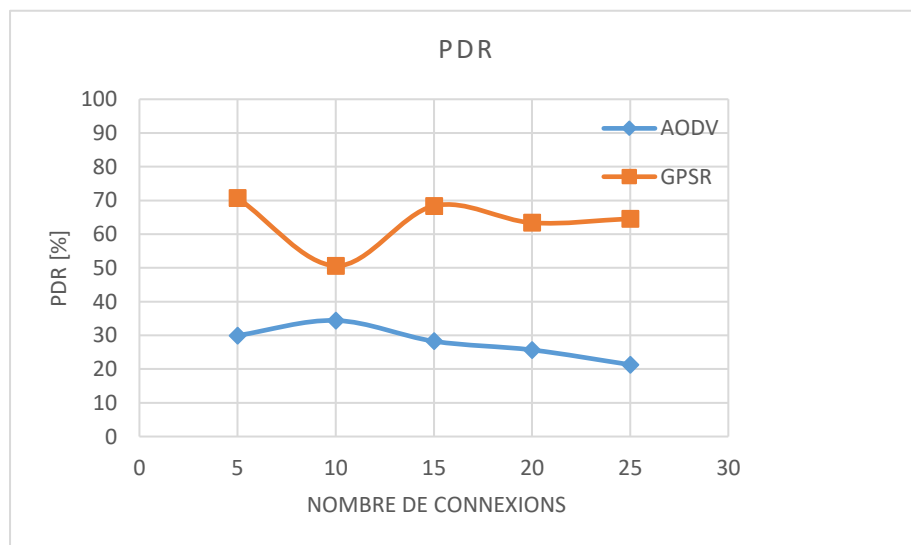


Figure 29: Taux de paquets délivrés en fonction de la charge CBR

Les variations du délai et de la gigue sont représentés sur les deux figures 30 et 31 respectivement. Le délai d'AODV se décroît de 280 ms pour 5 connexions vers 150 ms pour le cas de 15 connexions CBR et puis il augmente de nouveau jusqu'à atteindre son ancienne valeur (280 ms) dans le cas de 25 connexions, par contre le délai de GPSR est presque stable et tend vers 0, il est cent fois plus faible que celui d'AODV. Aussi pour la gigue la courbe de GPSR reste stable et tend vers 0 par contre la gigue d'AODV augmente en augmentant la charge de CBR, en général la différence de latence varie entre 50 et 130 ms.

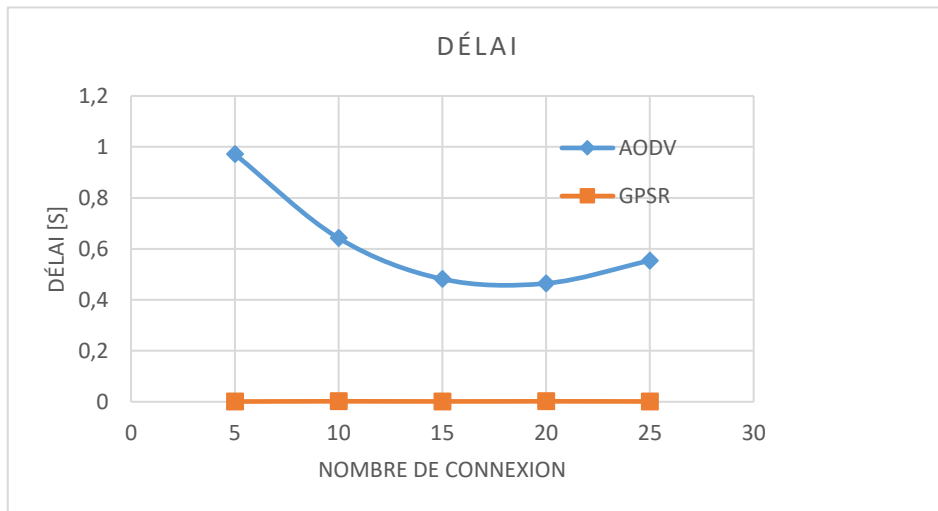


Figure 30 : Délai en fonction de la charge CBR

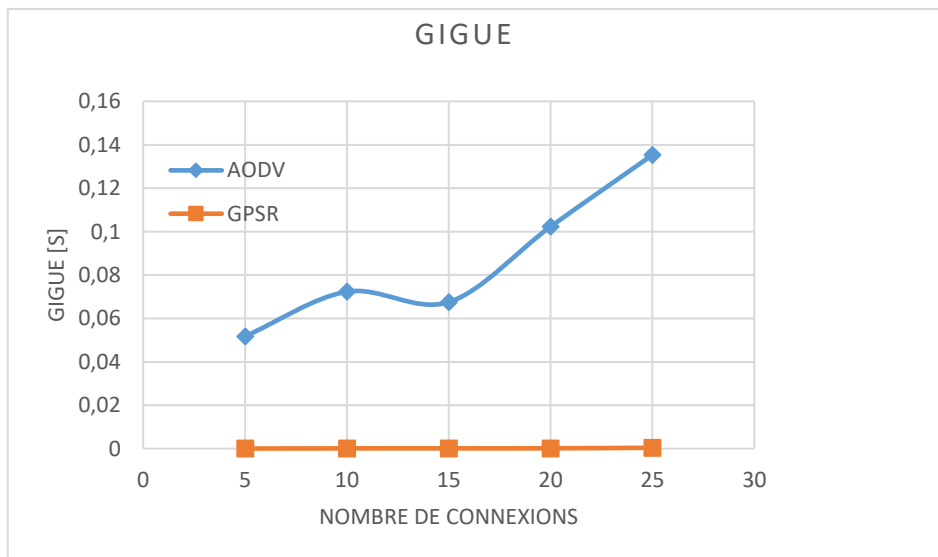


Figure 31: Gigue en fonction de la charge CBR

La figure 32 représente le nombre de paquet de contrôle nécessaire pour envoyer un paquet, dans laquelle il est très claire que le protocole AODV utilise plus de paquet de contrôle pour router les paquets de données de la source vers la destination et sa courbe varié proportionnellement avec le nombre de connexion CBR il atteint jusqu'à 11 paquets de contrôles pour le cas de 25 connexions CBR, parallèlement le cout de routage de GPSR est très faible et presque stable et il tend vers 0. La figure 33 montre une grande différence entre les deux protocoles en terme de l'efficacité aussi on remarque une amélioration importante de l'efficacité de GPSR quand le trafic GPSR augmente alors que celle d'AODV a connu une diminution de 40%.

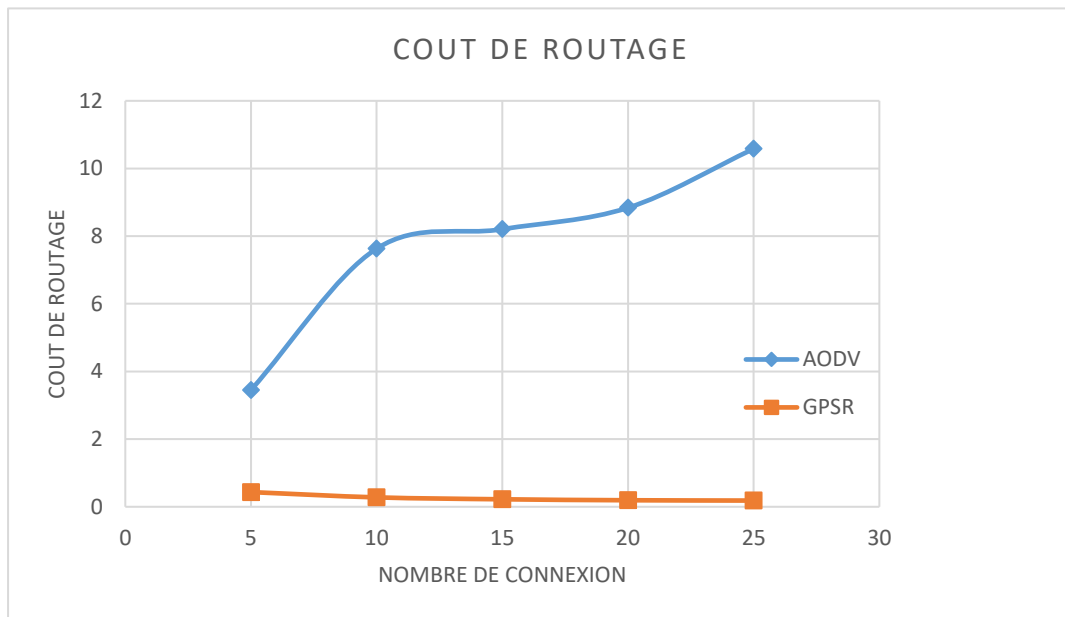


Figure 32: cout de routage en fonction de la charge CBR

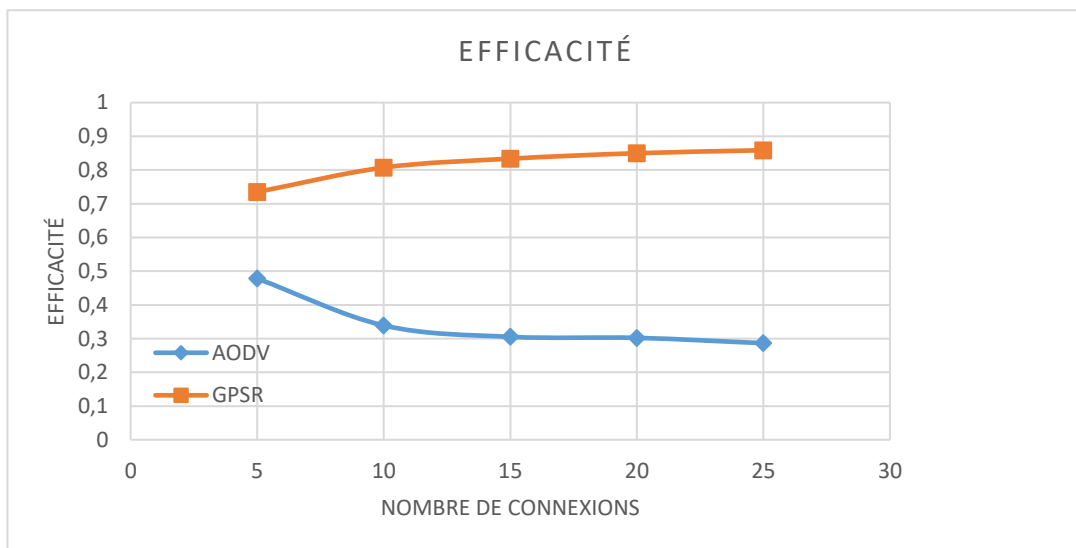


Figure 33 : Efficacité en fonction de la charge CBR

✚ Variation de la densité :

Dans la figure 34 le PDR de GPSR égale presque le double de celui d'AODV pour une densité de 10 nœuds ce qui montre une grande différence de performance entre les deux protocoles les deux courbes ont une variation lente et instable, celle de GPSR diminue jusqu'à atteindre 70% dans le cas de 30 nœuds puis elle augmente vers 80% dans le cas de 50 nœuds, celle d'AODV reste plus ou moins stable et varie entre 50 et 58%.

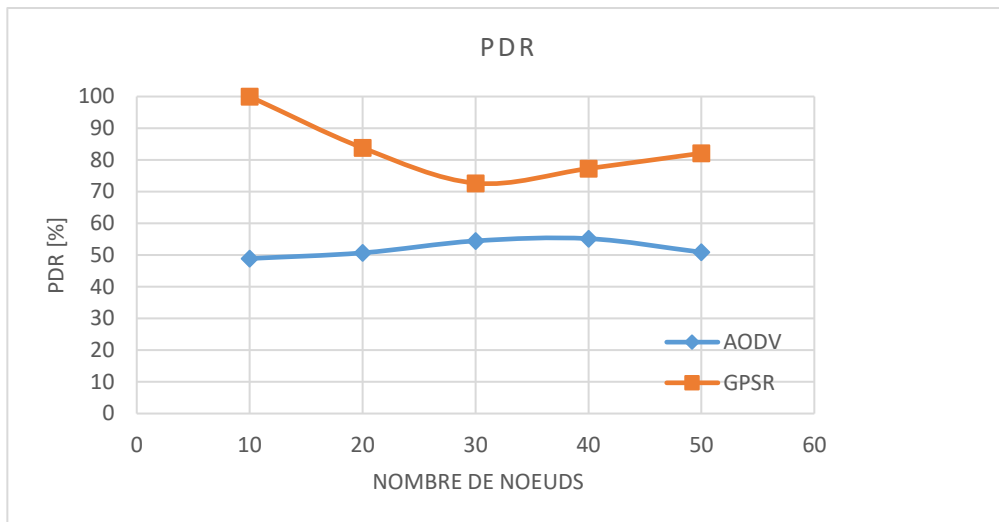


Figure 34 : Taux de paquets délivrés en fonction de la densité

En terme de délai et de gigue représenté respectivement par les deux figures 35, 36 on remarque que le délai d'AODV diminue en augmentant le nombre de nœuds par contre la gigue augmente, mais les deux restent stables et tendent vers zéro pour GPSR.

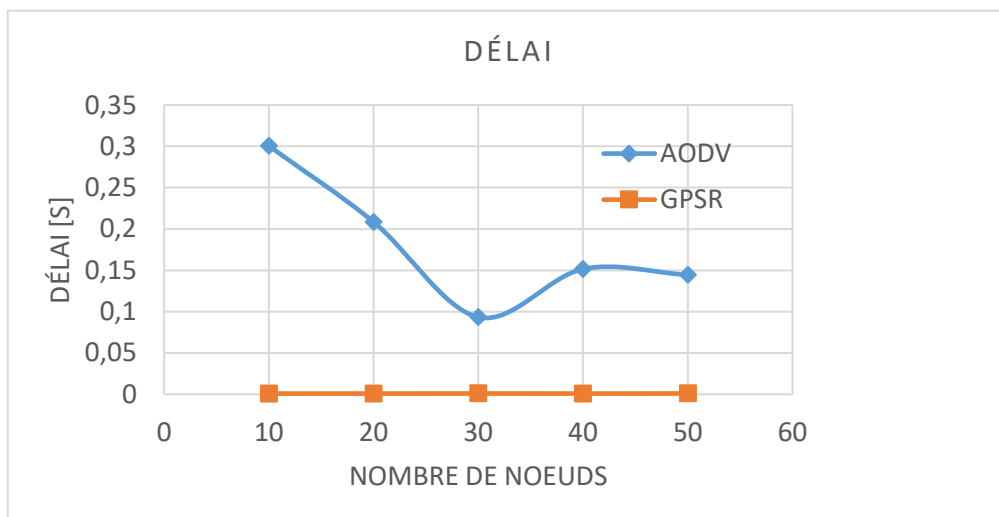


Figure 35 : Délai en fonction de la densité

Le coût de routage d'AODV (voir figure 37) augmente en augmentant la densité du réseau jusqu'à la nécessité de 8 paquets de contrôle pour faire router un paquet de données dans le cas de 50 nœuds ce qui augmente la charge du réseau et diminue les performances de routage, de l'autre côté le coût de routage de GPSR est très faible et stable. Dans la figure 38 l'efficacité de GPSR est significative et meilleure que celle d'AODV. L'efficacité des deux protocoles est influencée par la densité du réseau et diminue avec l'augmentation du nombre de nœuds mais avec une vitesse plus élevée dans le cas d'AODV ce qui reflète l'impact de son coût de routage qui était élevé.

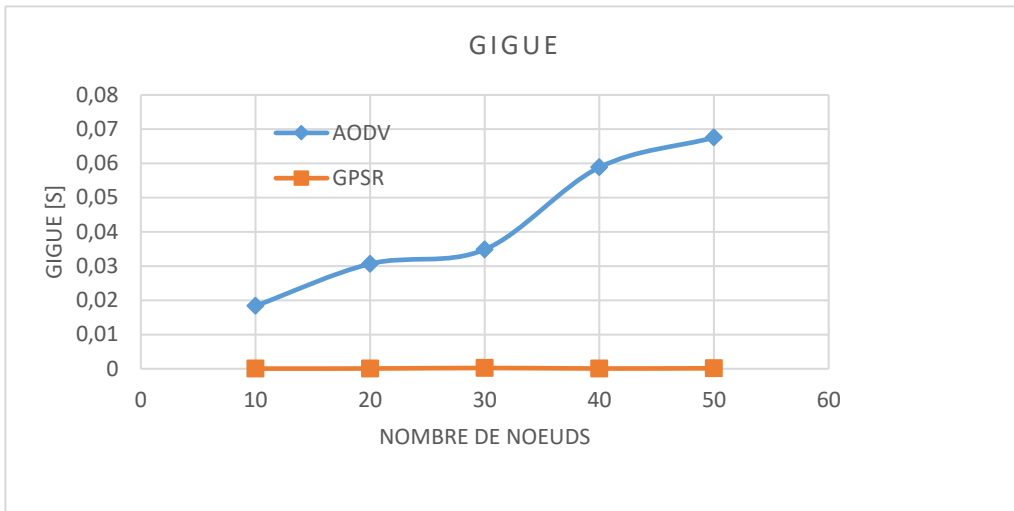


Figure 36: Gigue en fonction de la densité

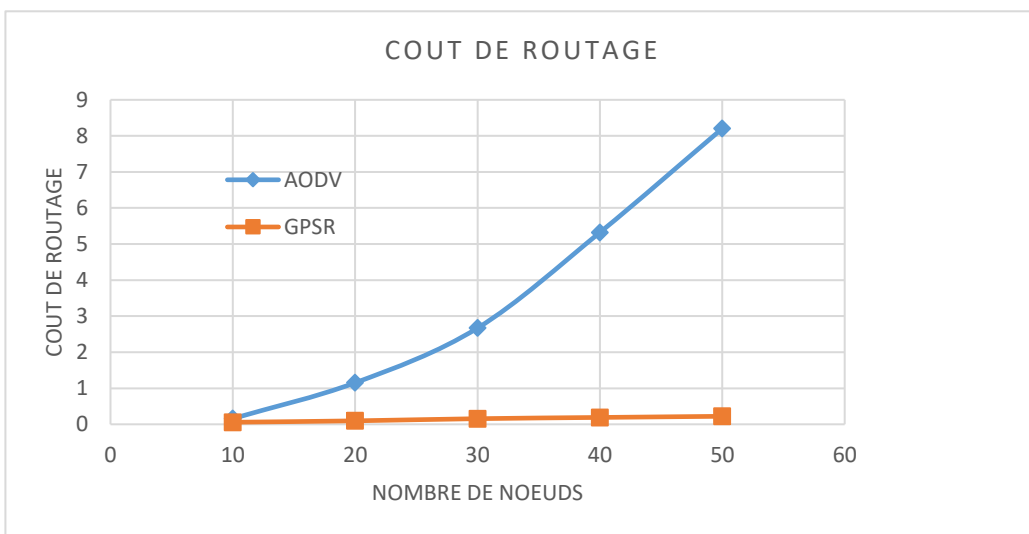


Figure 37 : Cout de routage en fonction de la densité

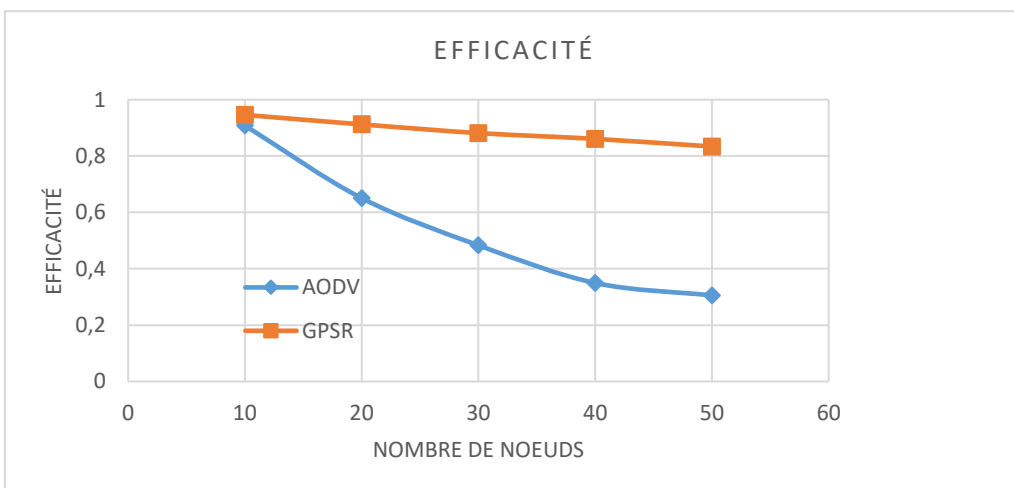


Figure 38: Efficacité en fonction de la densité

▪ *Interprétation des résultats :*

D'après l'analyse et l'étude des deux protocoles AODV et GPSR réalisé à l'aide de la simulation dans le scénario urbain de VANET, avec variation de la densité et de la charge, nous arrivons à interpréter les performances des deux protocoles en terme de différentes métriques d'évaluation, ainsi le tableau suivant montre cette interprétation :

Métriques d'évaluation	Densité		Charge	
	AODV	GPSR	AODV	GPSR
Protocoles	AODV	GPSR	AODV	GPSR
Taux de paquets délivrés avec succès	Moyen	Elevé	Moyen	Elevé
Délai de bout en bout	Elevé	Bas	Elevé	Bas
Gigue	Elevé	Bas	Elevé	Bas
Coût de routage	Elevé	Bas	Elevé	Bas
Efficacité	Elevé	Moyen	Bas Stable à forte densité	Elevé Stable à forte densité

Tableau 9 : Interprétation des résultats du scénario urbain

Seuil de PDR:

100>PDR>70 => élevé ; 70>PDR>40 => moyen ; PDR<40 => bas.

✚ *Analyse comparative :*

Les résultats de la simulation obtenus montrent une grande différence au niveau de la performance des deux protocoles avec une surperformance claire du protocole GPSR, soit face à la variation de la densité du réseau ou sa charge.

Le comportement réactif d'AODV offre un délai de transmission plus important par rapport à celui de GPSR et ceci est attendu de la part de AODV parce qu'il doit mettre à jour à chaque fois la table de routage lorsqu'une nouvelle connexion est établie. Ainsi que les messages de contrôles d'AODV sont légèrement plus nombreux que ceux de GPSR car il a besoin de déterminer une route valide à chaque fois quand un nœud la demande et en absence d'une qui est active ce qui nécessite une génération et un envoi de plusieurs paquets RREP et RREQ, ce qui augmente le coût de routage d'AODV pour une variation de la charge CBR et de la densité, ce qui est tout à fait normal parce qu'il y aura une grande quantité de messages échangés dans le cas d'une forte densité ou un trafic énorme. Par contre dans le cas de GPSR un nœud connaît déjà ses voisins qui appartient à sa zone à l'aide de l'échange périodique des paquets « beacon », donc à la demande d'une connexion ou un envoi de message il suffit de choisir un nœud appartenant à sa zone et qui est le plus proche de la destination.

Aussi au niveau du PDR le GPSR était plus performant que son concurrent AODV à cause de l'utilisation de l'algorithme de « Greedy Forwarding » ce qui permet d'assurer un bon acheminement de paquets, ainsi ceci est dû aux pertes des paquets de données quand les liaisons sont perdues pour le protocole AODV ce qui diminue fortement les performances de transmission à chaque échec dans les liaisons. Mais on remarque aussi une petite dégradation au niveau de taux de paquet délivrés avec succès pour GPSR, cette dégradation est peut-être dû à l'existence de quelques obstacles ou parfois à cause de l'envoi des paquets dans des mauvaises directions. La surperformance de GPSR au niveau de PDR et de cout de routage est apparue au niveau de l'efficacité à cause de l'utilisation d'un nombre réduit de message de contrôle ainsi de l'utilisation de la méthode de « Perimeter Forwarding » dans le cas de l'existence des obstacles.

b. Scénario centre-ville :

✚ Variation de la charge :

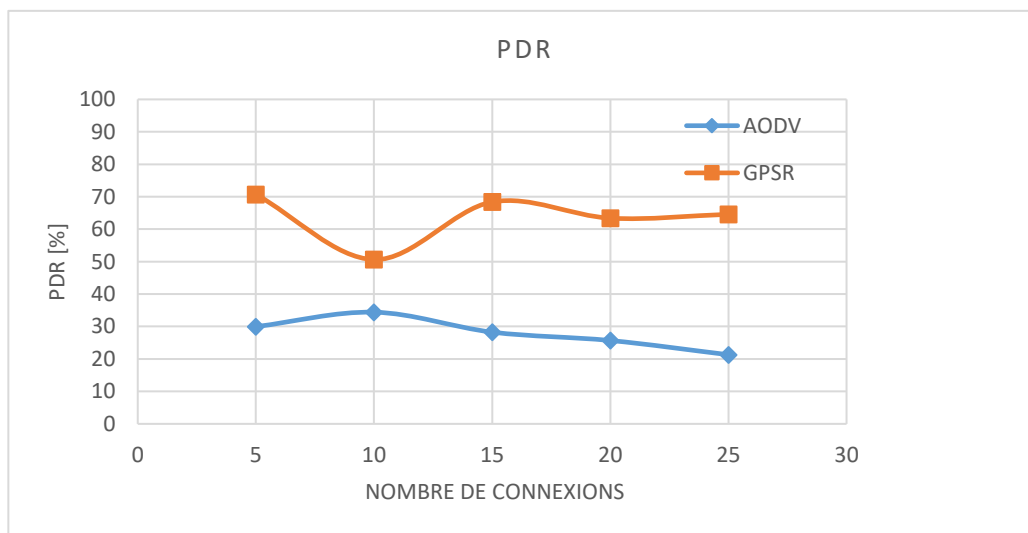


Figure 39: Taux de paquets délivrés en fonction de la charge CBR

Les courbes de taux de paquets délivrés avec succès dans la figure 39 montrent que le PDR de GPSR était mieux que le PDR d'AODV avec un pourcentage de 40% et sa courbe reste au-dessus de celle d'AODV tout au long de la variation de la charge CBR, il y a une petite variation au niveau de la courbe de GPSR qui diminue puis augmente, puis se stabilise à 65%, alors que celle de AODV a connu une dégradation significative de 30% vers 20% en faisant augmenter la charge du réseau de 5 vers 25 connexions CBR.

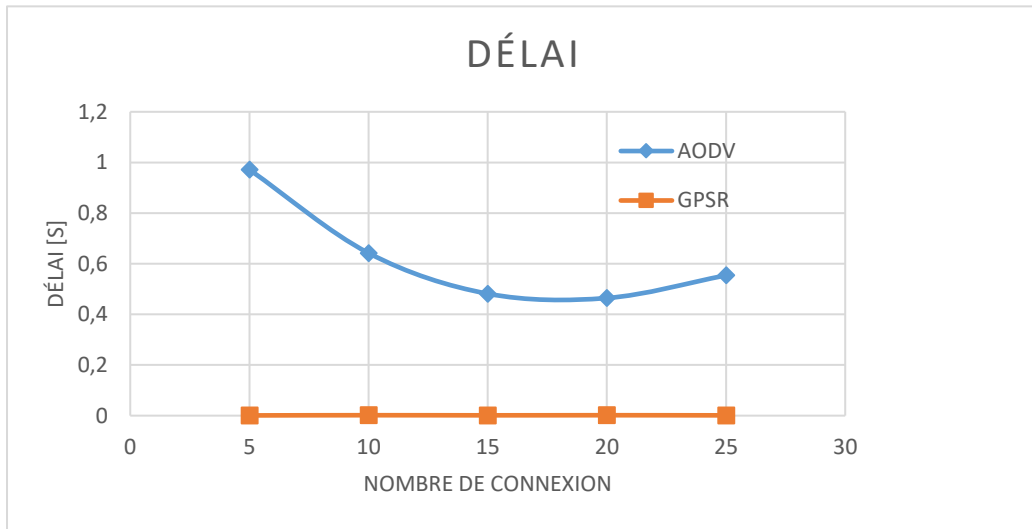


Figure 40: Délai en fonction de la charge CBR

La figure 40, 41 montrent que Le délai et la gigue pour AODV sont plus important (le délai atteint jusqu'à une seconde pour AODV dans le cas de 5 connexions) que celles de GPSR et ils décroît avec l'augmentation de la charge de trafic. Par contre il est presque stable et tend vers zéro pour GPSR (n'atteint même pas 10 ms).

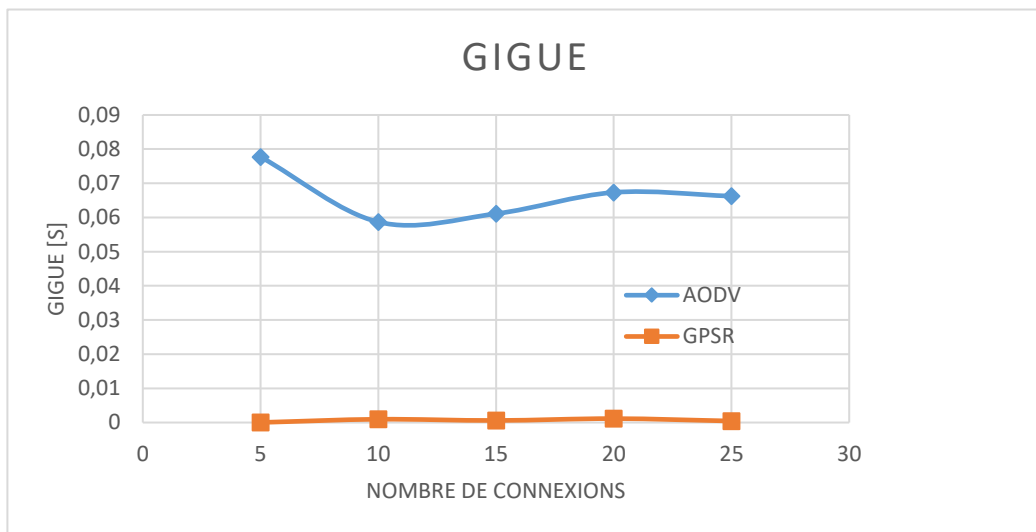


Figure 41: Gigue en fonction de la charge CBR

Les courbes illustrées dans la figure 42 montrent que le coût de routage est influencé par l'augmentation de la charge de trafic mais en générale reste tolérable pour les deux protocoles (entre 0,25 et 2,5 paquets de contrôles) avec une petite augmentation pour celui d'AODV que GPSR. La courbe d'AODV s'accroît avec l'augmentation de la charge de trafic, par contre il décroît dans le cas de GPSR. Pour l'efficacité montrée dans la figure 43, dans le cas de 5 connexions AODV était un peu plus efficace que son concurrent GPSR mais après l'augmentation de la charge de trafic l'efficacité d'AODV est diminuée par contre GPSR est devenu plus efficace et plus stable.

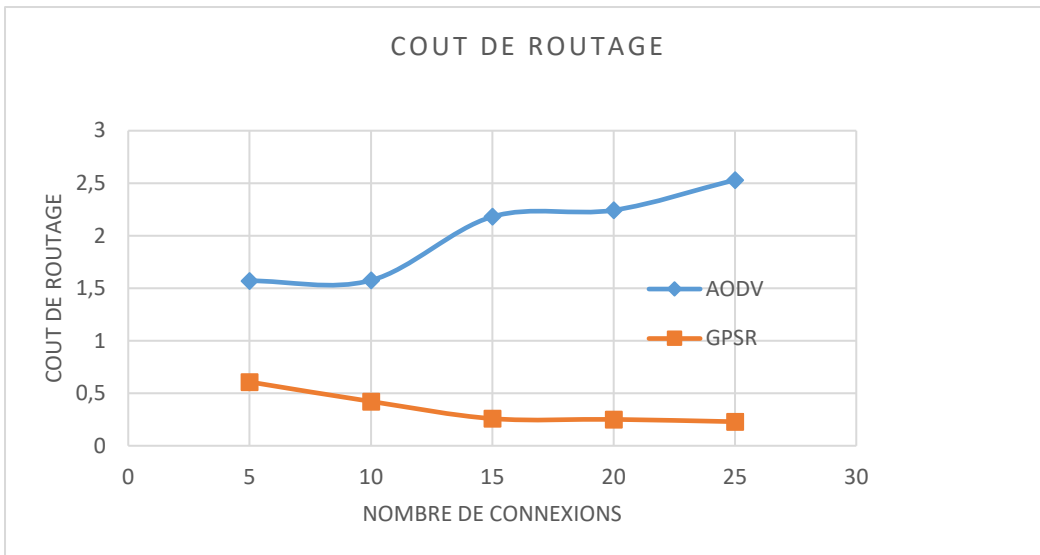


Figure 42 : Cout de routage en fonction de la charge CBR

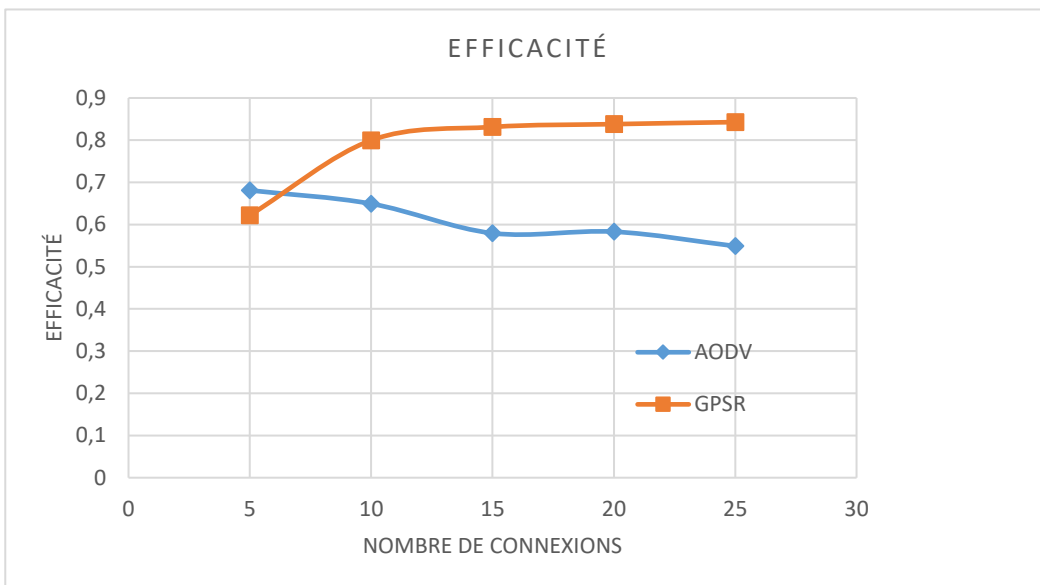


Figure 43: Efficacité en fonction de la charge CBR

Variation de la densité :

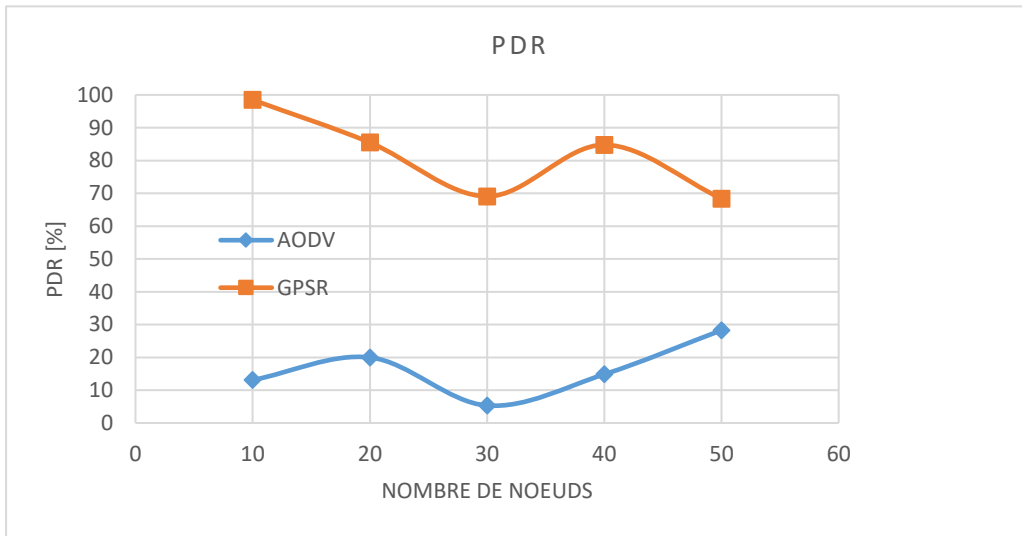


Figure 44: Taux de paquets délivrés en fonction de la densité

On remarque dans la figure 44 qui représente les courbes de PDR des deux protocoles une grande différence de taux de paquets délivrés avec succès entre les deux protocoles qui est de 90% pour le cas de 10 véhicules avec 100% pour GPSR et 10% pour AODV, allant d'un réseau moins dense vers un autre plus dense On constate une instabilité des valeurs, parfois une dégradation

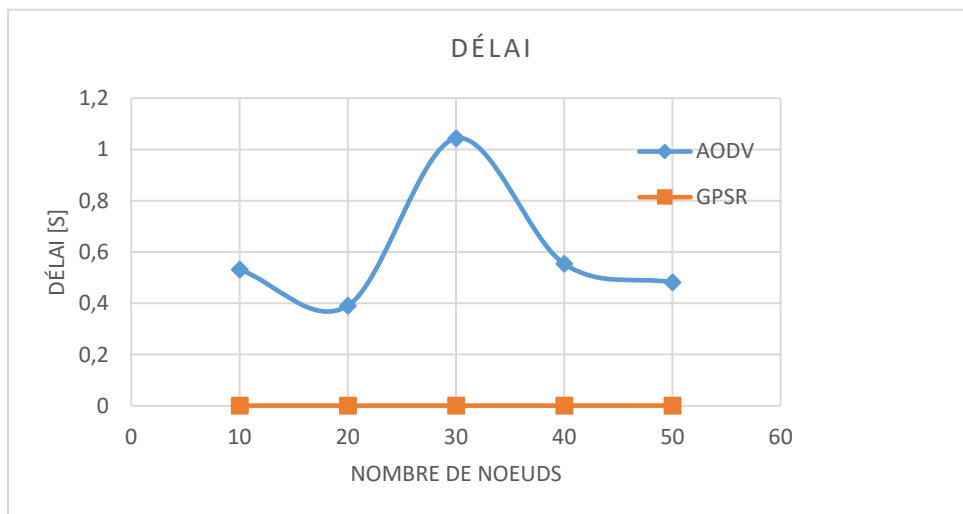


Figure 45: Délai en fonction de la densité

ou augmentation des valeurs de PDR pour les deux protocoles, mais en générale le PDR de GPSR diminue jusqu'à 70% qui reste aussi une bonne valeur, par contre celui de AODV augmente mais il reste très faible (ne dépasse pas 30%).

En terme de délai et de gigue, les figures 45, 46 montrent que le Protocole GPSR performe mieux que l'AODV avec une différence remarquable, le délai du GPSR est très faible et tend vers 0, voir négligeable par rapport à celui d'AODV qui dépasse 1 seconde dans le cas de 30 nœuds. Ainsi la gigue d'AODV augmente dans le cas d'un réseau dense.

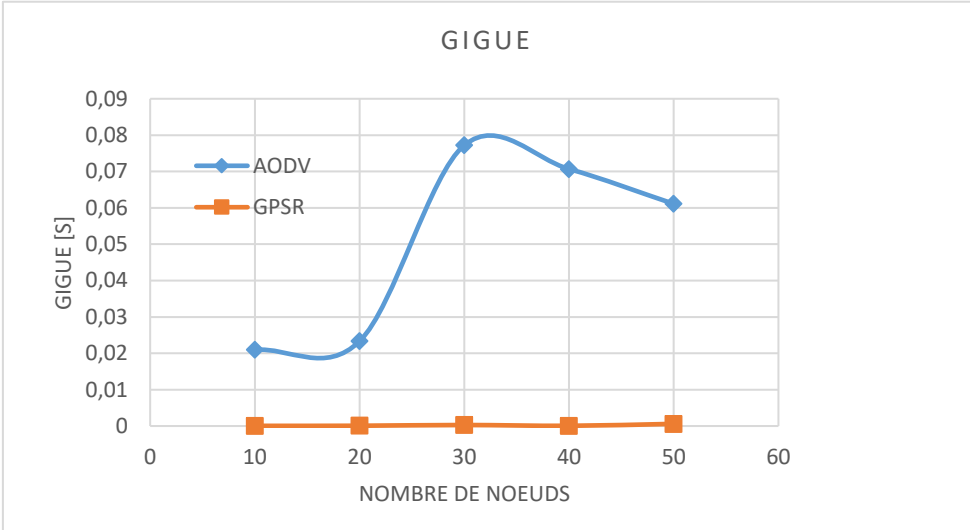


Figure 46: Gigue en fonction de la densité

Le coût de routage de GPSR (voir figure 47) est meilleur que celui de AODV, la courbe de GPSR reste au-dessous de celle d'AODV, le cout de routage des deux protocoles est influencé par la

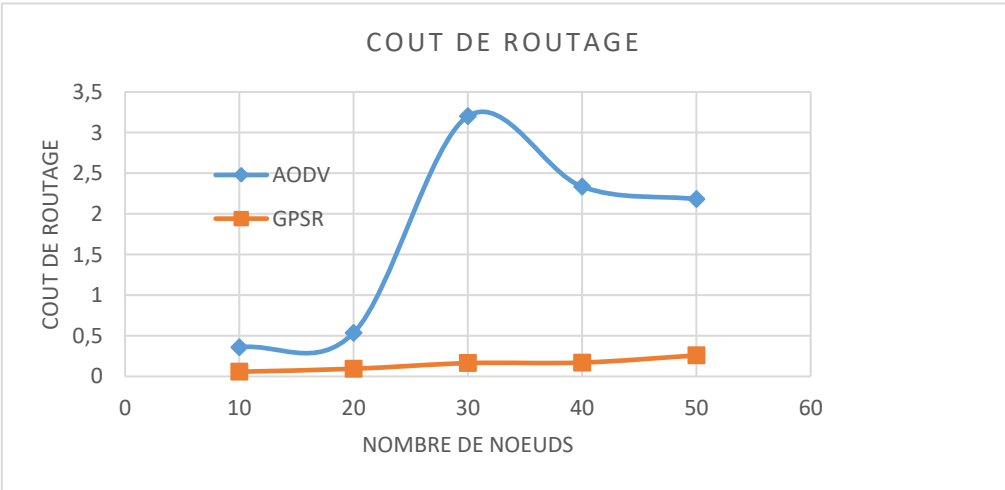


Figure 47: Cout de routage en fonction de la densité

densité du réseau mais d'une manière plus importante pour AODV qui a connu une augmentation rapide et significative de moins de 0,5 paquet de contrôle à plus de 3 paquet. En générale l'efficacité des deux protocoles (figure 48) varie entre 0,45 et 0,95 avec une performance plus

importante pour GPSR, l'efficacité est diminuée en augmentant la densité du réseau ce qui reflète les résultats obtenus au niveau de cout de routage.

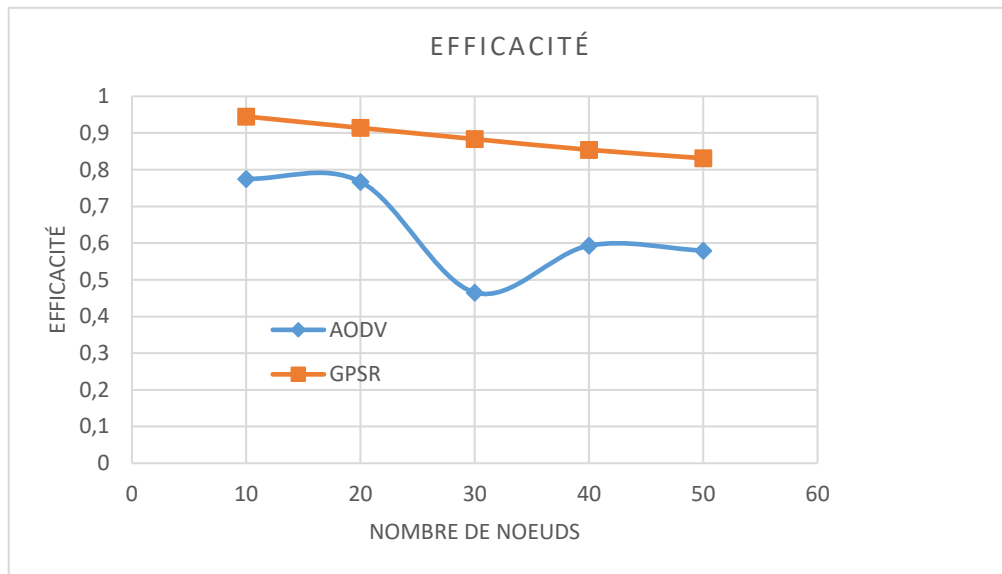


Figure 48: Efficacité en fonction de la densité

▪ *Interprétation des résultats :*

Après avoir fait l'analyse réalisée à l'aide de la simulation des protocoles AODV et GPSR dans le scénario Manhattan de réseau VANET, nous pouvons interpréter les performances des deux protocoles en termes de différents métriques d'évaluation, comme le montre le tableau suivant :

Métriques d'évaluation	Densité		Charge	
	AODV	GPSR	AODV	GPSR
Protocoles	AODV	GPSR	AODV	GPSR
Taux de paquets délivrés avec succès	Bas	Elevé	Bas	Moyen
Délai de bout en bout	Elevé	Bas	Elevé	Bas
Gigue	Elevé	Bas	Elevé	Bas
Cout de routage	Moyen	Bas	Moyen	Bas
Efficacité	Elevé	Moyen	Moyen	Elevé

Tableau 10: Interprétation des résultats du scénario centre-ville

Analyse comparative :

D'après les résultats de la simulation des protocoles de routage en utilisant l'outil de simulation NS2, avec variation du trafic et de la densité du réseau. Nous constatons que le protocole GPSR performe bien en termes de paquets délivrés avec succès et surtout dans le cas de la variation de la densité. Et ceci s'explique par une perte réduite dans le réseau à cause de la capacité d'éviter les obstacles à l'aide de la méthode « Perimeter Forwarding », et de choisir le meilleur nœud suivant qui va assurer l'acheminement du paquet au destination, aussi la forte densité permet au GPSR de trouver toujours un nœud relais qui va transmettre le paquet et il n'y aura pas des nœuds isolés, mais en remarque aussi une dégradation du PDR pour le GPSR au niveau d'un réseau très chargé, cela est dû aux caractéristiques des VANETS (changement de topologie rapide et fréquente et la forte mobilité des nœuds) ce qui peut inciter des boucles de routages et des pertes de paquets.

Aussi, en termes de délai, de gigue c'est le protocole GPSR qui a eu de bonne performance. Cela est expliqué par le fait que le protocole AODV fait appel à une procédure de découverte de route avant la transmission des paquets et aussi des longs délais d'attente. Tandis que le protocole GPSR utilise les messages Hello pour rafraichir périodiquement sa table de voisinage, ce qui rend le protocole GPSR très efficace pour le routage des données en temps réel en particulier les données multimédias.

Ainsi, GPSR est performant en terme de coût de routage à cause de ses fonctionnalités qui permet de rechercher des routes optimales en cas d'absence des obstacles et il diminue le nombre de messages de contrôle diffusés sur le réseau. On remarque aussi une perte de paquets significative pour AODV les deux cas (changement de la densité et de la charge), cette dernière s'explique par les ruptures des liaisons de communication provoquées par l'éloignement des véhicules qui composent les chemins entre les émetteurs et les récepteurs ainsi que l'existence des obstacles.

En termes d'efficacité, le protocole GPSR a eu une performance mieux qu'AODV pour les deux cas. Et ceci est cohérent avec le nombre de message de contrôle qui est réduit pour des données émis dans le réseau VANET, et le taux de paquet délivré avec succès qui est très important pour GPSR par rapport à celui d'AODV.

7. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était l'évaluation et la comparaison des performances des protocoles de routage GPSR et AODV dans les deux scénarios, urbain et centre-ville selon le PDR, le cout de routage, le délai moyen de bout en bout, la gigue et l'efficacité en faisons varier le nombre de connections CBR ainsi que le nombre de véhicules et évaluer l'impact de la densité ainsi que la charge sur un réseau VANET. Ces simulations ont été faite selon une architecture V2V en utilisant la norme 802.11p et elles ont montré le comportement et le fonctionnement de chaque protocole, les résultats sont analysés et interprétés à l'aide du langage awk. Le protocole géographique GPSR était plus performant que son concurrent topologique AODV dans la majorité des cas et au niveau de toutes les métriques de performance à cause de son principe basé sur la localisation et sa capacité d'éviter les obstacles ce qui permet de minimiser les paquets perdus et d'améliorer le PDR, ainsi en terme de délai le GPSR a eu un délai très faible par rapport à celui d'AODV puisque l'AODV nécessite à chaque fois une détermination des routes à la demande à cause de son comportement réactif, ce qui rend le GPSR très efficace pour les application en temps réel. Les deux protocoles performant mieux dans le milieu urbain que dans le milieu Manhattan.

Conclusion et perspectives

Notre objectif et intérêt durant ce travail était de comparer et évaluer les performances des protocoles de routage dans l'environnement VANET. Ce travail m'a permis d'avoir une idée sur ce type de réseau et connaître le fonctionnement et le comportement des différents types de protocoles de routage à savoir les protocoles topologiques basée sur la topologie du réseau que ce soit proactifs, réactifs ou hybrides. Ainsi que les protocoles géographiques qui se basent sur la localisation et la position géographique des nœuds. La conception et la mise en œuvre d'un protocole de routage dans les réseaux VANET est un grand défi parce qu'il doit assurer une stratégie qui garantit à n'importe quel moment, la connexion entre n'importe qu'elle paire de véhicules appartenant au réseau. Cette stratégie doit prendre en considération les changements de la topologie du réseau, ainsi que d'autres caractéristiques comme la bande passante, le nombre de liens, etc. pour cela nous avons identifié et défini plusieurs protocoles utilisés dans la littérature afin de discuter et analyser leurs points faibles et forts. Plus particulièrement on a choisi d'étudier et analyser le fonctionnement et le comportement des deux protocoles de routage AODV et GPSR et d'évaluer et comparer leurs performances dans les deux milieux : urbain et centre-ville qui sont générés à l'aide de générateur de mobilité VANETMOBISIM. Cette comparaison est faite en utilisant l'outil de simulation NS2 pour simuler une architecture V2V pour un trafic CBR en faisant varier le nombre de connexions CBR ainsi que le nombre de véhicules. Les résultats obtenus ont montré que les deux protocoles performant mieux dans le milieu urbain que dans le milieu centre-ville et ça peut être dû à l'existence de plusieurs obstacles et feux de signalisation au niveau de scénario Manhattan. Ainsi ils ont montré que le Protocole GPSR est plus performant que son concurrent AODV selon toutes les métriques de performance à savoir le délai, le coût de routage, la gigue, le PDR, l'efficacité est ce à cause du mécanisme de protocole GPSR qui utilise deux modes d'acheminement de paquets le « greedy forwarding » qui s'applique dans le cas normal et le « perimeter forwarding » qui est utilisé dans le cas de l'existence d'un obstacle, et aussi à la nature réactif d'AODV qui nécessite à chaque fois de déterminer une nouvelle route ce qui augmente son délai moyen de bout en bout alors qu'il est très faible pour le protocole GPSR ce qui le rend efficace pour les applications en temps réel.

nous avons pu remarquer que l'étude de l'utilisation d'infrastructure de bord de route RSU est rarement abordée dans l'évaluation des protocoles dans la littérature, c'est pour cela nous avons fait une recherche sur cette infrastructure et nous avons commencé une simulation de cette dernière en liant les véhicules avec des serveurs FTP et CBR en utilisant les RSUs comme des passerelles, avec une connexion filaire entre les RSUs et les serveurs, mais malheureusement nous avons rencontré des problèmes de simulation avec cet architecture, et voir les contraintes du temps nous avons décidé de réaliser cette architecture dans un prochain travail en ajoutant aussi un trafic multimédia (vidéos, voix, ...). De plus nous avons remarqué que malgré la surperformance et l'efficacité du protocole géographique GPSR, ce dernier manque une amélioration au niveau de son comportement. Même si le mode « perimeter forwarding » donne la possibilité au paquet d'éviter et de traverser un milieu avec des obstacles, mais il cause aussi une augmentation au niveau du délai, aussi le protocole GPSR ne choisit pas toujours le bon chemin puisqu'il choisit toujours le nœud le plus proche de la destination et il ne prend pas en considération la liste d'attente au niveau de prochain nœud, le débit et l'état de lien utilisé. Donc l'un des prochains objectifs est d'effectuer une amélioration au niveau de GPSR, puis l'évaluer et la comparer avec la version originale dans plusieurs scénarios et plusieurs types de trafic.

Références

- [1] « ISO 24102-1:2013 - Intelligent transport systems -- Communications access for land mobiles (CALM) -- ITS station management -- Part 1: Local management ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/standard/61561.html>. [Consulté le: 26-mai-2017].
- [2] C. E. Perkins et E. M. Royer, « Ad-hoc on-demand distance vector routing », in *Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, 1999. Proceedings. WMCSA '99, 1999*, p. 90-100.
- [3] « GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks - Semantic Scholar ». [En ligne]. Disponible sur: </paper/GPSR-greedy-perimeter-stateless-routing-for-wirele-Karp-Kung/1429695381f94e920d138c37a9f364b18cad265a>. [Consulté le: 26-mai-2017].
- [4] D. B. Johnson et D. A. Maltz, « Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks », in *Mobile Computing*, T. Imielinski et H. F. Korth, Éd. Springer US, 1996, p. 153-181.
- [5] D. A. Maltz et D. B. Johnson, « The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4 ». [En ligne]. Disponible sur: <https://tools.ietf.org/html/rfc4728>. [Consulté le: 26-mai-2017].
- [6] M. Natkaniec, « Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Principles, Protocols, and Applications (Sarkar, S. K. et al.; 2008) [Book Review] », *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, n° 5, p. 12-14, mai 2009.
- [7] « Van2006amastersthesis.pdf » . .
- [8] E. M. Royer et C.-K. Toh, « A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks », *IEEE Pers. Commun.*, vol. 6, n° 2, p. 46-55, avril 1999.
- [9] S. Naimi, « Gestion de la mobilité dans les réseaux Ad Hoc par anticipation des métriques de routage », phdthesis, Université Paris Sud - Paris XI, 2015.
- [10] A. A. Ahizoune, « Un protocole de diffusion des messages dans les réseaux véhiculaires », oct. 2011.
- [11] « Connected Vehicle Pilots Coming to a (US) Region Near You / Smart City Alliance », *Smart City Alliance*. [En ligne]. Disponible sur: <https://smartcityalliance.ca/applied-smarts/connected-vehicle-pilots-coming-to-a-usa-region-near-you/>. [Consulté le: 26-mai-2017].
- [12] F. D. da Cunha, A. Boukerche, L. Villas, A. C. Viana, et A. A. F. Loureiro, « Data Communication in VANETs: A Survey, Challenges and Applications », INRIA Saclay ; INRIA, report, mars 2014.
- [13] M. Jerbi, *Protocoles pour les communications dans les réseaux de véhicules en environnement urbain : routage et geocast basés sur les intersections*. Evry-Val d'Essonne, 2008.
- [14] M. Fiore, J. Harri, F. Filali, et C. Bonnet, « Vehicular Mobility Simulation for VANETs », in *Simulation Symposium, 2007. ANSS '07. 40th Annual, 2007*, p. 301-309.
- [15] A. Sulaiman, « Certificate less Message Authentication Protocols Using Pseudo Id and Hash Chain Techniques for Scalable Vanets », *University*, janv. 2015.
- [16] J. Petit, « Surcoût de l'authentification et du consensus dans la sécurité des réseaux sans fil véhiculaires », phdthesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2011.
- [17] « A comparative analysis of DSRC and 802.11 over Vehicular Ad hoc Networks », *ResearchGate*. [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/228627593_A_comparative_analysis_of_DSRC_and_80211_over_Vehicular_Ad_hoc_Networks. [Consulté le: 26-mai-2017].
- [18] apoorvsaxena4, « PHY LAYER : IEEE 802.11p », *The Theory of vehicle communication*, 07-juin-2015. .
- [19] D. Jiang et L. Delgrossi, « IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments », in *VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference, 2008*, p. 2036-2040.

- [20] « The Physical Layer of the IEEE 802.11 p WAVE Communication Standard: The Specifications and Challenges (PDF Download Available) », *ResearchGate*. [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/279474688_The_Physical_Layer_of_the_IEEE_80211_p_WAVE_Communication_Standard_The_Specifications_and_Challenges. [Consulté le: 26-mai-2017].
- [21] T. C. Gouvernement du Canada, « Sécurité routière au Canada », 10-mai-2011. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.tc.gc.ca/fra/securiteautomobile/tp-tp15145-1201.htm>. [Consulté le: 26-mai-2017].
- [22] E. ohammed, *Contribution à la sécurisation des réseaux ad hoc véhiculaires*. 2014.
- [23] M. Mauve, J. Widmer, et H. Hartenstein, « A survey on position-based routing in mobile ad hoc networks », *IEEE Netw.*, vol. 15, n° 6, p. 30-39, nov. 2001.
- [24] « Introduction to Algorithms », *MIT Press*. [En ligne]. Disponible sur: <https://mitpress.mit.edu/books/introduction-algorithms>. [Consulté le: 26-mai-2017].
- [25] D. Bertsekas et R. Gallager, *Data Networks (2Nd Ed.)*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1992.
- [26] C. E. Perkins et P. Bhagwat, « Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers », in *Proceedings of the Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications*, New York, NY, USA, 1994, p. 234–244.
- [27] T.-W. Chen et M. Gerla, « Global state routing: a new routing scheme for ad-hoc wireless networks », in *1998 IEEE International Conference on Communications, 1998. ICC 98. Conference Record*, 1998, vol. 1, p. 171-175 vol.1.
- [28] T. Clausen *et al.*, « Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) », 2003.
- [29] N. Badache, D. Djenour, A. Derhab, et T. Lemlouma, « Les Protocoles de routage dans les réseaux mobiles Ad Hoc », *Rev. Inf. Sci. Tech.*, vol. 12, n° 2, p. 77-112, janv. 2002.
- [30] Z. Haas, M. Pearlman, et P. Samar, « The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks ». [En ligne]. Disponible sur: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-zone-zrp-00>. [Consulté le: 26-mai-2017].
- [31] K. I. Lakhtaria, « Analyzing Zone Routing Protocol in MANET Applying Authentic Parameter », *ArXiv10122510 Cs*, déc. 2010.
- [32] B. Das, R. Sivakumar, et V. Bharghavan, « Routing in ad hoc networks using a spine », in *Proceedings of Sixth International Conference on Computer Communications and Networks*, 1997, p. 34-39.
- [33] M. Jiang, Y. Tay, et J. Li, « Cluster Based Routing Protocol(CBRP) Functional Specification ». [En ligne]. Disponible sur: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-cbrp-spec-01>. [Consulté le: 26-mai-2017].
- [34] F. Theoleyre, « Une auto-organisation et ses applications dans les réseaux ad hoc et hybrides », phdthesis, INSA de Lyon, 2006.
- [35] N. Nikaiein et C. Bonnet, « Topology Management for Improving Routing and Network Performances in Mobile Ad Hoc Networks », *Mob. Netw. Appl.*, vol. 9, n° 6, p. 583-594, déc. 2004.
- [36] N. Nikaiein, H. Labiod, et C. Bonnet, « DDR-distributed dynamic routing algorithm for mobile ad hoc networks », in *2000 First Annual Workshop on Mobile and Ad Hoc Networking and Computing. MobiHOC (Cat. No.00EX444)*, 2000, p. 19-27.
- [37] P. Sinha, R. Sivakumar, et V. Bharghavan, « Enhancing ad hoc routing with dynamic virtual infrastructures », in *Proceedings IEEE INFOCOM 2001. Conference on Computer Communications. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society (Cat. No.01CH37213)*, 2001, vol. 3, p. 1763-1772 vol.3.

- [38]S. Capkun, M. Hamdi, et J. P. Hubaux, « GPS-free positioning in mobile ad-hoc networks », in *Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2001, p. 10 pp.-.
- [39]J. Hightower et G. Borriello, « Location Systems for Ubiquitous Computing », *Computer*, vol. 34, n° 8, p. 57–66, août 2001.
- [40]« Une approche TCP pour la gestion de la localisation dans les réseaux ad hoc mobiles - Semantic Scholar ». [En ligne]. Disponible sur: /paper/Une-approche-TCP-pour-la-gestion-de-la-localisatio-Ziviani-Fdida/5bfedf59a521c24df5100ea26ebdc84f19204b54. [Consulté le: 26-mai-2017].
- [41]Y.-B. Ko et N. H. Vaidya, « Location-Aided Routing (LAR) in mobile ad hoc networks », *Wirel. Netw.*, vol. 6, n° 4, p. 307-321, sept. 2000.
- [42]S. Basagni, I. Chlamtac, V. R. Syrotiuk, et B. A. Woodward, « A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM) », in *Proceedings of the 4th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, New York, NY, USA, 1998, p. 76–84.
- [43]M. Bakhouya et A. Nait-Sidi-Moh, « Localisation et routage géographique dans les réseaux MANETs », *yumpu.com*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.yumpu.com/fr/document/view/40800548/chap-position-based-mohamed-bakhouya-free/8>. [Consulté le: 26-mai-2017].
- [44]G. T. Toussaint, « The relative neighbourhood graph of a finite planar set », *Pattern Recognit.*, vol. 12, n° 4, p. 261-268, janv. 1980.
- [45]I. Teerawat et H. Ekram, *Introduction to Network Simulator NS2 | Teerawat Issariyakul | Springer*. .
- [46]N. Manisha et A. Manoj, « Performance Evaluation of Routing Protocols for Qos Measures in Manets - Semantic Scholar ». [En ligne]. Disponible sur: /paper/Performance-Evaluation-of-Routing-Protocols-for-Qo-Niraj-Arora/39608e715d56f5d32a37bbee0e3246531b3ad6d6. [Consulté le: 27-mai-2017].
- [47]S. Jaap, M. Bechler, et L. Wolf, « Evaluation of Routing Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks in City Traffic Scenarios », in *in Proc of the 11th EUNICE Open European Summer School on Networked Applications, Colmenarejo*, 2005, p. 584–602.
- [48]A. Muhammad, W. Furong, E. Sarah M., et H. M. Ahmad, « Reactive routing evaluation using modified 802.11a with realistic vehicular mobility ».
- [49]J. Haerri, F. Filali, et C. Bonnet, « Performance comparison of AODV and OLSR in VANETs urban environments under realistic mobility patterns », 2006.
- [50]J. A. Ferreiro-Lage, C. P. Gestoso, O. Rubiños, et F. A. Agelet, « Analysis of Unicast Routing Protocols for VANETs », in *2009 Fifth International Conference on Networking and Services*, 2009, p. 518-521.
- [51]B.Ramakrishnan et S. Rajesh, *Analysis of Routing Protocols for Highway Model without Using Roadside Unit and Cluster*. .
- [52]C. Lochert, H. Hartenstein, J. Tian, H. Fussler, D. Hermann, et M. Mauve, « A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments », in *IEEE IV2003 Intelligent Vehicles Symposium. Proceedings (Cat. No.03TH8683)*, 2003, p. 156-161.
- [53]« Microsoft Word - 20.doc - 69240af9b08c671f8f67b91647e06aff04e4.pdf ». .
- [54]C. A. T. H. Tee et A. C. R. Lee, « Survey of position based routing for Inter Vehicle Communication system », *ResearchGate*. [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/224385753_Survey_of_position_based_routing_for_Inter_Vehicle_Communication_system. [Consulté le: 28-mai-2017].
- [55]R. Bala et C. R. Krishna, « Scenario Based Performance Analysis of AODV and GPSR Routing Protocols in a VANET », in *2015 IEEE International Conference on Computational Intelligence Communication Technology*, 2015, p. 432-437.

- [56] Z. Y. Rawashdeh et S. M. Mahmud, « Intersection Collision Avoidance System Architecture », in *2008 5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, 2008, p. 493-494.
- [57] « Performance Evaluation of VANETS Routing Protocols (PDF Download Available) », *ResearchGate*. [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/301427950_Performance_Evaluation_of_VANET_S_Routing_Protocols. [Consulté le: 26-mai-2017].
- [58] R. K. Jaiswal et C. D. Jaidhar, « An Applicability of AODV and OLSR Protocols on IEEE 802.11p for City Road in VANET », in *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*, 2015, p. 286-298.
- [59] R. S. Shukla et N. Tyagi, « Performance of VANET Routing Protocols Using Realistic Mobility Model », in *Proceedings of the International Conference on Soft Computing for Problem Solving (SocProS 2011) December 20-22, 2011*, Springer, India, 2012, p. 549-555.
- [60] « The Network Simulator - ns-2 ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. [Consulté le: 26-mai-2017].
- [61] *Introduction to Network Simulator NS2 | Teerawat Issariyakul | Springer*. .
- [62] « OMNeT++ Discrete Event Simulator - Home ». [En ligne]. Disponible sur: <https://omnetpp.org/>. [Consulté le: 26-mai-2017].
- [63] A. Kuntz, F. Schmidt-Eisenlohr, O. Graute, H. Hartenstein, et M. Zitterbart, « Introducing Probabilistic Radio Propagation Models in OMNeT++ Mobility Framework and Cross Validation Check with NS-2 », in *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops, ICST, Brussels, Belgium, Belgium*, 2008, p. 72:1–72:7.
- [64] « J-Sim - Saw life steadily and saw it whole. », *J-Sim*. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.j-sim.org>. [Consulté le: 26-mai-2017].
- [65] X. Zeng, R. Bagrodia, et M. Gerla, « GloMoSim: a library for parallel simulation of large-scale wireless networks », in *Twelfth Workshop on Parallel and Distributed Simulation, 1998. PADS 98. Proceedings*, 1998, p. 154-161.
- [66] « The ns Manual (formerly ns Notes and Documentation) ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/>. [Consulté le: 26-mai-2017].
- [67] E. W. Weisstein, « Voronoi Diagram ». [En ligne]. Disponible sur: <http://mathworld.wolfram.com/VoronoiDiagram.html>. [Consulté le: 26-mai-2017].
- [68] « Downloads - SUMO - Simulation of Urban Mobility ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.sumo.dlr.de/userdoc/Downloads.html>. [Consulté le: 26-mai-2017].
- [69] F. Kristianto, K. Zhi, H. Mo, et K. Lan, *Rapid Generation of Realistic Mobility Models for VANET*.
- [70] J. Miller et E. Horowitz, « FreeSim - a free real-time freeway traffic simulator », in *2007 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, 2007, p. 18-23.
- [71] F. J. Martinez, J. C. Cano, C. T. Calafate, et P. Manzoni, « CityMob: A Mobility Model Pattern Generator for VANETs », in *ICC Workshops - 2008 IEEE International Conference on Communications Workshops*, 2008, p. 370-374.
- [72] J. Härrä, « VanetMobiSim–Vehicular Ad hoc Network mobility extension to the CanuMobiSim framework ».
- [73] « CANU Mobility Simulation Environment (CanuMobiSim) ». [En ligne]. Disponible sur: <http://canu.informatik.uni-stuttgart.de/mobisim/>. [Consulté le: 12-juin-2017].
- [74] S. Smiri, « Evaluation des performance des protocoles de routage OLSR et AODV dans un environnement VANET ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiiz6nWwo7UAhVVLbhQKHwywiAccQFgg1MAM&url=http%3A%2F%2Fwww.memoirepfe.fst->

usmba.ac.ma%2Fget%2Fpdf%2F3187&usg=AFQjCNGxEZKikXEit_8_VoUAablRByULnQ.
[Consulté le: 26-mai-2017].

- [75]S. Das et D. K. Lobiyal, « Effect of Mobility Models on the Performance of LAR Protocol for Vehicular Ad Hoc Networks », *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 72, n° 1, p. 35-48, sept. 2013.
- [76]H. Zimmermann, « OSI Reference Model - The ISO Model of Architecture for Open Systems Interconnection », *IEEE Trans. Commun.*, vol. 28, n° 4, p. 425-432, avr. 1980.