

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA - BOUMERDES
FACULTE DES HYDROCARBURES ET DE LA CHIMIE



Département : Automatisation et Electrification des Procédés Industriels
LABORATOIRE DE RECHERCHE SUR L'ELECTRIFICATION DES ENTREPRISES
INDUSTRIELLES (LREEI)

MEMOIRE

Présenté par :

M. MERAIHI Yassine

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE

MAGISTER EN GENIE ELECTRIQUE

Option : *INFOTRONIQUE*

THEME

ROUTAGE DANS LES RESEAUX VEHICULAIRES (VANET)

CAS D'UN ENVIRONNEMENT TYPE VILLE

Soutenu devant le jury :

Pr AIT OUDIA Samy	Professeur (ESI Oued Smar)	Président
Dr ACHELI Dalila	Maître de Conférences A (UMBB)	Rapporteur
Dr HABI Idir	Maître de Conférences A (UMBB)	Examineur
Dr RAHMOUNE Fayçal	Maître de Conférences A (UMBB)	Examineur

Boumerdès 2011

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier vivement ma promotrice Madame ACHELI Dalila pour l'aide qu'elle m'a apportée, ses précieux conseils et ainsi pour sa sympathie durant tout le déroulement de ce travail.

Je remercie également M^{elle} NADJI Becharia responsable de la post-graduation INFOTRONIQUE pour son aide et ses précieux conseils.

Je remercie aussi tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et leur exprime ma profonde gratitude.

Je remercie bien évidemment mes grands-mères, mes parents, à qui je dédie ce mémoire. Ils m'ont non seulement encouragé et supporté tout au long de mes études mais dans toutes les sphères de ma vie. Un merci particulier à ma femme, qui m'a supportée et encouragée tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Je voudrais aussi remercier mes frères, mes sœurs, mes beaux frères, mes belles sœurs, mes neveux et mes nièces.

Je remercie également mes amis qui me permettent de garder un équilibre de vie en alliant études, travail et loisir pour leur soutien durant la période de rédaction de ce mémoire.

Je remercie tous mes enseignants et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de mon travail.

A tous ceux que j'aime, et à tous ceux qui m'aiment...

Pour tout, merci infiniment.

Résumé

Les réseaux véhiculaires représentent aujourd'hui un intérêt certain pour l'industrie automobile, les opérateurs des réseaux, les organisations et même les particuliers. Ils représentent une des briques de base sur lesquelles vont se fonder les systèmes de transport intelligents.

Le but des systèmes de transport intelligents, de nos jours, est d'améliorer la sécurité et l'efficacité des transports routiers afin de diminuer les accidents et fournir un environnement confortable aux conducteurs et à leurs passagers.

Afin de choisir le protocole de routage qui convient le mieux aux VANETs parmi d'autres protocoles Ad hoc, ces derniers doivent être appliqués, un par un, sur le réseau.

Mais vu le coût de réalisation concrète d'un VANET, et afin de pouvoir produire différents scénarios de tests, la simulation devient nécessaire avant de mettre ce système réellement en œuvre.

Notre démarche consiste à modéliser un modèle de mobilité pour les VANETs qui prend en considération les contraintes de la mobilité véhiculaire, pour que la simulation soit proche de la réalité.

Notre but, à travers ce travail, est d'évaluer les performances des protocoles de routage DSR et OLSR appliqués aux réseaux VANET dans l'environnement spécifique d'une ville. Afin de choisir celui qui convient le mieux en terme de taux de réception des paquets, délai de bout en bout et la surcharge du réseau ...etc.

Mots clés : Réseaux mobile Ad Hoc MANET, Réseaux véhiculaires VANET, Système de transport intelligent STI, Modèle de mobilité, Protocoles de routage, Evaluation de performances, OLSR, DSR, simulation, NS2.

Abstract

Nowadays, vehicular networks represent great interest in the industry of automobile, for network operators, the organizations, individuals as well, they represent one of the building blocks which will be based on the intelligent transportation systems.

The purpose of the intelligent transportation system is to improve the security, and the efficiency of the road transport to decrease the accidents and to provide better conditions for drivers and passengers.

In order to choose the convenient routing protocol among other protocols Ad Hoc, they need to be applied one by one in the network.

To perform different scenarios of tests, the simulation of this system becomes necessary before its implementation.

Our task is to design the mobility model of VANET, which will take an account the mobility constraints, in order to close to the reality.

Our objective in this work is to evaluate routing protocol performances DSR and OLSR applied on VANET network in specified environment of the city, in order to choose the best convenient one regarding the reception rate of packets, the end to end delay and the overhead.

Keywords:

Mobile Ad Hoc Network MANET , Vehicular Networks VANET, Intelligent Transportation System ITS, Mobility Model, Routing Protocol, Evaluation of performances , OLSR, DSR, Simulation, NS2.

ملخص

تمثل شبكات السيارات اليوم أهمية بالغة لهتعاملي شبكات المنظمات وكذا الخواص، فهي تمثل أحد القواعد التي تبني عليها أنظمة النقل الذكية في مجال صناعة السيارات. فالهدف من أنظمة النقل الذكية في وقتنا الحالي هو تطوير الأمن و الفعالية في النقل البري بغرض تخفيض الحوادث و جعل السائقين والركاب في وضعية ملائمة ومريحة.

لاختيار بروتوكول التوجيه الملائم من بين البروتوكولات الأخرى (Ad hoc) يجب تطبيق كل بروتوكول على حدة في الشبكة.

وللتمكن من اختبار مختلف السيناريوهات، المحاكاة أصبحت ضرورية قبل وضع هذا النظام في الواقع.

ولذا، فإن عملنا يتطلب وضع نموذج الحركية لشبكة السيارات مع الأخذ بعين الاعتبار عوائق حركية السيارات لتكون المحاكاة أقرب من الواقع.

و يكمن الهدف من بحثنا هذا في تقييم نتائج بروتوكولات التوجيه (DSR) و(OLSR) المطبقة في شبكات (VANET) في بيئة خاصة لمدينة ما لاختيار أحسن بروتوكول ملائمة فيما يخص نسبة استقبال الرزم، المدة من الحد إلى الحد وكذا كثافة الشبكة.

الكلمات المفتاحية:

شبكات الحركة (Ad hoc)، شبكات السيارات، أنظمة النقل الذكية (ITS)، نموذج الحركية، بروتوكول التوجيه، تقييم النتائج، (DSR)، (OLSR)، المحاكاة، (NS2).

Introduction générale	1
Chapitre I : Les réseaux sans fil	
Introduction	3
I-1 Les réseaux sans fil	3
I-1-1 Définition	3
I-1-2 Techniques de communication sans fil	4
I-1-3 Catégories des réseaux sans fil.....	4
I-1-3-1 WPAN.....	4
I-1-3-2 WLAN	5
I-1-3-3 WMAN	5
I-1-3-4 WWAN	5
I-1-4 Avantages et contraintes de la communication sans fil.....	6
I-1-4-1 Avantages des réseaux sans fil.....	6
I-1-4-2 Contraintes des réseaux sans fil	6
I-2 Les réseaux mobiles	7
I-2-1- Définition de la mobilité	7
I-2-2 Définition d'un réseau mobile	7
I-2-3 Classification des réseaux mobiles selon l'infrastructure	7
I-2-3-1 Les réseaux mobiles avec infrastructure	7
I-2-3-1-1 Les réseaux cellulaires à station de base... ..	8
I-2-3-1-2 Les réseaux radio maillés « Suppression définitive des fils »	8
I-2-3-2 Les réseaux mobiles sans infrastructure	9
I-2-4 Problèmes liés à la mobilité	10
I-2.4.1 Nommage et adressage des nœuds mobiles	10
I-2.4.2 Routage.....	10
I-2.4.3 Récupération des adresses	10
I-2.4.4 Diffusion de données	10
I-2.4.5 Dépendance de la localisation	11
I-3 Les réseaux Ad hoc	11
I-3-1- Définition des réseaux ad hoc	11
I-3-2- Historique et évolution des réseaux Ad Hoc.....	12
I-3-3- Modélisation des réseaux Ad Hoc	12
I-3-4 Modes de communication dans les réseaux mobile	13
I-3-4-1 Le mode Unicast	13
I-3-4-2 Le mode Multicast	13

I-3-4-3 Le mode Broadcast	13
I-3-5- Caractéristiques des réseaux ad hoc.....	14
I-3-5-1- Absence d'infrastructure.....	14
I-3-5-2- Routage par relais	14
I-3-5-3- Topologie dynamique	15
I-3-5-4-Taille du réseau ad hoc	15
I-3-5-5- Hétérogénéité des nœuds	15
I-3-5-6- Multi sauts	16
I-3-6- Les contraintes liés aux réseaux ad hoc	16
I-3-7- Domaines d'applications des réseaux ad hoc.....	19
I-4- Les Réseaux Véhiculaires Ad hoc	20
I-4-1- Définition d'un réseau VANET	20
I-4-2- Nœuds d'un réseau VANET	20
I-4-3- Technologies utilisées dans la communication véhiculaire	21
I.4.3.1 Communication de véhicule à véhicule	21
I.4.3.2 Communication de véhicule avec utilisation d'infrastructures.....	22
I.4.3.3 Communication hybride	23
I-4-4- Caractéristiques des réseaux VANET.....	23
I.4.4.1 La Collecte d'informations et la perception de l'environnement proche.....	23
I.4.4.2 Capacité de traitement, d'énergie et de communication.....	23
I.4.4.3 Environnement de déplacement et modèle de mobilité	24
I.4.4.4 Forte mobilité, topologie du réseau et connectivité	24
I.4.4.5 Type de l'information transportée et diffusée.....	24
I-4-5- Application des réseaux VANET.....	24
I.4.5.1 Application dans la prévention et la sécurité routière.....	24
I.4.5.2 Application pour l'optimisation du trafic et aide dans la conduite	25
I.4.5.3 Application au confort du conducteur des passagers	25
I-4-6- Travaux dans le domaine des VANET	25
I.4.6.1 Sécurité	25
I.4.6.2 L'accès au canal.....	25
I.4.6.3 Localisation des véhicules	26
I.4.6.4 Problèmes de congestion.....	26
I.4.6.5 Mobilité dans la simulation des réseaux	26
I.4.6.6 Routage.....	26
Conclusion	27

Chapitre II : Routage dans les réseaux sans fil

Introduction.....	28
II-1 Définitions.....	29
II-2 Problème de routage dans les réseaux mobiles Ad Hoc	29
II-3 Classification des protocoles de routage dans les réseaux mobiles Ad Hoc	31
II-3-1- Classification selon l'architecture	31
II-3-1-1- Les protocoles uniformes	31
II-3-1-2- Les protocoles non uniformes	31
II-3-2- Classification selon l'approche de routage	32
II-3-2-1- Les protocoles proactifs	32
II-3-2-2- Les protocoles réactifs.....	32
II-3-2-3- Les protocoles hybrides.....	33
II-3-3- Classification selon le type d'algorithme utilisé	33
II-3-3-1- Les protocoles de routage à vecteur de distance	34
II-3-3-2- Les protocoles de routage à état des liens	34
II-3-3-3- Les protocoles source	34
II-3-3-4- Les protocoles par apprentissage en arrière	35
II-4 Quelques protocoles de routage	35
II-4-1- Le protocole OLSR (Optimized Link State Protocol)	35
II-4-2- Le protocole DSR (Dynamic Source Routing).....	38
II-5 Protocoles de routage dans les réseaux VANET.....	41
II.5.1 Le protocole GSR(Geographic Source Routing).....	41
II.5.2 Le protocole ASTAR (Anchor-ased Street and Traffic Aware Routing).....	42
II.5.3 Le protocole UMB (Urban Multi hop Broadcast Protocol).....	42
II.5.4 Le protocole GyTar (improved Greedy Traffic-Aware Routing protocol).....	42
Conclusion	46

Chapitre III : Conception réalisation

Introduction.....	47
III-1 Convention et appellations	48
III-2 Conception et description du modèle de mobilité	50
III-2-1- La zone de simulation	50
III-2-2- Les nœuds mobiles.....	51
III-2-3- Les postes fixes	52
III-2-4- La distance de sécurité	52
III-2-5- Changement de route ou segment	52

III-2-6- Gestion jonctions par les policiers	53
III-2-7- Continuité de la connexion	53
III-2-8- Convention de la circulation	53
III-2-9- Le réseau simulé.....	54
III-2-9-1- Le réseau purement VANET	54
III-2-9-2- Le réseau VANET Postes	54
III-3- La simulation du réseau VANET	54
III-3-1-Présentation de NS2.....	55
III.3.1.1 Les composants d'un réseau sous NS2.....	56
III.3.1.2 Flot de simulation.....	57
III.4 Réalisation.....	60
III-4-1- Algorithme de réalisation de codage des cartes routières	60
III-4-2- Algorithme de réalisation du modèle de mobilité.....	61
III.4.2.1 Move(n).....	61
III.4.2.2 Atteindrejonction(n,jon)	63
III.4.2.3 Policier(n,jon).....	64
III.4.2.4 Intersect(n,jonc,jonv).....	65
III.4.3.Création du réseau.....	66
III.4.3.1 Transmission des messages	66
III.4.3.2 Envoi des acquittements.....	69
III.4.3.3 Renvoi des requêtes et des réponses	70
III.5. Calcul des valeurs des métriques	70
III-5-1- Calcul du taux de perte des paquets	70
III-5-2- Calcul du taux d'overhead de routage	71
III-5-3- Calcul de la charge du réseau.....	72
III-5-4- Calcul du délai de bout en bout.....	72
III-5-5- Calcul du temps de réponse.....	73
III-5-6- Calcul de la gigue.....	73
III-5-7- Calcul de la bande passante.....	73
Conclusion	75
Chapitre IV : Tests et résultats	
Introduction.....	76
IV-1 Les facteurs de simulation	77
IV-1-1- Temps de simulation.....	77
IV-1-2- Mobilité des nœuds	77

IV-1-3- Nombre de nœuds	77
IV-1-4- Carte routière	77
IV-1-5- Le facteur λ et le nombre de requêtes	78
IV-1-6- Protocole de transport	79
IV-2 Génération des scénarios de tests	79
IV-3 Les pré-tests	80
IV-3-1- Scénarios utilisés.....	80
IV-3-2- Pré-test de choix du facteur λ	81
IV-3-3- Pré-test du choix du protocole de transport	81
IV.4 Analyse et résultats	83
IV-4-1- Analyse des résultats en forte mobilité	83
IV-4-1-1 Taux de réception.....	83
IV-4-1-2 Temps de réponse moyen.....	84
IV-4-1-3 La gigue	85
IV-4-1-4 La charge du réseau	86
IV-4-1-5 L'overhead du réseau.....	87
IV-4-1-6 Conclusion de tests de forte mobilité.....	88
IV-4-2- Analyse des résultats en faible mobilité.....	88
IV-4-2-1 Taux de réception.....	88
IV-4-2-2 Temps de réponse moyen.....	89
IV-4-2-3 La gigue	89
IV-4-2-4 La charge du réseau	90
IV-4-2-5 L'overhead du réseau.....	93
IV-4-2-6 Conclusion de tests de faible mobilité	91
Conclusion	92
Conclusion générale	93
Bibliographie

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1: Classification des réseaux sans fil.....	5
Figure I.2 : Mode infrastructure.....	8
Figure I.3 : Réseau à station de bases	8
Figure I.4: Réseau radio maillé.....	9
Figure I.5 : réseau sans infrastructure (ad hoc).....	10
Figure I.6 : Un exemple de réseau Ad Hoc.....	11
Figure I.7 : Modélisation d'un réseau Ad Hoc	13
Figure I.8 : Les différents modes de communication	14
Figure I.9 : Porté d'un nœud.....	14
Figure I.10 : Topologie dynamique des réseaux Ad Hoc	15
Figure I.11 : Influence des puissances d'émission sur les liens de communications.	16
Figure I.12 : Nœud caché.....	18
Figure I.13 : Nœud exposé.....	18
Figure I.14 : Hiérarchie des réseaux sans fil.....	20
Figure I.15 : Véhicule intelligent	21
Figure I.16 : Communication véhicule à véhicule	22
Figure I.17 : Communication véhicule à station de base.....	22
Figure I.18 : Communication hybride.....	23

CHAPITRE II

Figure II.1 : Exemple information de voisinage	36
Figure II.2: Construction de l'enregistrement de la route dans DSR.....	39
Figure II.3: L'envoi du chemin ou de la route replay (RREP)	40
Figure II.4 : Erreur dans DSR : envoi de route error(RRER)	41
Figure II.5 : La sélection des intersections dans GyTar.....	44
Figure II.6 :Echanges des données entre deux intersection en utilisant la strategie GyTar.....	45
Figure II.7 : Stratégie de recouvrement utilisée dans un optimum local	45

CHAPITRE III

Figure III.1 : Schéma explicatif des différentes appellations	50
Figure III.2 : Exemple d'une carte codifiée par l'intervention de l'utilisateur	51
Figure III.3 : Nœud dans NS2 (Unicast & Multicast).....	56
Figure III.4 : Lien dans NS2	57
Figure III.5 : Flot de simulation avec NS2	58
Figure III.6 Ligne de fichier trace nouveau format.....	60
Figure III. 7 : Réorganisation des routes au niveau d'une jonction	61
Figure III.8 : Schéma illustratif du mouvement d'un nœud.....	62
Figure III.9 : Choix du point solution.	66
Figure III.10 : Attachement des agents aux nœuds.....	67
Figure III.11 : Transmission des messages dans un réseau purement VANET.....	68
Figure III.12 : Transmission des messages dans un réseau VANET Poste	69

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : Carte illustrant un environnement de forte mobilité	78
Figure IV.2 : Carte illustrant un environnement de faible mobilité.....	78
Figure IV.3 : Représentation en bars des taux de réception des messages dans le réseau VANET en FM	84
Figure IV.4 : Représentation des temps de réponses maximaux en FM	85
Figure IV.5 : Représentation du délai de bout en bout max et min et de la gigue pour le protocole DSR en FM	85
Figure IV.6 : Représentation du délai de bout en bout max et min et de la gigue pour le protocole OLSR en FM.....	85
Figure IV.7: Charge du réseau par rapport aux paquets de contrôle en FM.....	86
Figure IV.8: Charge du réseau par rapport aux messages de données en FM.....	87
Figure IV.9 : Présentation de la surcharge moyenne du réseau (Overhead) par les paquets de contrôle et de données en FM	87
Figure IV.10 : Représentation en bars des taux de réception des messages dans le réseau VANET en LM	88
Figure IV.11 : Représentation des temps de réponses maximaux en LM	89

Figure IV.12 : Représentation du délai de bout en bout max et min et de la gigue pour le protocole DSR en LM.....	89
Figure IV.13 : Représentation du délai de bout en bout max et min et de la gigue pour le protocole OLSR en LM	89
Figure IV.14: Représentation de la charge du réseau VANET par rapport aux messages de données en LM.....	90
Figure IV.15 : présentation de la surcharge moyenne du réseau (Overhead) par les paquets de contrôle et de données en LM.....	90

Liste des tableaux

Tableau I.1: Classification des réseaux sans fil	6
Tableau II.1 : Comparaison entre protocoles proactifs et protocoles réactifs.....	33
Tableau III.1 : Tableau explicatif d'une ligne de fichier trace nouveau format	60
Tableau IV.1 : Les différents scénarios selon la mobilité des nœuds et la charge du réseau ..	80
Tableau IV.2 : Scénarios de mouvement utilisés.....	80
Tableau IV.3 : Scénarios de test utilisés.	81
Tableau IV.4 : Les valeurs de la fonction $f(T, D)$	82
Tableau IV.5 : Moyenne de la fonction $f(T, D)$ pour chaque protocole de routage, selon TCP et UDP pour les deux cas de mobilité.....	83

Introduction Générale

Nous assistons ces dernières années à une importante évolution dans le domaine des télécommunications sans fil, cette évolution est due essentiellement aux besoins actuels en termes de disponibilité et d'accès aux données à n'importe quel moment et depuis n'importe quel endroit.

De nombreuses applications ont depuis vu le jour afin d'améliorer notre vie quotidienne : dans nos maisons, nos sociétés, nos voitures... en somme partout.

Une des applications de ce concept consiste à renforcer la prévention routière et à munir nos voitures et nos routes de capacités permettant de rendre la route plus sûre (les informations sur le trafic, les accidents, les dangers, les déviations possibles, les informations météorologiques, etc.), améliorer le confort des passagers et rendre le temps passé sur les routes plus conviviale (accès à internet, jeux interactifs entre les passagers des véhicules proches, service de chat, aider les personnes à se suivre sur la route, etc.). Cette application est l'exemple type de ce que nous appelons les systèmes de transports intelligents (ITS, Intelligent Transportation System) et dont le but est d'améliorer la sécurité, l'efficacité et la convivialité dans les transports routiers à travers l'utilisation des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC).

Avec le développement rapide des technologies de communications sans fil, une nouvelle architecture basée sur des communications véhicule à véhicule (V2V, Vehicle to Vehicle) suscite ces dernières années un réel intérêt auprès des constructeurs automobiles, de la communauté R&D et des opérateurs Télécoms. Ce type d'architecture est formé par les véhicules eux même sans l'appui d'une infrastructure fixe pour le relaying des données et des messages. Nous parlons dans ce cas d'un réseau Ad Hoc de véhicule (VANET).

Afin d'étudier les VANETs, le déploiement sur terrain n'est malheureusement pas envisageable à ce jour, d'où le recours à la simulation. Plusieurs simulateurs ont été mis à la disposition des chercheurs dans ce but (NS2, GloMoSim...). Lors d'une simulation, la mobilité est un paramètre à ne pas négliger, car les unités dans un VANET peuvent se déplacer à grande vitesse suivant un schéma de mobilité particulier. Pour modéliser la mobilité des VANETs, plusieurs modèles ont été conçus. Ces modèles de mobilité doivent prendre en considération les contraintes de la mobilité véhiculaire, pour que la simulation soit proche de la réalité.

Notre projet consiste à évaluer les performances des protocoles de routage DSR et OLSR appliqués aux réseaux VANET dans l'environnement spécifique d'une ville. Les métriques de qualité de service (QoS) tels que le délai, la gigue et le taux de perte seront analysés, en prenant en compte la densité du trafic routier, le nombre de voies, les limitations de vitesses ainsi que le type de données relayées.

Notre mémoire est organisé en quatre chapitres :

Dans **Le premier chapitre**, nous donnons un état de l'art des réseaux sans fil et des différents concepts liés à ce type de réseaux. Nous abordons aussi les réseaux mobiles, les réseaux mobiles Ad Hoc (MANET), les réseaux Ad Hoc véhiculaires(VANET) et leurs caractéristiques.

Dans **Le deuxième chapitre**, nous traitons le routage dans les réseaux mobiles Ad hoc. Nous nous intéressons à la problématique du routage et les contraintes liées aux réseaux Ad Hoc. Nous décrivons également les principaux protocoles et leurs classifications. Enfin nous présentons les détails sur le fonctionnement de certains protocoles.

Le troisième chapitre est consacré à la conception et la réalisation la solution que nous avons proposée pour modéliser les réseaux VANETs. Nous donnons les détails de l'implémentation des différentes classes que nous avons utilisées tout en montrant le rôle de chacune d'elles. Nous présentons ensuite l'implémentation du réseau VANET sous l'outil de simulation NS2, pour terminer avec les métriques à calculer afin de mesurer les performances des protocoles de routage dans un environnement VANET.

Le quatrième chapitre est consacré aux simulations, interprétation et discussions des résultats où nous allons tester le protocole DSR de la classe des protocoles réactifs et le protocole OLSR de la classe des protocoles proactifs afin de voir l'impact du choix du protocole de routage sur les performances du réseau VANET.

*C*HAPITRE I

*R*ESEAUX SANS FIL

Introduction

Avec l'adoption des technologies de communication sans fil, les réseaux ont connu ces dernières années un essor spectaculaire et s'imposent aujourd'hui de façon indéniable.

Un tel succès est dû principalement à la vulgarisation des équipements mobiles offrant plus de souplesse, plus de rapidité et moins de frais.

Les réseaux mobiles sans fil peuvent être classés en deux catégories : les réseaux avec infrastructure ou cellulaires qui nécessitent généralement l'installation des stations de base et les réseaux sans infrastructure ou Ad Hoc caractérisés par leur dynamisme, facilité et rapidité de déploiement. Ces caractéristiques les rendent utilisés dans plusieurs applications à savoir la téléphonie, les applications militaires, les applications commerciales et la sécurité routière

Dans ce chapitre nous allons présenter les réseaux sans fil, leurs catégories, leurs caractéristiques ainsi que leurs contraintes. Les réseaux mobiles, leurs classifications, leurs caractéristiques et les problèmes liés à la mobilité seront également décrits. Subséquemment, nous aborderons les réseaux mobiles Ad Hoc (MANET) dont nous énumérons les caractéristiques des ces réseaux et nous en citerons quelques applications pour enfin parler des réseaux Ad Hoc véhiculaires VANET.

I.1 Réseaux sans fil

I.1.1 Définition [10][35]

Un réseau sans fil (en anglais Wireless network) est un réseau dans lequel les machines participantes peuvent communiquer sans liaison filaire.

Les réseaux sans fil sont basés sur des liaisons utilisant des ondes radioélectriques (radio ou infrarouge) à la place des câbles habituels (coaxial, paire-torsadée ou fibre optique).

Dans ce type de réseau, les utilisateurs ont la possibilité de se déplacer dans un certain périmètre de couverture géographique sans perdre le signal.

I.1.2 Techniques de communication sans fil [37]

Dans tout système de transmission de données, le support de transmission est défini comme le chemin physique entre l'émetteur et le récepteur. Ce support, aussi appelé média ou medium peut être guidé (câble en cuivre, fibre optique,...) ou non guidé (deux médias peuvent être utilisés : les liaisons infrarouges et les ondes radios).

▪ **Liaisons infrarouges**

Les liaisons infrarouges sont utilisées dans les communications courtes et en vue, elles sont simples et peu coûteuses. Elles conviennent aux réseaux à faible portée. Les émetteurs et récepteurs à infrarouge sont capables de fournir des débits élevés à des coûts relativement faibles. Les bandes passantes disponibles sont très larges, les liaisons infrarouges pénètrent à travers le verre, mais pas à travers les murs ou tout autre obstacle opaque, ce qui implique que les communications se font dans la même pièce, ce qui augmente la sécurité.

▪ **Liaisons radios**

Le principe est d'émettre des ondes électromagnétiques qui constituent la porteuse du signal à transmettre. Ces ondes sont donc propagées dans toutes les directions et peuvent être captées par plusieurs antennes. Le medium radio est découpé en bandes de fréquences divisées en canaux. Il est caractérisé par sa moindre fiabilité par rapport au medium filaire, c'est un medium partagé, c'est-à-dire si deux nœuds géographiquement proches tentent d'émettre une trame simultanément, il y a interférence entre les deux émissions, ces interférences entraînent des collisions entre les trames, ce qui oblige les émetteurs à émettre une autre fois. Ce problème de collisions est résolu grâce à des techniques d'accès au medium utilisées dans les réseaux Ad Hoc :

- TDMA : (Time Division Multiple Access):Solution à accès multiple à répartition dans le temps.
- CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) : Technique permettant d'éviter les collisions entre les utilisateurs d'un réseau, en s'assurant que chacun parle à son tour et pas tous en même temps.

I.1.3 Catégories des réseaux sans fil [10][12][22][25]

Nous trouvons généralement quatre catégories de réseaux sans fil suivant la zone de couverture et la distance entre les nœuds.

I.1.3.1 WPAN Wireless Personal Area Network (réseau personnel sans fil)

Réseau domestique d'une faible portée (quelques dizaines de mètres). L'objectif principal de ce type de réseau est de relier des périphériques à une unité centrale câblée ou de connecter deux ou trois machines très peu éloignées. Les technologies utilisées sont: Bluetooth, ZigBee, HomeRF et IrDA.

I.1.3.2 WLAN Wireless Local Area Network (réseau local sans fil)

Cette catégorie comprend les réseaux sans fil offrant une zone de couverture correspondant à un réseau local d'entreprise, soit quelques centaines de mètres. Le but de ce réseau est d'interconnecter différentes machines qui sont situées dans un périmètre géographiquement restreint, semblable aux réseaux fixes de type LAN (Local Area Network). Les technologies utilisées sont : WiFi, HiperLan1 et HiperLan2 (voir Annexe).

I.1.3.3 WMAN Wireless Metropolitan Area Network (réseau métropolitain sans fil)

Réseau basé sur la norme IEEE 802.16 : sont inclus dans cette catégorie les réseaux offrant une couverture comparable à un campus ou un quartier d'une ville. Le but de ce réseau est d'interconnecter divers réseaux fixes ou réseaux sans fil se trouvant sur un même campus ou dans un même quartier. La technologie utilisée est : Wimax (voir Annexe).

I.1.3.4 WWAN Wireless Wide Area Network (réseau étendu sans fil)

Connu également sous le nom de réseau cellulaire mobile. Cette famille regroupe les réseaux étendus sur une zone de couverture de plusieurs kilomètres. Les technologies principales utilisées sont :

- ✓ GSM : **G**lobal **S**ystem for **M**obile communication.
- ✓ GPRS : **G**eneral **P**acket **R**adio **S**ervice.
- ✓ UMTS : **U**niversel **M**obile **T**elecommunication **S**ystem.

La figure I.1 représente la classification des réseaux sans fil.

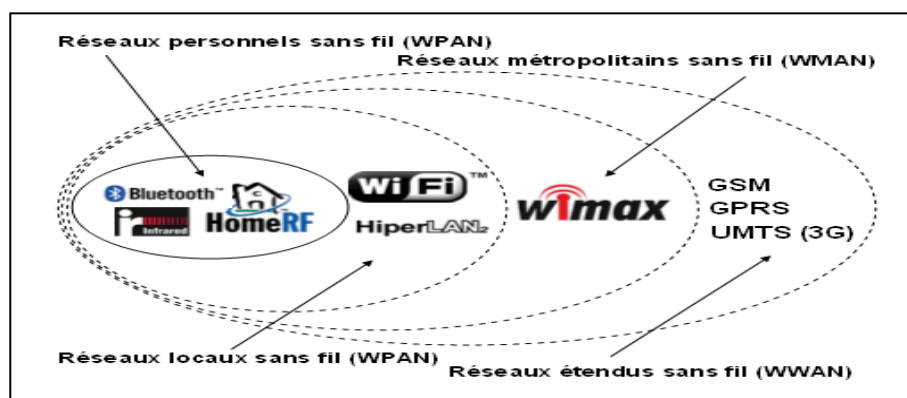


Figure I.1: Classification des réseaux sans fil.

Le tableau I.1 résume les différentes technologies utilisées dans chaque catégorie et leurs caractéristiques.

Catégorie	WPAN	WLAN	WMAN	WWAN
Standard	IEEE 802.15	IEEE 802.11	IEEE 802.16	IEEE 802.20
Technologie	Bluetooth HomeRF Zigbee IR(infrarouge)	Wifi Hyperlan1 Hyperlan2	Wimax	GSM GPRS UMTS
Couverture	Quelque dizaines de mètres	Une centaine de mètres	Quelques dizaines de kilomètres	Une centaine de kilomètres
Débit	< 1Mbps	2 à 54 Mbps	Jusqu'à 70 Mbps	10 à 385 Kbps
Applications	Point à point Équipement à équipement	Réseau d'entreprise	Fixe, accès au dernier kilomètre	GSM PDA

Tableau I.1 : Classification des réseaux sans fil.

I.1.4 Avantages et contraintes de la communication sans fil[10][12][22]

Nous citerons dans la section suivante les avantages liés à l'utilisation du médium radio dans les réseaux sans fil. Les contraintes liées à cet environnement seront également présentés.

I.1.4.1 Avantage des réseaux sans fil

- **La mobilité**

La mise en place d'un réseau sans fil entre les éléments portables permet d'éviter les fils de connexion au réseau et les fils d'alimentation, afin de permettre le mouvement libre des utilisateurs avec leurs terminaux portables.

- **Faibles coûts**

Contrairement au réseau filaire où le câblage représente un coût supplémentaire, le réseau sans fil s'affranchit de ce coût. Néanmoins, les protocoles de routage et de configuration doivent être repensés pour permettre la bonne gestion et l'acheminement des données dans le réseau.

I.1.4.2 Contraintes des réseaux sans fil

Parmi les limites des réseaux sans fil nous trouvons :

- **Dégradation de la qualité du signal**

Cette contrainte est causée par l'affaiblissement de la puissance du signal avec la distance et les conditions atmosphériques. De plus, le bruit dû à d'autres signaux parasites cause une altération du signal. D'autres paramètres tels que l'absorption atmosphérique du signal par la

vapeur d'eau et l'oxygène, la propagation multi trajet causée par les obstacles entre l'émetteur et le récepteur, font que le signal se dégrade davantage.

- **Sécurité**

La confidentialité des données circulantes sur les réseaux sans fil doit être assurée, car les transmissions radioélectriques sont sensibles aux interférences et sujettes à l'écoute par un utilisateur mal intentionné. Cet utilisateur peut se placer dans le périmètre des équipements du réseau afin de récupérer les informations qui lui permettront d'avoir accès au réseau. Ceci représente le plus grand problème des réseaux sans fil.

- **Débit**

Le simple fait d'avoir un trop grand nombre d'utilisateurs dans un réseau sans fil peut entraîner une diminution importante de débit. Cette diminution de débit peut même conduire à une perte de connectivité ce qui est très contraignant.

I.2 Les réseaux mobiles

I.2.1 Définition de la mobilité [20]

Le terme mobilité est la capacité ou la facilité d'un objet ou d'une personne à se déplacer par rapport à un lieu, à une position ou à un ensemble d'objets de même nature.

Dans le domaine de réseaux, la mobilité se traduit par la possibilité que certaines entités peuvent passer d'une cellule à une autre sans perdre la liaison.

I.2. 2 Définition d'un réseau mobile [35]

Un réseau mobile est un système composé de nœuds reliés les uns aux autres par des liaisons de communication sans fil. Ces nœuds sont libres de se déplacer sans perte de leurs connexions au réseau. Un réseau mobile peut contenir des sites fixes pour permettre l'accès à d'autres types de réseaux (filaires).

I.2.3 Classification des réseaux mobiles selon l'infrastructure [21]

Les réseaux mobiles peuvent être divisés en deux classes à savoir : les réseaux mobiles basés sur une infrastructure et les réseaux mobiles sans infrastructure.

I.2.3.1 Les réseaux mobiles avec infrastructure (cellulaires)

Dans ce mode, chaque nœud (appelé aussi unité mobile) se connecte à un point d'accès (appelé aussi site fixe ou station de base SB) via une liaison sans fil. L'ensemble formé par le point d'accès et les unités mobiles situées dans sa zone de couverture, est appelé ensemble de services de base (en anglais *Basic Service Set*, noté BSS) et constitue une cellule. La figure I.2 illustre un exemple d'un réseau mobile avec infrastructure.

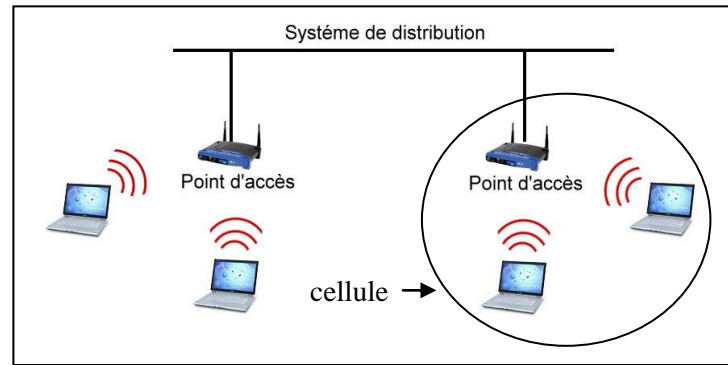


Figure I.2: Mode avec infrastructure

Il est possible de relier plusieurs points d'accès entre eux par une liaison appelée système de distribution (notée DS pour *Distribution System*) afin de constituer un ensemble de services étendus (*Extended Service Set* ou ESS). Le système de distribution peut être un réseau filaire, généralement fiable et à haut débit, ou bien un réseau sans fil.

I.2.3.1.1 Réseaux cellulaires à stations de base

Les nœuds mobiles se connectent à des stations de bases « points d'accès » qui gèrent l'ensemble des communications dans une même zone géographique (cellule). Ce mode peut permettre un accès à un réseau filaire. Les unités mobiles peuvent se déplacer au sein de la cellule et garder une liaison directe avec le point d'accès. La puissance des antennes équipant ces points d'accès étant plus importante que celle des nœuds mobiles. Le réseau peut couvrir une zone très importante. La figure I.3 illustre le schéma bloc d'un réseau à stations de base.

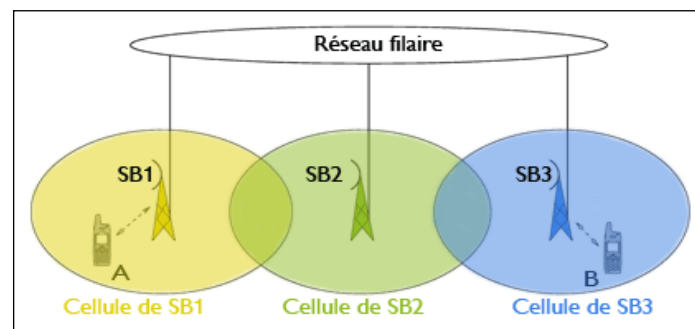


Figure I.3: Réseau à stations de base.

I.2.3.1.2 Réseaux radio maillés : « Suppression définitive des fils »

Pour utiliser un réseau sans fil à l'échelle d'une ville à moindre coût, on peut utiliser un réseau radio maillé, appelé aussi « Mesh Network ». Ce dernier consiste en un ensemble de stations de base « SB » qui couvrent une zone visée. La différence avec les réseaux à stations de bases est que dans ce type de réseau, les stations de base communiquent entre elles par

liaison radio. Ainsi, les mobiles peuvent communiquer entre eux à travers ces stations de base.

Dans un réseau radio maillé, chaque mobile est rattaché à la station de base la plus proche, avec laquelle il communique exclusivement.

La figure I.4 illustre un exemple de communication entre des nœuds d'un tel réseau. Lorsque le mobile 'A' souhaite communiquer avec le mobile 'B', le mobile 'A' transmet son message à la station de base 'SB1' qui le transmet via son interface radio à la station 'SB2', qui à son tour retransmet le message à la station 'SB3', qui finalement envoie ce dernier au destinataire 'B'.

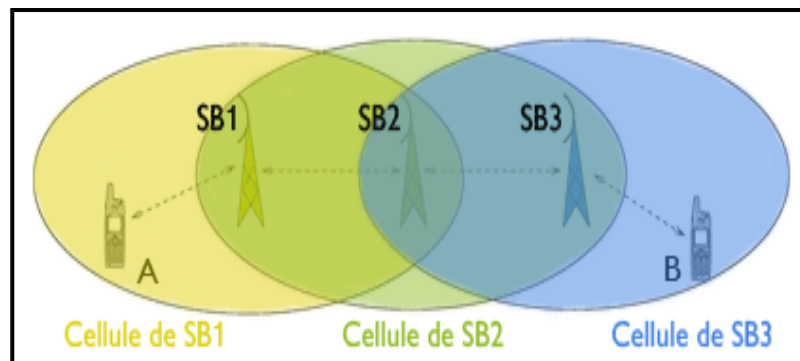


Figure I.4: Réseau radio maillé.

Si deux mobiles souhaitent communiquer, il faut que les stations de base auxquelles ils sont rattachés puissent communiquer. Idéalement, chaque mobile peut communiquer avec n'importe quel autre mobile du réseau radio maillé. Ceci est réalisé, si et seulement si, le graphe des stations de base du réseau est connexe, c'est-à-dire qu'il existe toujours une route utilisant éventuellement des stations de base intermédiaires, reliant deux stations de base quelconques du réseau.

I.2.3.2 Réseau mobile sans infrastructure

Dans le mode sans infrastructure, la notion de site fixe ou point d'accès n'existe pas. Toutes les stations du réseau se connectent les unes aux autres afin de construire un réseau point à point (P2P pour *peer to peer*). Ainsi, chaque machine joue en même temps le rôle de client et le rôle de point d'accès.

Dans un environnement ad hoc, lorsqu'une donnée est envoyée d'un nœud source à un nœud destination, il se peut qu'elle transite par plusieurs nœuds intermédiaires avant d'arriver à destination. C'est ce qui s'appelle le *multi hop* (saut multiple ou multi-saut).

La figure I.5 illustre le schéma d'un réseau mobile sans infrastructure.

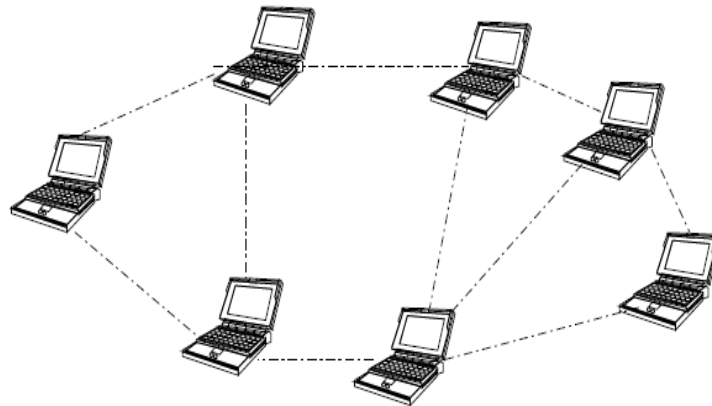


Figure I.5 : réseau sans infrastructure (ad hoc)

I.2.4 Problèmes liés à la mobilité

I.2.4.1 Nommage et adressage des nœuds mobiles

Dans les réseaux fixes, l'adresse d'un nœud est souvent confondue avec son nom. Par contre, nous ne pouvons pas nommer un nœud mobile par son adresse car il change de cellules et donc utilise plusieurs points d'accès, d'où le changement fréquent d'adresses.

I.2.4.2 Routage

La mobilité des nœuds et le changement fréquent de la topologie nécessitent des protocoles de routage qui doivent réagir rapidement à ces changements, afin de permettre le bon acheminement des paquets à leurs destinations finales.

I.2.4.3 Récupération des adresses

La déconnexion (accidentelle ou volontaire) d'un nœud mobile nécessite l'adaptation des protocoles de récupération des données.

Il est aussi important de supprimer les données résiduelles stockées pour éviter la saturation de l'espace mémoire.

I.2.4.4 Diffusion de données

Dans le cas d'une émission multidestinaires (diffusion sélective) d'un message, ce dernier peut être reçu par des stations différentes à des moments différents. Donc, il est possible qu'un message diffusé ne soit pas reçu par une unité mobile destinataire, car son entrée en cellule a eu lieu après la diffusion du message ou sa sortie a eu lieu avant la diffusion du message. Une unité mobile peut recevoir plusieurs copies du même message à travers des stations de base différentes.

I.2.4.5 Dépendance de la localisation

Dans les réseaux mobiles à stations de base, un nœud mobile peut avoir besoin des services des réseaux filaires (Internet par exemple), il est donc préférable de faire appel à la station de base la plus proche de sa localisation.

I.3 Les réseaux Ad hoc

I.3.1 Définition des réseaux ad hoc

Définition 1 [35]

Les réseaux ad hoc (en latin : « qui va vers ce vers quoi il doit aller », c'est-à-dire « formé dans un but précis »), sont des réseaux sans fil spontanés créés à la demande pour répondre à un besoin spécifique, capables de s'organiser sans infrastructure définie préalablement

Définition 2 [21]

Un réseau mobile ad hoc, appelé généralement MANET (Mobile Ad hoc NETWORK), est un réseau sans fil qui consiste en une grande population, relativement dense, d'unités mobiles qui se déplacent dans un territoire quelconque et dont le seul moyen de communication est l'utilisation des interfaces sans fil généralement le medium radio, sans l'aide d'une infrastructure préexistante ou administration centralisée, ces unités mobiles jouent à la fois le rôle de terminaux et de routeurs pour permettre le passage de l'information entre elles.

Il permet donc à deux nœuds qui sont chacun à portée des ondes l'un de l'autre (condition appropriée de propagation d'ondes radio) de rentrer en communication directement.

Un réseau ad hoc doit être facilement déployé, les nœuds peuvent joindre ou quitter le réseau de manière totalement dynamique sans informer le réseau, et si possible sans effet de bord sur les communications des autres membres.

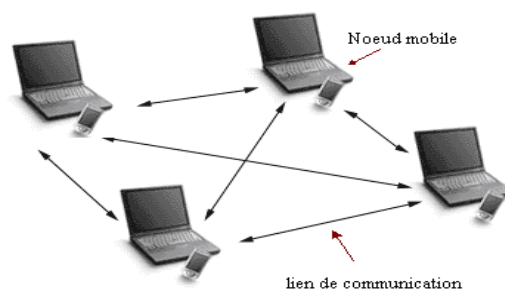


Figure I.6 : Un exemple de réseau Ad hoc.

I.3.2 Historique et évolution des réseaux Ad Hoc [40]

Historiquement, les réseaux mobiles ad hoc ont été principalement utilisés afin d'améliorer les communications dans le domaine militaire. L'armée visait alors le déploiement rapide de systèmes de communication dans des zones difficiles, telles que champs de bataille ou lieux de catastrophes naturelles (mise en place d'un hôpital de campagne, par exemple). Les premières recherches sur les réseaux Ad hoc ont démarré dans les années 60 au sein d'un organisme de l'armée américaine **DARPA** (**D**efence **A**dvanced **R**esearch **P**roject **A**gency).

Les premières applications dans les réseaux ad hoc sont apparues avec le projet PRNet (Packet Radio Network) de DARPA en 1972, et avaient pour objectif de trouver une architecture de réseau radio facile à déployer pour l'échange de données tactiques.

Différents algorithmes ont été développés dans le cadre de ce projet, mais ils étaient basés sur des réseaux ne comportant que quelques nœuds.

Pour pallier les principaux problèmes du projet PRNet, le projet SURAN (Survivable Radio Networks) a été lancé en 1983, son principal objectif était d'étendre les algorithmes développés par PRNet pour des réseaux plus larges.

Un autre projet IT (Tactical Internet) a été développé en 1997, qui est l'une des implémentations des réseaux mobiles ad hoc multi sauts.

En 1999 ELB ACTD (Extending the Littoral Battle-space Advanced Concept Technology Demonstration) a été développé dont l'objectif est de démontrer la faisabilité de concepts militaires pour les communications des bateaux en mer aux soldats sur la terre par l'intermédiaire d'un relais aérien.

Aujourd'hui les recherches continuent avec encore plus de ferveur et d'enthousiasme suscitant beaucoup d'intérêt dans le domaine des réseaux sans fil.

I.3.3 Modélisation des réseaux mobiles Ad Hoc

Un réseau mobile Ad Hoc peut être modélisé par un graphe $G_t = (V_t, E_t)$ où :

V_t : représente l'ensemble des nœuds (les unités ou les hôtes mobiles) du réseau.

E_t : modélise l'ensemble des connexions entre ces nœuds.

Si $e = (u, v)$ appartient à E_t , cela veut dire que les nœuds u et v peuvent communiquer directement à l'instant t .

Le réseau mobile Ad Hoc est modélisé par un graphe dont les nœuds représentent les stations mobiles du réseau et une connexion entre deux nœuds qui signifie qu'à cet instant, les deux nœuds peuvent communiquer directement (sans passer par d'autres nœuds pour

acheminer le paquet transmis). La figure I.7 montre un exemple d'un réseau Ad Hoc de 8 unités mobiles modélisé sous forme d'un graphe

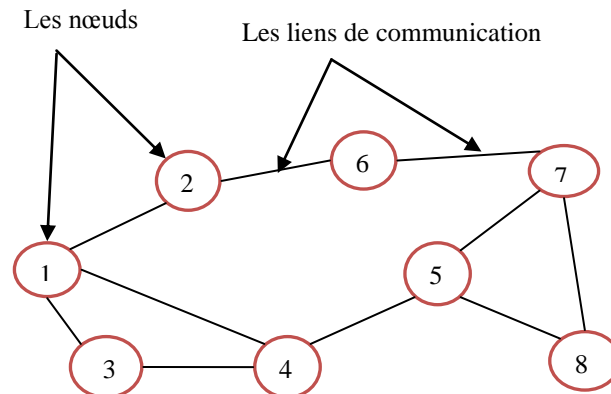


Figure I.7 : Modélisation d'un réseau Ad Hoc

I.3.4 Modes de communication dans les réseaux mobile Ad Hoc [28]

Les échanges de données dans les réseaux mobiles utilisent les modes de communication suivants :

I.3.4.1 Le mode Unicast

Le terme unicast définit une connexion réseau point à point. On entend par unicast, le fait de communiquer entre deux ordinateurs identifiés chacun par une adresse réseau unique.

Les paquets de données sont routés sur le réseau suivant l'adresse du destinataire, seul le destinataire intercepte et décode le paquet qui lui est adressé.

I.3.4.2 Le mode Multicast (multipoint)

On entend par multicast, le fait de communiquer simultanément avec un groupe d'ordinateurs identifié par une adresse spécifique (adresse de groupe). Son avantage par rapport au mode classique unicast devient évident quand on veut diffuser de la vidéo. Les paquets de données sont routés sur le réseau selon l'adresse des destinataires encapsulée dans la trame transmise. Seuls les destinataires interceptent et décodent les paquets qui leurs sont adressés.

I.3.4.3 Le mode Broadcast (la diffusion)

Le broadcast est un terme anglais définissant une diffusion de données depuis une source unique à un ensemble de récepteurs. Contrairement à une communication Point à Point, il est possible d'adresser des paquets de données à un ensemble de machines d'un même réseau uniquement par des adresses spécifiques qui seront interceptées par toutes les

machines du réseau ou sous réseau. La figure I.8 illustre les différents modes de communication.

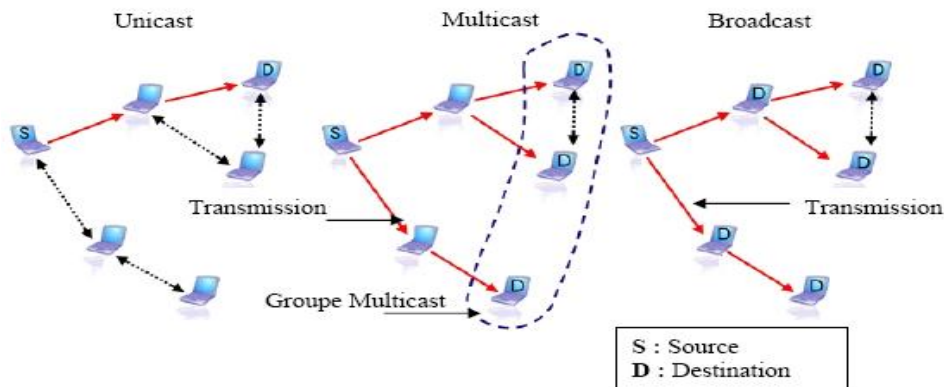


Figure I.8: Les différents modes de communication

I.3.5 Caractéristiques des réseaux Ad Hoc [14][21][26]

Les réseaux mobiles Ad Hoc présentent plusieurs caractéristiques, à savoir :

I.3.5.1 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.

I.3.5.2 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.

Dans l'exemple ci-dessus, la machine **A** dont la portée est schématisée par le cercle orange, veut communiquer avec la machine **C** se trouvant hors de son champ de réception. Pour aboutir, la connexion réseau va donc utiliser la machine **B** se trouvant à portée de réception des machines **A** et **C**.

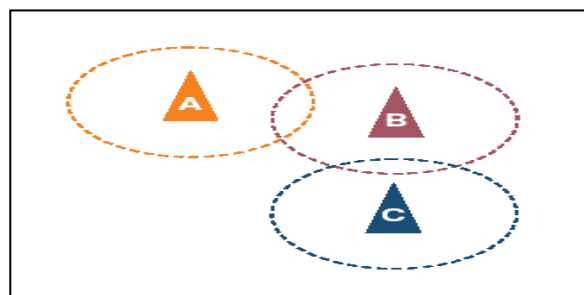


Figure I.9 : Portée d'un nœud [14]

I.3.5.3 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 de réseau sans fil très dynamique. La figure I.10 illustre la topologie dynamique des réseaux Ad Hoc.

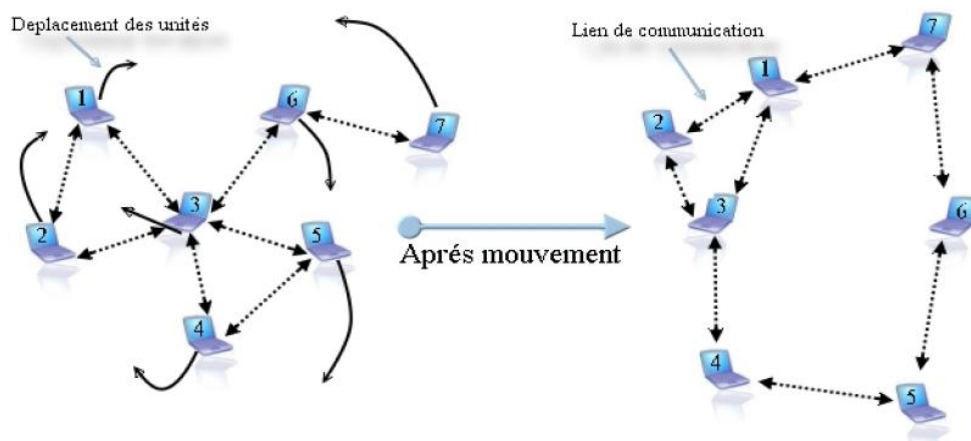


Figure I.10: Topologie dynamique des réseaux ad hoc.

I.3.5.4 L'hétérogénéité des nœuds

Un nœud mobile peut être équipé d'une ou plusieurs interfaces radio ayant des capacités de transmission variées et opérant dans des plages de fréquences différentes.

Cette hétérogénéité de capacité peut engendrer des liens asymétriques dans le réseau. De plus, les nœuds peuvent avoir des différences en terme de capacité de traitement (CPU, mémoire), de logiciel, de taille (petit, grand) et de mobilité (lent, rapide). Dans ce cas, une adaptation dynamique des protocoles s'avère nécessaire pour supporter de telles situations.

I.3.5.5 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 n'est pas approprié. Cependant, certaines applications des réseaux ad hoc peuvent nécessiter une utilisation allant jusqu'à des dizaines de milliers de nœuds.

I.3.5.6 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.

I.3.6 Les contraintes liées aux réseaux Ad hoc [6][14][15][26][40]

- **Bande passante limitée**

La communication dans les réseaux Ad Hoc se base sur le partage d'un medium de transmission (les ondes radio), ce qui induit que la bande passante réservée pour un hôte soit modeste.

- **Contrainte d'énergie**

Les nœuds mobiles sont destinés à être portables et mobiles et donc à être alimentés par des sources d'énergie autonomes comme les batteries ou les autres sources consommables (exemple d'énergie solaire). La durée de vie des batteries est limitée, ce qui se répercute par conséquent sur les services et les applications supportées par chaque nœud. Le paramètre d'énergie doit être pris en considération dans tout le contrôle fait par le système.

- **Liens unidirectionnels :**

Un lien unidirectionnel représente la possibilité qu'un nœud soit entendu (à portée d'ondes) d'un autre mais pas l'inverse. Cela arrive notamment lorsque les puissances d'émission sont différentes suivant les émetteurs (mode de propagation des ondes). Ce qui pose un problème des acquittements que l'on ne peut pas envoyer.[6]

La figure I.11 représente l'influence des puissances d'émission sur les liens de communication. Les nœuds **B** et **C** sont totalement à portée du nœud **A**, alors que le nœud **D** ne l'est pas. De plus, nous pouvons remarquer que les portées de communication des nœuds **A**, **B** et **C** se chevauchent, alors que le nœud **D** est à la portée de **B** seulement, et **B** n'est pas à la portée de **D**

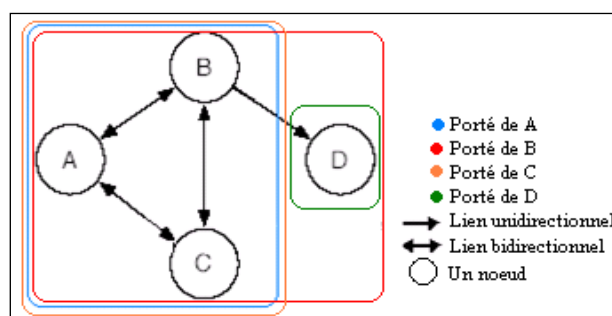


Figure I.11 : Influence des puissances d'émission sur les liens de communications.

- **Sécurité physique limitée**

Les réseaux mobiles ad hoc sont très sensibles aux attaques extérieures par rapport aux réseaux filaires classiques. Les données envoyées transitent par des équipements d'utilisateurs inconnus ce qui pose un problème de confidentialité et nécessite l'utilisation d'outils de cryptage et de sécurisation des données.

- **Interface radio multiple**

Lorsqu'un nœud possède plusieurs interfaces radio, les protocoles deviennent tout de suite beaucoup plus complexes, car chaque interface possède sa propre zone de couverture.

- **Changement de topologie**

La mobilité des nœuds provoque des changements fréquents dans la topologie du réseau. La réactivité du dispositif mis en place face à ces modifications a un impact direct sur la qualité du service proposé à l'utilisateur.

- **Interférences**

Les liens radio ne sont pas isolés, ce qui fait que le taux d'erreur de transmission dans les réseaux radio est plus élevé que dans les réseaux filaires. Cela est dû généralement aux problèmes d'interférences qui peuvent être de natures diverses, à savoir :

- Le nombre limité de canaux disponibles.
- Les fréquences d'émissions sont proches, ainsi, les émetteurs travaillant à des fréquences proches peuvent interférer entre eux.
- Les bruits produits par l'environnement (certains équipements électriques, certains moteurs...).
- Les phénomènes d'atténuation, réflexion et de chemins multiples qui rendent le signal incompréhensible en le déformant.

- **Nœud caché**

Ce phénomène est très particulier à l'environnement sans fil. Un exemple est illustré dans la figure I.12. Dans cet exemple, les nœuds **B** et **C** ne s'entendent pas, à cause d'un obstacle qui empêche la propagation des ondes. Les mécanismes d'accès au canal vont permettre alors à ces nœuds de commencer leurs émissions simultanément. Ce qui provoque des collisions au niveau du nœud **A**.

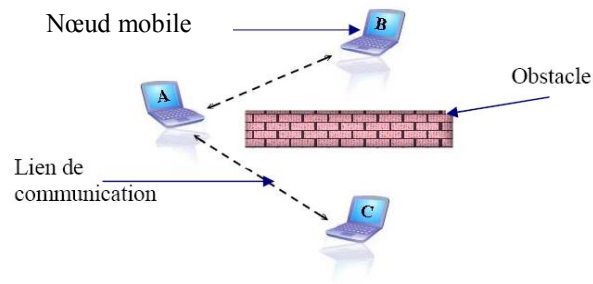


Figure I.12 : Nœud caché.

- **Le nœud exposé [8]**

Ce problème survient quand un nœud veut établir une transmission avec un deuxième, mais doit la retarder car il y a une transmission en cours entre deux autres nœuds se trouvant dans son voisinage. La figure I.13 décrit un scénario typique.

Supposons que les stations **A** et **C** peuvent entendre les transmissions de **B**, mais que **A** n'entend pas **C** (et vice-versa). Supposons aussi que **B** est entrain d'envoyer des données vers **A** et que, au même moment, **C** veut communiquer avec **D**. En suivant la logique *CSMA/CA*, le nœud **C** va commencer par déterminer si le support est libre. À cause de la communication entre **B** et **A**, **C** trouve le support occupé et il retarde son envoi bien que celui-ci n'aurait pas causé de collisions.



Figure I.13: Nœud exposé [40]

- **Configuration et adressage**

Le schéma d'adressage à adopter et le mécanisme de configuration qui permet à ces adresses d'être assignées aux diverses machines dans le réseau sont deux autres problèmes liés aux réseaux Ad hoc.

- **La mobilité des nœuds et maintenance des routes**

La mobilité continue des nœuds crée un changement dynamique de topologie. Par exemple, un nœud peut joindre le réseau, changer de position ou quitter le réseau. Ce

déplacement a naturellement un impact sur la morphologie du réseau et peut modifier le comportement du canal de communication. Ajoutons à cela, la nature des communications (longues et synchrones, courtes et asynchrones,...). Les algorithmes de routage doivent ainsi résoudre ces problèmes et supporter la maintenance et prendre en charge en un temps limité la reconstruction des routes tout en minimisant l'overhead généré par les messages de contrôle.

I.3.7 Domaines d'applications des réseaux ad hoc [14][26]

Les réseaux mobiles ad hoc ont une très large palette d'utilisations. En effet, ils sont robustes, peu coûteux et s'adaptent aussi bien aux milieux urbains, qu'aux milieux ruraux.

Parmi les applications nous citons :

- **Les applications militaires**

Un réseau mobile ad hoc est la solution idéale pour maintenir la liaison entre des chars d'assauts, des avions de chasse ou même entre des soldats et leur supérieurs au cours des exercices militaires ou dans un champ de bataille.

- **Opérations de secours**

Lors des catastrophes naturelles (Incendies, inondations, tremblement de terre...etc.), les réseaux mobiles Ad Hoc peuvent résoudre le problème de communication là où une installation filaire ne peut être réalisée qu'après de très longs délais d'attente.

- **Applications commerciales**

Pour un paiement électronique distant ou pour l'accès mobile à l'Internet, ou service de guide en fonction de la position de l'utilisateur.

- **Les sites de patrimoine**

Dans les site archéologiques, musées, châteaux ou tout autre lieu semblable où dans la plus part des cas il est interdit d'installer des réseaux filaires vu le risque de nuisance sur de tels environnements.

- **Utilisation à des fins éducatives**

Les réseaux Ad Hoc facilitent l'échange et le partage d'informations entre les participants d'une conférence ou séance de cours.

- **Mise en œuvre des réseaux véhiculaires (Vehicular Ad hoc Network)**

Il se peut que les véhicules aient besoin de communiquer, soit entre eux, soit avec leur environnement pour partager des informations ou par simple loisir. Etant donné que les

véhicules circulent à grande vitesse, la solution ad hoc est donc plus adéquate et moins coûteuse.

I.4 Réseaux Véhiculaires Ad hoc

I.4.1 Définition d'un réseau VANET [2][7][27]

Un réseau VANET est une particularité des réseaux MANET où les nœuds mobiles sont des véhicules (intelligents) équipés de calculateurs, de cartes réseau et de capteurs. Comme tout autre réseau Ad hoc, les véhicules peuvent communiquer entre eux (pour échanger les informations sur le trafic par exemple) ou avec des stations de base placées tout au long des routes (pour demander des informations ou accéder à internet...).

Les réseaux véhiculaires regroupent deux grandes classes d'applications, à savoir les applications qui permettent de bâtir un système de transport intelligent ITS (Intelligent transport System) et celles liées au confort ou avertissement du conducteur et des éventuels passagers.

La figure I.14 représente la hiérarchie des réseaux sans fil où elle schématise l'inclusion des réseaux véhiculaires Ad Hoc VANET dans les réseaux mobile Ad Hoc MANET, les MANET dans les réseaux Mobiles ainsi que les réseaux mobiles dans les réseaux sans fil.

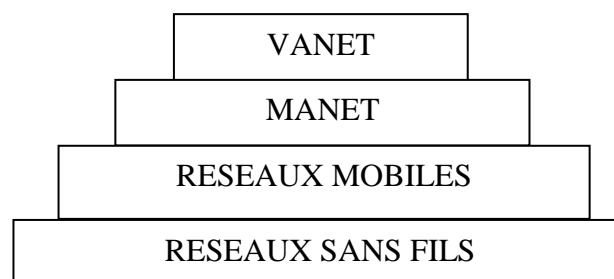


Figure I.14: Hiérarchie des réseaux sans fil.

I.4.2 Le Nœud du réseau VANET [27]

Un nœud d'un réseau VANET est un véhicule équipé de terminaux tels que les calculateurs, les interfaces réseaux ainsi que des capteurs capables de collecter les informations et de les traiter. On parle de la notion de « véhicule intelligent ». La figure I.15 modélise un véhicule intelligent.

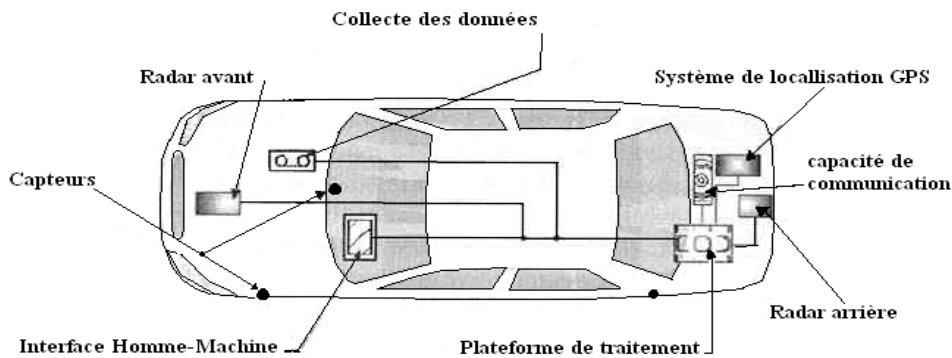


Figure I.15 : Véhicule intelligent [27].

I.4.3 Technologies utilisées dans la communication véhiculaire[2][17][27]

Les réseaux véhiculaires par analogie à ce qui existe dans les réseaux sans fil peuvent être déployés suivant trois catégories :

I.4.3.1 Communication de véhicule à véhicule

Dans cette catégorie, un réseau de véhicule est vu comme un cas particulier du réseau MANET (Mobile Ad Hoc Network) où les contraintes d'énergie, de mémoire et de capacité sont relaxées et où le modèle de mobilité n'est pas aléatoire mais prévisible avec une très grande mobilité. Cette architecture peut être utilisée dans le scénario de diffusion d'alertes (freinage d'urgence, collision, ralentissement...) ou pour la conduite coopérative.

Aucune infrastructure n'est utilisée, aucune installation n'est nécessaire sur les routes et tous les véhicules sont équipés pour communiquer directement entre eux n'importe où, que se soit sur les autoroutes, des routes de montagnes ou des routes urbaines, ce qui donne une communication moins coûteuse et plus flexible.

Cette approche souffre de certains inconvénients dont nous citons :

- Les délais de communication qui sont élevés, étant donné que la communication se fait en utilisant le multi sauts.
- Les déconnexions fréquentes dues au fait que les véhicules sont mobiles.
- La sécurité réseau est très limitée

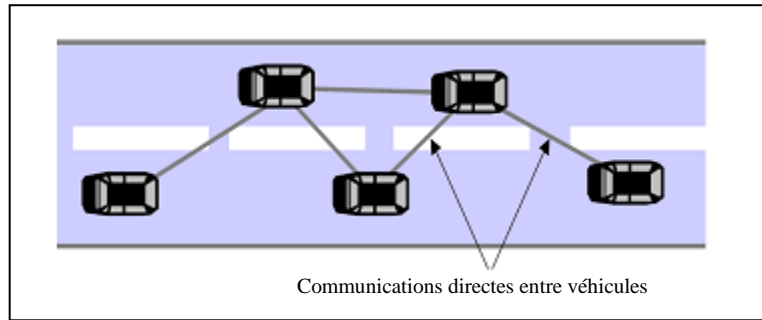


Figure I.16: Communication véhicule à véhicule

I.4.3.2 Communication de véhicule avec utilisation d'infrastructures

Dans cette catégorie, on ne se concentre pas seulement sur des simples systèmes de communications inter véhicules mais aussi ceux qui utilisent des stations de bases ou points d'infrastructure RSU(Road Side Units, dénomination proposée par le consortium C2C-CC). Cette approche repose sur le modèle client/serveur où les véhicules sont les clients et les stations installées le long de la route sont les serveurs. Ces serveurs sont connectés entre eux via une interface filaire ou sans fil. Toute communication doit passer par eux. Ils peuvent aussi offrir aux utilisateurs plusieurs services concernant le trafic, accès à internet, échange de données de voiture-à-domicile et même la communication de voiture-à-garage pour le diagnostic distant.

L'inconvénient majeur de cette approche est que l'installation des stations le long des routes est une tâche coûteuse et prend beaucoup de temps, sans oublier les coûts relatifs à la maintenance des stations.

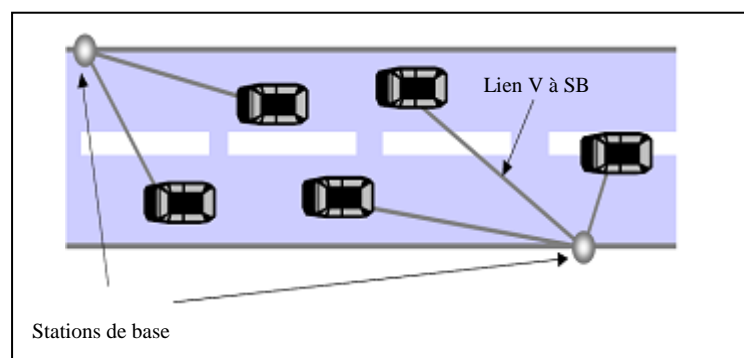


Figure I.17: Communication véhicule à station de base.

I.4.3.3 Communication Hybride

La combinaison des communications véhicules à véhicules 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.

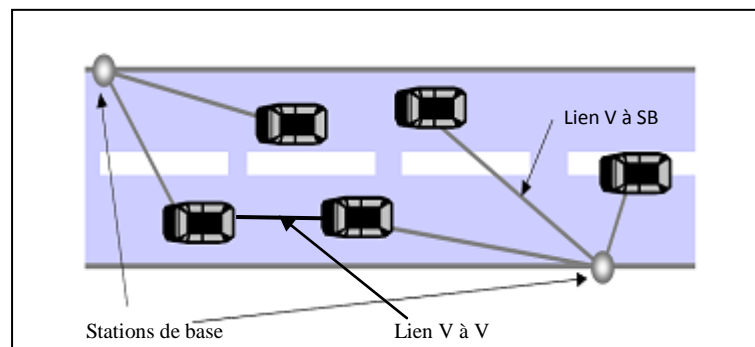


Figure I.18: communication hybride.

I.4.4 Caractéristiques des réseaux VANET [2][18][27]

Les réseaux véhiculaires ont des caractéristiques spécifiques qui les distinguent des réseaux Ad Hoc, à savoir :

I.4.4.1 La Collecte d'informations et la perception de l'environnement proche

La collecte d'informations se fait en utilisant différents capteurs de toutes catégories (caméras, capteurs de pollution, capteurs de pluies, capteurs de l'état de la route et de voiture, etc...) qui permettent au conducteur à bord de son véhicule de disposer d'un certain nombre d'informations et d'une meilleure visibilité pour pouvoir réagir d'une manière adéquate aux changements de son environnement proche.

I.4.4.2 Capacité de traitement, d'énergie et de communication

Contrairement au contexte des réseaux Ad Hoc où la contrainte d'énergie à titre d'exemple représente une des problématiques traitées, les éléments du réseau VANET n'ont pas de limite en terme d'énergie et disposent d'une grande capacité de traitement et peuvent avoir plusieurs interfaces de communication (WIFI, Bluetooth et autres). Grâce aux Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication (NTIC) le conducteur peut prendre une décision à l'aide des traitements et des interprétations des informations collectées.

I.4.4.3 Environnement de déplacement et modèle de mobilité

Les environnements pris en compte par les réseaux Ad Hoc sont souvent limités à des espaces ouverts ou indoor (comme le cas d'une conférence ou à l'intérieur d'un bâtiment). Les déplacements des véhicules quant à eux sont liés aux structures des routes (intersections, panneaux de signalisation, etc...) et aux stations de base routières (infrastructures) que se soit dans les autoroutes ou au sein d'une zone métropolitaine. Les contraintes imposées par ce type d'environnement, à savoir les obstacles radio et les effets de la propagation à trajets multiples (multipath) ou d'évanouissement (fading), affectent considérablement le modèle de mobilité et la qualité des transmissions radio à prendre en compte dans les protocoles de routage. En outre la mobilité est un facteur lié directement au conducteur du véhicule.

I.4.4.4 Forte mobilité, topologie du réseau et connectivité

A la différence des réseaux Ad Hoc, les réseaux VANET sont caractérisés par la forte mobilité des nœuds (véhicules), liée à la vitesse des voitures qui est très importante dans les autoroutes. Par conséquent, un nœud peut rejoindre ou quitter le réseau en un temps très court, ce qui rend les changements de topologie très fréquent. De plus, des problèmes peuvent apparaître quand le système IVC (Inter Vehicle Communication) n'est pas équipé dans la majorité des véhicules.

I.4.4.5 Type de l'information transportée et diffusée

Un des objectifs des réseaux VANET étant la sécurité routière. Les types de communications s'axeront sur les diffusions de messages d'une source vers plusieurs destinataires. Néanmoins, les véhicules sont concernés par la diffusion d'informations en fonction de leurs positions géographiques et leurs degrés d'implication dans l'évènement déclenché. Dans de telles situations, les communications sont principalement unidirectionnelles.

I.4.5 Applications des réseaux VANET [2][27]

Les principales applications des réseaux VANET peuvent être classées en trois catégories.

I.4.5.1 Application dans la prévention et la sécurité routière

La sécurité routière est devenue une priorité dans la plupart des pays développés, cette priorité est motivée par le nombre croissant d'accidents sur ses routes associé à un parc de véhicules de plus en plus important. Les VANET permettent de prévenir les collisions et les travaux sur les routes, de détecter les obstacles (fixes ou mobiles) et de distribuer les informations météorologiques par envoi de messages d'alerte. A titre d'exemple, alerter un

conducteur en cas d'accidents permet d'avertir les véhicules qui se dirigent vers le lieu de l'accident que les conditions de circulations se trouvent modifiées et qu'il est nécessaire de redoubler de vigilance. Les messages d'alertes et de sécurité doivent être de taille réduite pour être transmis le plus rapidement possible et doivent être émis à des périodes régulières.

I.4.5.2 Application pour l'optimisation du trafic et aide dans la conduite

Le trafic automobile peut être grandement amélioré grâce à la collecte et au partage de données collectées par les véhicules, ce qui devient un support technique pour les conducteurs. Une voiture peut, par exemple, être avertie en cas d'un ralentissement anormal (bouchon, embouteillage, éboulement de rochers ou travaux).

I.4.5.3 Applications au confort du conducteur et des passagers

Les réseaux véhiculaires peuvent aussi améliorer le confort des conducteurs et des passagers. Ce confort est illustré par l'accès à internet, la messagerie, le chat inter-véhicule, etc. Les passagers dans la voiture peuvent jouer en réseaux, télécharger des fichiers MP3, envoyer des cartes à des amis, etc.

I.4.6 Travaux dans le domaine des VANET [2][18][19][27][34]

Les propriétés des réseaux véhiculaires offrent des challenges importants, ce qui rend les VANET s'ouvrent à plusieurs domaines de recherche dont nous citons les plus importants:

I.4.6.1 Sécurité

La sécurité est un défi majeur ayant un grand impact sur le futur déploiement des réseaux véhiculaires ainsi que leurs applications. En raison de la sensibilité des domaines d'utilisation des VANET, une intrusion d'un véhicule malicieux aurait des conséquences graves sur l'ensemble des véhicules interconnectés. C'est pour cette raison que beaucoup de travaux de recherche ont été réalisés pour développer un mécanisme de sécurité instituant les relations de confiance entre les nœuds communicants et garantissant le contrôle d'accès aux services.

I.4.6.2 L'accès au canal

Les réseaux véhiculaires utilisent des communications radio. Par conséquent, il est important de concevoir des solutions spécifiques aux réseaux VANET qui permettent d'apporter de la qualité de service et de gérer les priorités en résolvant les problèmes d'interférences radio, des problèmes de propagation à multi-trajets des ondes ainsi que les irrégularités électromagnétiques.

I.4.6.3 Localisation des véhicules

Si l'un des véhicules du réseau doit être localisé (dans le cas d'un accident par exemple), les autres doivent être informés de sa position. Le problème est que tous les véhicules ne sont pas équipés d'un système de repérage par satellite (GPS). Pour cette raison, un mécanisme de localisation sans utilisation de GPS est nécessaire.

I.4.6.4 Problèmes de congestion

L'un des problèmes des VANET est que chaque véhicule communique avec tous ceux qui sont dans sa zone de couverture. Ceci entraîne une dégradation de la qualité de service (QoS) avec l'augmentation du nombre de véhicules. Ce problème a fait l'objet de plusieurs études.

I.4.6.5 Mobilité dans la simulation des réseaux

Dans la simulation des VANET, le facteur mobilité a longtemps été négligé. On ne considérait pas la différence de mouvements entre les nœuds des VANET et des MANET, ce qui pouvait biaiser les résultats de la simulation. Pour cette raison, de plus en plus d'équipes de recherche s'intéressent à l'étude de la mobilité dans les VANET.

Avec un bon simulateur, plus le modèle de mobilité est réaliste, plus les résultats de la simulation sont proches de la réalité. D'où l'impact direct des modèles de mobilité sur la réussite d'une simulation.

I.4.6.5 Routage

Le routage dans les réseaux VANET est un problème très difficile à gérer et un axe de recherche pour beaucoup de chercheurs. Pour que les véhicules puissent communiquer entre eux, un protocole de routage doit être défini. En effet quand les terminaux ne sont pas à une portée de transmission radio directe, le routage est exigé pour établir la communication entre les véhicules.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les réseaux sans fil, les réseaux mobiles Ad Hoc ainsi que les réseaux véhiculaires Ad Hoc VANET qui ne sont qu'une particularité des réseaux MANET. Nous avons décrit également leurs caractéristiques, leurs applications et leurs contraintes.

Une des contraintes des réseaux MANET et VANET est le problème d'acheminement des données entre les nœuds mobiles du réseau. Dans le but d'assurer la connectivité du réseau, malgré l'absence d'infrastructure et le changement de la topologie, 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 : chaque nœud joue ainsi le rôle de routeur.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons le routage dans les réseaux mobile Ad hoc, la classification des protocoles de routage ainsi que des détails sur le fonctionnement de certains protocoles.

C *HAPITRE II*

Routage dans les Réseaux Ad Hoc

Introduction

Une des caractéristiques des réseaux Ad Hoc est l'absence d'infrastructure fixe préexistante, ce qui fait que ces réseaux doivent assurer automatiquement leur propre organisation pour pouvoir acheminer les données entre les unités mobiles. L'acheminement des données requiert l'utilisation de protocoles de communication ou de routages spécifiques pour assurer une stratégie qui garantit à n'importe quel moment, la connectivité du réseau, malgré l'absence des stations de base. Chaque nœud ou unité mobile joue alors le rôle de station et de routeur. La stratégie du routage doit prendre en considération les changements de topologie, la forte mobilité, la capacité limitée des liaisons radio ainsi que les autres caractéristiques des réseaux Ad Hoc.

Dans ce chapitre nous allons étudier le concept de routage dans les réseaux Ad Hoc, les problèmes liés à la conception des protocoles de routage, la classification des protocoles selon différentes manières et plusieurs critères, à savoir :

- L'architecture (uniforme ou non uniforme).
- L'approche de routage (protocole proactif, réactif ou hybride).
- L'algorithme utilisé : algorithmes dynamiques (vecteur de distance ou état de liens) ou algorithmes à la demande (source ou apprentissage en arrière)].

Nous décrivons également les protocoles OLSR et DSR ainsi que leurs fonctionnements pour enfin terminer avec quelques exemples de protocole de routage VANET.

Routage de données dans les réseaux ad hoc

II.1 Définitions [13][21][30][39]

Un protocole est un ensemble de règles de communication respectées par tous les systèmes interconnectés afin de permettre la liaison entre systèmes émetteurs et systèmes récepteurs.

Les objectifs d'un protocole sont:

- ❖ L'information doit arriver le plus rapidement possible et correcte aux destinations.
- ❖ L'expéditeur doit être informé, éventuellement, de la bonne réception par un acquittement.
- ❖ Il ne doit pas y avoir de conflit en cas de requêtes simultanées.
- ❖ La transparence du réseau pour l'utilisateur

Le routage est une méthode d'acheminement des informations à la bonne destination à travers un réseau de connexion donné.

Le routage est, dans un réseau Ad Hoc, la brique technologique fondamentale permettant d'assurer la connectivité du réseau. Dans un tel réseau, les nœuds radio ne sont pas nécessairement à portée directe. Un paquet peut donc devoir être relayé par des nœuds intermédiaires pour atteindre sa destination finale.

Le routage dans les réseaux ad-hoc est assez délicat étant donnée la nature changeante de la topologie de ce type de réseaux. De nombreux protocoles et algorithmes ont été proposés et leurs performances ont été analysées dans différentes situations.

Le protocole de routage est un protocole qui permet d'acheminer un paquet envoyé par une source à une destination en respectant certains critères.

II.2 Problème de routage dans les réseaux mobiles Ad Hoc [4][21][38]

Si certaines propriétés des réseaux MANET offrent des atouts qui n'existent pas dans les réseaux filaires, il n'empêche que des problèmes ont en découlé, les principaux problèmes peuvent se résumer comme suit :

- La capacité limitée des liens radio : un protocole de routage doit être efficace en bande passante utilisée, il doit minimiser le trafic de contrôle nécessaire à l'établissement et à la maintenance des routes afin de réduire la charge sur le réseau.

- L'inexistence d'infrastructure ou d'administration fixe de communications, en particulier les routeurs, ce qui attribue la tâche de routage aux nœuds eux même du réseau et impose un fonctionnement distribué.
- La limitation de la portée de transmission d'un nœud et les problèmes inhérents aux transmissions sur le canal radio (interférence, masquage, atténuation de parcours, etc.).
- Les changements fréquents, brusques et imprévisibles de l'état des liens et des nœuds doivent être pris en compte par le protocole de routage.
- Les ressources matérielles restreintes des unités mobiles excluent les algorithmes exigeant en capacité de traitement et de mémoire.
- La contrainte énergétique due à la capacité limitée des batteries doit être prise en compte par le protocole de routage.

Vu ces difficultés, il s'avère nécessaire de mettre en œuvre des protocoles de routage qui s'adaptent aux exigences de ces réseaux.

En particulier, les critères suivants sont adoptés comme objectifs lors de l'élaboration d'un protocole de routage MANET :

- **Eviter les boucles de routage**

Une boucle de routage se produit lorsqu'un nœud d'une route choisit pour saut suivant un autre qui l'a précédé dans cette même route. Les boucles de routages sont néfastes pour les réseaux MANET d'une part parce qu'ils ne convergent pas, d'autre part parce qu'elles gaspillent de la bande passante et des ressources (en terme de mémoire et de traitement). Ces boucles doivent, par conséquent, être évitées.

- **Pouvoir maintenir une topologie dynamique**

Les réseaux MANET se caractérisent par un changement fréquent de la topologie, en particulier à cause de la technique multi saut. Si une route est établie vers une destination, il est très probable qu'un lien qui compose cette route soit coupé si l'un des nœuds qui le relie se déplace en dehors de la portée de l'autre. Les protocoles de routage MANET doivent s'adapter rapidement aux changements de topologies, en proposant des routes de longueurs acceptables, même en cas de forte mobilité des terminaux afin de garantir la viabilité des routes vers les destinations, même si des liens de ces routes sont coupés.

- **Réduire la taille des entêtes :** Les messages de contrôle consomment de la bande passante, des ressources mémoires et de la puissance de la batterie.

De ce fait, les protocoles de routage doivent réduire au maximum la taille des données de contrôle et de signalisation afin de minimiser le délai de transmission et les pertes de données pour allouer la grande partie des ressources aux données utiles.

- **Réduire les traitements sur les entêtes**

Les algorithmes des protocoles de routage dans les réseaux MANET doivent avoir une complexité réduite afin de réduire le nombre de cycles pour effectuer leurs traitements et ainsi diminuer la consommation des ressources.

- **Le temps de latence**

La qualité des temps de latence et de chemins doit augmenter dans le cas où la connectivité du réseau augmente.

- **Offrir le routage multi-saut**

Un protocole de routage se doit d'offrir un mécanisme de découverte de routes multi-sauts entre une source et une destination si celles-ci ne s'entendent pas.

II.3 Classification des protocoles de routage dans les réseaux mobiles Ad Hoc [3][17][21][26][28][30]

Les protocoles de routage destinés aux réseaux mobiles Ad Hoc peuvent être classés de différentes manières, selon plusieurs critères. Ils peuvent être classés selon leur architecture (uniforme ou non uniforme), leur approche de routage (protocole proactif, réactif ou hybride) ainsi que par leur type d'algorithmes dynamiques (vecteur de distance ou état de liens) ou algorithmes à la demande (source ou apprentissage en arrière).

II.3.1 Classification selon l'architecture

Ce critère divise les protocoles de routage en deux classes

II.3.1.1 Les protocoles uniformes : Les protocoles de routage uniformes « à plat » considèrent que tous les nœuds sont égaux, dans le même niveau hiérarchique et possèdent, ainsi, les mêmes rôles et fonctions. Par conséquent, aucune hiérarchie n'est définie entre les nœuds du réseau, chaque nœud envoie et reçoit des messages de contrôle de routage, La décision d'un nœud de router des paquets dépendra de sa position.

II.3.1.2 Les protocoles non uniformes : Les protocoles de routage non uniformes « hiérarchiques » tentent de limiter la complexité du routage en réduisant le nombre de nœuds qui contribuent à la détermination des routes, ils fonctionnent en attribuant aux nœuds des rôles qui varient de l'un à l'autre. Une structure hiérarchique entre les nœuds est définie selon leurs fonctions. Certains nœuds sont élus pour accomplir des tâches bien particulières qui conduisent à une vision en plusieurs niveaux de la topologie du réseau afin de faciliter

l'équilibrage de la charge et de mieux la gérer (surtout dans les réseaux mobiles Ad Hoc de grande taille), ce qui conduit à une meilleure qualité de service.

II.3.2 Classification selon l'approche de routage [21][30]

Dans cette classification basée sur le mécanisme d'établissement de la route, nous distinguons trois classes :

II.3.2.1 Les protocoles proactifs

Le principe de base des protocoles proactifs est de calculer les routes à l'avance, en continu ainsi de maintenir à jour les tables de routage, de tel sorte que lorsqu'un nœud désire envoyer un paquet à un autre nœud, une route soit immédiatement connue.

Les nœuds dans les réseaux mobiles Ad Hoc peuvent apparaître et disparaître de manière aléatoire d'où la nécessité de mise en place d'un système d'échange continu des paquets de contrôle. Les tables de routage sont donc maintenues grâce à ces paquets. Cette manière de procéder permet aux nœuds de construire de façon distribuée la topologie du réseau, lorsqu'un nœud reçoit un paquet de contrôle, il met à jour ses tables de routage.

Ainsi, de nouvelles routes seront construites sur la base des informations topologiques transportées par les trames de contrôle. Ce processus est déclenché à chaque changement de topologie pour reconstruire à nouveau les routes.

Un des avantages de ces protocoles est la disponibilité immédiate de la route lors du besoin. Cependant, la bande passante diminue de part le trafic généré par l'échange de paquets de contrôle.

II.3.2.2 Les protocoles réactifs

Le principe des protocoles réactifs également appelés protocoles de routage à la demande (*on-demand routing protocols*) est de lancer le processus de recherche de routes uniquement en cas de besoin (à la demande). Cela permet d'économiser de la bande passante et de l'énergie. Lorsqu'un paquet doit être envoyé d'un nœud source vers un nœud cible, le protocole de routage va rechercher un chemin jusqu'à la destination, une fois ce chemin trouvé, il est inscrit dans la table de routage et peut être utilisé tant que la destination est joignable ou jusqu'au moment où la route devient inutile. En général, cette recherche se fait par inondation (un paquet de recherche de route est transmis de proche en proche dans tout ou partie du réseau). Dans ce cas, la bande passante est plus large, cependant, du fait que l'on ne dispose pas immédiatement de la route vers la destination. Le délai d'établissement de la route est plus important en comparaison avec les protocoles proactifs.

II.3.2.3 Les protocoles hybrides

Les protocoles hybrides combinent les deux approches précédentes. Ils utilisent une technique proactive dans un petit périmètre autour de la source où le nombre de sauts est assez petit (par exemple trois à quatre sauts) et réactive pour les nœuds plus éloignés.

L'avantage des protocoles hybrides est le fait qu'ils s'adaptent mieux aux réseaux de grandes tailles. Cependant, ce type de protocole cumule les inconvénients des protocoles proactifs et ceux des protocoles réactifs, tels que l'échange de paquets de contrôle réguliers et inondation de l'ensemble de réseau pour chercher une route vers un nœud éloigné.

Une comparaison entre les deux classes proactive et réactive est présentée dans le tableau II.1 [8]

Routage proactif		Routage réactif	
Avantages	inconvénients	Avantages	inconvénients
La topologie du réseau est connue de tous les mobiles. Les routes sont disponibles immédiatement.	Il faut diffuser régulièrement des informations sur les changements de topologie du réseau.	Les mobiles ne conservent pratiquement aucune information sur la topologie globale du réseau : seules les informations sur les routes actives sont stockées.	
Les protocoles proactifs disposent en permanence d'une route pour chaque destination dans le réseau.	Un volume de signalisations important.	Les protocoles réactifs génèrent à priori un volume plus faible de signalisations.	Les protocoles réactifs engendrent un délai lors de la construction (ou de la reconstruction) des routes et produisent plus difficilement des routes optimales.

Tableau II.1 : Comparaison entre protocoles proactifs et protocoles réactifs.

II.3.3 Classification selon le type d'algorithme utilisé

Une autre classification basée sur le type d'algorithme utilisé est possible pour les protocoles de routage Ad Hoc. Il existe deux grandes familles d'algorithmes de routage dynamique

(vecteur de distance ou état de liens) et deux grandes familles d'algorithmes de routage à la demande (source ou apprentissage en arrière).

II.3.3.1 Les protocoles de routage à vecteur de distance (Distance Vector Protocols)

Ces protocoles sont basés sur l'algorithme de Bellman-Ford. Leur principe est basé sur l'échange entre les nœuds voisins d'informations de distance des destinations connues. Autrement dit, chaque nœud envoie à ses voisins la liste des destinations joignables et le coût (distance) associé au chemin le plus court menant vers cette destination.

A chaque réception d'un paquet contenant les informations topologiques, le nœud en question met à jour sa liste de destination par le coût minimum.

Les protocoles à vecteur de distance sont simples à programmer et facile à implémenter. En revanche, ils ont un mauvais comportement dans les réseaux dynamiques tel que les boucles de routage et le comptage à l'infini connu aussi sous le nom de problème de Bellman-Ford [32][33].

II.3.3.2 Les protocoles de routage à état des liens (Link State Protocols) [29]

Ces protocoles utilisent un algorithme plus efficace en calcul du plus court chemin que celui des protocoles de routage à vecteur de distance, qui est l'algorithme de Dijkstra. Ils sont basés sur le l'état des liens (topologie) du réseau, l'ensemble de ces informations permet aux nœuds de dessiner une vue globale sur le réseau. Une table de routage est maintenue dans chaque nœud. Elle est construite à partir des informations échangées sur l'état des liens du réseau. A partir de cette vue globale du réseau, il est facile de trouver des routes alternatives lorsqu'un lien est rompu. Ainsi une route est immédiatement disponible à la demande. Il est même possible d'utiliser simultanément plusieurs routes vers une même destination, augmentant ainsi la répartition de la charge et la tolérance aux pannes dans le réseau. En contre partie, si le réseau est étendu, la quantité d'informations sur l'état de tous les liens du réseau au niveau de chaque nœud nécessite un espace de stockage considérable.

II.3.3.3 Le protocole de routage source

Chaque nœud doit posséder la topologie et les caractéristiques du réseau en entier. Les données doivent être parfaitement à jour. Ce routage convient aux réseaux de tailles moyennes (pour éviter la surcharge de la mémoire) à hauts débits (le calcul de routes est effectué une seule fois). Pour cela, le temps de calcul des routes ne doit pas être trop grand.

Dans cet algorithme, afin d'émettre un paquet de données à un nœud, l'émetteur spécifie dans l'entête du paquet à envoyer l'adresse de chaque nœud à travers lequel le paquet va passer pour atteindre la destination (route source). Par la suite, l'émetteur transmet le paquet via son interface, au premier nœud spécifié dans la route source. Un nœud qui reçoit le

paquet, et qui est différent de la destination, supprime son adresse de l'entête du paquet reçu et le transmet au nœud suivant identifié dans la route source. Ce processus se répète jusqu'à ce que le paquet atteigne sa destination finale. Enfin, le paquet est délivré à la couche réseau du dernier hôte.

II.3.3.4 Le protocole de routage par apprentissage en arrière

Le chemin établi entre les nœuds est un chemin bidirectionnel simultané (*full duplex*). La source gardera trace du chemin tant qu'il restera en cours d'utilisation. Ce type de routage nécessite moins de mémoire que le routage source. Par conséquent, il est plus adapté pour des réseaux de plus grandes tailles.

Afin de transmettre un paquet à l'aide de cette méthode, le nœud émetteur inonde le réseau avec sa requête. Ainsi chaque nœud intermédiaire, dit le transit, 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 au nœud destinataire, et suivant le même chemin, ce dernier transmet sa réponse sous forme de requête.

II.4 Quelques protocoles de routage

II.4.1 Le protocole OLSR (Optimized Link State Protocol) [3][9][30]

OLSR pour Optimized Link State Protocol [RFC OLSR] est un protocole de routage proactif développé dans le cadre du projet Hypercom de l'Institut National de la Recherche en Informatique et Automatique (INRIA) de France et proposé en tant que RFC (Request For Comment) expérimentale à l'IETF (Internet Engineering Task Force). Il est considéré comme une optimisation du protocole à état des liens filaires pour les réseaux mobiles Ad Hoc. Il a pour objectif de fournir des routes de plus court chemin vers une destination en termes de nombre de sauts en utilisant l'algorithme de Dijkstra. Son innovation réside dans sa façon d'économiser les ressources radio lors des diffusions, ceci est réalisé grâce à l'utilisation de la technique des relais multipoints (MPR : Multi-Point Relaying), donc le principe est que chaque nœud construit un sous ensemble appelé MPR, parmi ses voisins, qui permet d'atteindre tous ses voisins à deux sauts, les nœuds de cet ensemble servent à acheminer et retransmettre les messages qu'ils reçoivent. Les voisins d'un nœud qui ne sont pas MPRs, lisent et traitent les paquets mais ne les retransmettent pas.

Le processus de construction des routes dans OLSR passe par les étapes suivantes :

- Découverte du voisinage
- Sélection des relais multipoints

- Annonce des MPRS et diffusion des voisinages
- Calcul des tables de routage
- **Découverte du voisinage**

Chaque nœud doit détecter ses voisins adjacents, c'est-à-dire ceux avec qui il a des liens directs. En raison de l'incertitude de la propagation radio, le lien entre deux nœuds voisins peut être unidirectionnel. Les liens considérés comme valides sont ceux vérifiés dans les deux directions. Le principe de la détection du voisinage est que chaque nœud diffuse périodiquement un message HELLO qui contient les informations sur son voisinage (la liste des adresses des nœuds voisins avec leurs états des liens). Un lien entre un nœud et son voisin peut avoir l'un des quatre états suivants : « symétrique », « asymétrique », « MPR » ou « perdu ». Symétrique signifie que le lien est valide et qu'il est possible de transmettre des données dans les deux sens. Asymétrique signifie que le nœud peut écouter ses voisins mais que l'inverse n'est pas encore possible. MPR signifie que le nœud a sélectionné son voisin comme relais multipoint ce qui implique que le lien est symétrique. Perdu indique que le lien entre le nœud et son voisin n'est plus valide.

Les échanges des messages HELLO permettent à chaque nœud de découvrir ses voisins à un saut ou à deux sauts (voisins des voisins).

Les informations de voisinages sont maintenues dans une base d'information qui contient les voisins à un saut, les voisins à deux sauts, les relais multipoints et les sélecteurs de relais multipoints. La figure II.1 illustre un exemple de détection du voisinage.

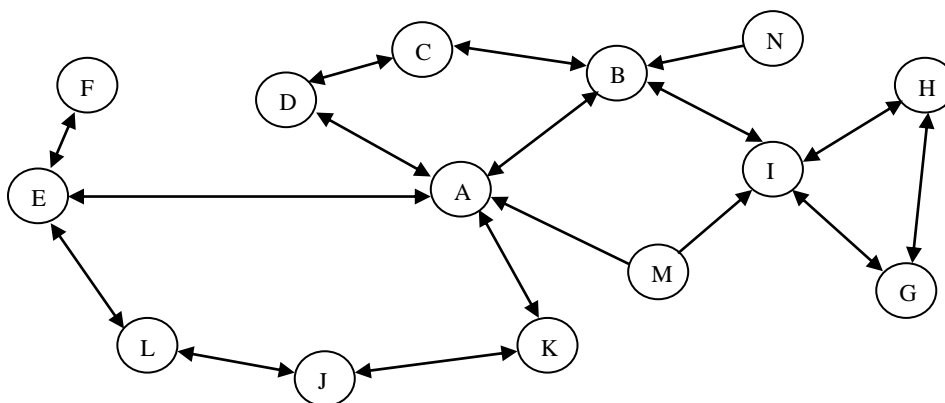


Figure N° II.1: Exemple d'information de voisinage.

Pour le nœud A :

Voisins à 1 saut	Etat de lien	Voisins à 2 sauts via les voisins à 1 saut
B	Symétrique	C , I
D	Symétrique	C
K	Symétrique	J
E	Symétrique	F , L
M	Asymétrique	/

Les MPRS de A sont : B, E et K.

Les sélecteurs MPRS de A sont : B , D , E , K

Pour le nœud B :

Voisins à 1 saut	Etat de lien	Voisins à 2 sauts via les voisins à 1 saut
A	Symétrique	E , D , K
C	Symétrique	D
I	Symétrique	G , H
N	Asymétrique	/

Les MPRS de B sont : A , I

Les sélecteurs MPRS de B sont : A , C , I

▪ **Sélection des relais Multipoints**

L'idée est d'ignorer, pour un nœud donné, un ensemble de liens et de voisins directs qui seraient redondants dans le calcul des routes du plus court chemin. Plus précisément seul un sous ensemble de l'ensemble des nœuds voisins est considéré pertinent pour le routage, il est choisi de manière à pouvoir atteindre tout le voisinage à deux sauts. Les nœuds qui constituent ce sous-ensemble sont dits Relais Multipoints. Une heuristique est utilisée pour le calcul de ce sous ensemble.

▪ **Annonce des MPRS et diffusion des voisinages**

En plus des messages HELLO utilisés pour découvrir et construire la liste des MPR de tous les nœuds du réseau, OLSR utilise les messages de topologie pour le contrôle de la topologie appelés TC (Topology Control), chaque nœud sélectionné comme MPR diffuse périodiquement à tous les nœuds du réseau des TC pour déclarer l'ensemble des sélecteurs MPR(MPR selector set), seuls les voisins MPR rediffusent le message TC reçu pour éviter

l'inondation, les nœuds n'ayant pas été choisis MPR ne génèrent pas de message TC. A la réception des messages TC, chaque nœud maintient une table de topologie contenant les informations topologiques du réseau, sur la base de cette table la table de routage sera calculée. L'entrée de la table de topologie possède le format suivant [T_dest, T_last, T_seq, T_time] où T_dest a sélectionné T_last comme un relais multipoint, T_seq est le numéro de séquence qui sert à connaître l'ordre de génération des messages TC et T_time le temps de validité de chaque entrée de la table de topologie.

▪ **Calcul de la table de routage**

Chaque nœud dans le réseau calcule sa table de routage pour permettre l'acheminement des informations vers tous les autres nœuds du réseau, ce calcul est basé sur les informations de voisinages et de topologie. L'algorithme du Dijkstra basé sur le plus court chemin en nombre de sauts est appliqué. Chaque entrée de la table de routage est constituée de tuples [R_dest, R_next, R_dist], elle signifie que le nœud identifié par R_dest est estimé être à une distance égale à R_dist du nœud local et que le voisin à un saut dont l'adresse est R_next est le prochain saut à emprunter dans le chemin qui relie le nœud local à R_dest. A chaque changement de topologie ou de voisinage la table de routage est recalculée afin de mettre à jour les informations relatives aux routes vers les différentes destinations.

Algorithme de calcul de la table de routage dans OLSR:

1. Ajouter tous les voisins directs symétriques avec une distance de 1 saut dans la table de routage.
2. Pour chaque voisin symétrique, ajouter tous ses voisins à deux sauts qui :
 - a) N'existent pas encore dans la table de routage.
 - b) Sont voisins symétriques du nœud considéré.
3. Pour chaque nœud à deux sauts ajouté dans la table de routage, ajouter tous les voisins (à trois sauts) qui ont été annoncés par les messages TC et qui n'existent pas encore dans la table de routage.
4. Répéter l'étape 3 jusqu'à ce qu'il existe une itération n où il n'y ait plus d'entrées distantes de n + 1

II.4.2 Le protocole DSR (Dynamic Source Routing) [5][16]

DSR pour Dynamic Source Routing [RFC DSR] est un protocole de routage réactif uniforme, simple et efficace, développé dans le cadre du projet monarch à l'université Carnegie Mellon, il est basé sur la technique de routage par la source sans utilisation de la table de routage contrairement au protocole OLSR et AODV. Dans cet algorithme, chaque

paquet contient la séquence complète des nœuds à travers lesquels il doit passer pour arriver à la destination. L'avantage de l'utilisation de l'algorithme de routage source est que les nœuds de transit n'ont pas besoin de maintenir à jour les informations sur la route puisque le paquet possède toutes ces informations. Un autre avantage de routage par la source est la possibilité du contrôle du trafic en lui proposant de suivre le chemin le plus adapté à ses besoins de qualités de services, Microsoft a proposé une version DSR (LQSR : Link Quality Source Routing) qui inclut la qualité de services. L'inconvénient de cette méthode est l'augmentation de la taille des paquets qui grandit avec l'augmentation des nœuds à traverser.

DSR est décomposé en deux processus, le premier est utilisé pour la découverte de la route à la demande et le second s'occupe des routes de communication en cours.

▪ **Découverte de la route**

La procédure est la diffusion d'une requête de route et l'émission d'une réponse. Lorsqu'un nœud source S souhaite envoyer des données à un nœud destination D et n'a pas de route vers ce nœud D, Le nœud S envoie un paquet Route Request (requête de recherche de route) à destination du nœud D, ce paquet se propage dans le réseau (voir figure II.2), cette propagation se termine lorsque le nœud D ou un nœud possédant un chemin vers celui-ci dans son cache est atteint. Le paquet contient l'adresse source, l'adresse de destination, un numéro d'identification et un champ Route Record dans lequel sera enregistrée la séquence des nœuds visités durant l'inondation du paquet Route Request dans le réseau.

Quand un nœud reçoit un paquet Route Request, il vérifie s'il connaît un chemin vers la destination, si ce n'est pas le cas, il ajoute son adresse dans le champ Route Record du paquet Route request et transmet ce paquet à ses voisins. Pour éviter les boucles et les multiplications des paquets Route Request, ce transfert ne se fait que si l'adresse du nœud n'apparaît pas déjà dans le champ Route Record.

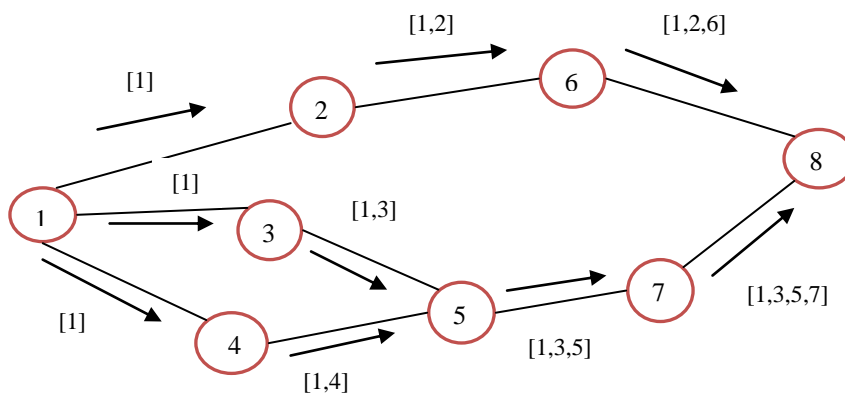


Figure N° II.2: Construction de l'enregistrement de route dans DSR.

Lorsque le paquet Route request atteint la destination (ou bien une station intermédiaire ayant une route vers la destination), la destination (ou le nœud intermédiaire) envoie un paquet de réponse Route reply (voir figure II.3) via le chemin donné dans le Route Record si les liaisons sont bidirectionnelles (symétriques) ou via un autre chemin (utilisant éventuellement une découverte de la route). Afin de diminuer le coût de la recherche de route, chaque nœud peut garder en mémoire les routes qu'il a apprises dans le cache de route.

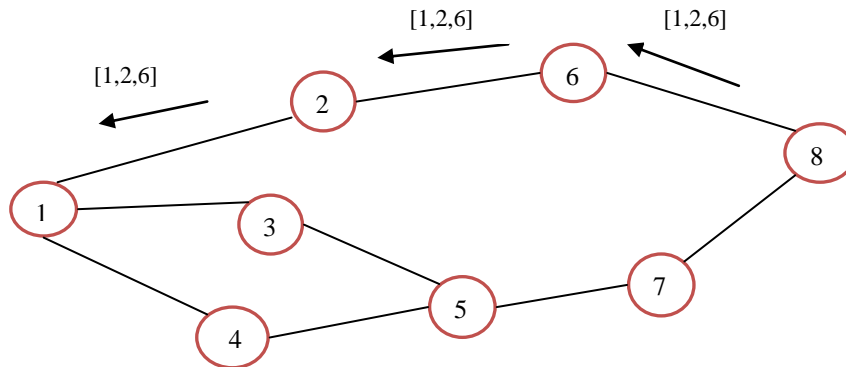


Figure N° II.3: L'envoi du chemin ou de la route replay (RREP).

▪ **Maintenance de route**

Lorsqu'un nœud transmet un paquet, il est responsable de confirmer sa bonne réception par son prochain saut vers la destination tout au long de la route source. Par exemple, dans la figure N° II.4 le nœud (A) a transmis un paquet au nœud (F) en utilisant les nœuds (B), (C), (D) et (E) comme des nœuds intermédiaires. Dans ce cas le nœud (A) est responsable de la réception du paquet par (B) qui est lui-même responsable de sa réception par (C). La mobilité des nœuds dans les réseaux Ad Hoc nécessite de vérifier, après l'envoi d'une donnée, que la topologie est toujours la même et que la source peut utiliser une source pour atteindre la destination en utilisant une procédure de maintenance de route.

Quand un nœud détecte une erreur de transmission, un paquet *route error* (erreur de route) contenant l'adresse du nœud qui a détecté l'erreur et celle du nœud qui le suit dans le chemin, est envoyé à l'émetteur original du paquet. Lors de la réception de ce paquet par la source, le nœud concerné par l'erreur est supprimé du chemin sauvegardé, et tous les chemins qui contiennent ce nœud sont tronqués à ce point là. Par la suite une nouvelle opération de découverte de routes vers la destination est initiée par l'émetteur.

Reprenons la figure N° II.4 le nœud (D) est incapable d'envoyer le paquet au prochain saut (E) (à cause de la coupure des liens entre D et E), alors il retourne un paquet erreur de

route (Route Error) à (A) en signalant une coupure de lien entre lui et (E). Quand le nœud source (A) et les n

œuds intermédiaires (B) et (C) reçoivent ce paquet, ils suppriment la route de leur cache. Si (A) a une autre route vers (E) dans son cache, il peut l'utiliser pour envoyer le paquet immédiatement, sinon il initie une nouvelle requête de route.

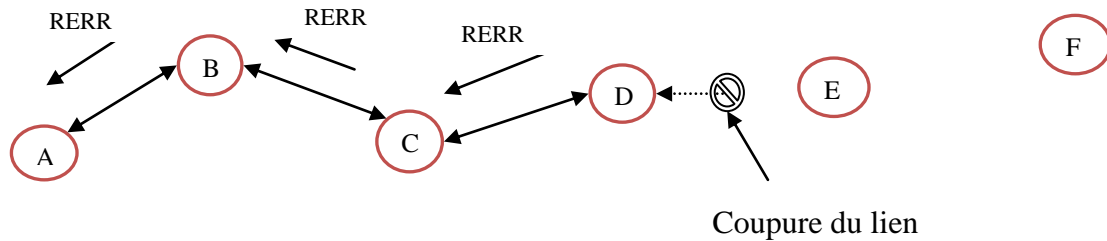


Figure N° II.4: Erreur dans DSR : envoi de Route error (RERR).

II.5 Protocoles de routage dans les réseaux VANET

Différentes solutions pour le routage dans les réseaux VANET ont été proposées, nous distinguons deux classes de protocoles de routage: les protocoles basés sur la topologie qui sont divisés en protocoles proactifs, réactifs et hybrides et les protocoles basés sur la localisation (position) qui utilisent la position physique des nœuds mobiles pour configurer le routage. Parmi les protocoles de routage VANET on cite :

II.5.1 Le protocole GSR (Geographic Source Routing) [21]

GSR est un protocole de routage géographique qui combine le routage basé sur la localisation avec le routage basé sur la topologie des routes pour construire une connaissance adaptée à l'environnement urbain. Le principe de GSR est que le véhicule source désirant envoyer des données vers un véhicule cible, calcule le chemin de routage le plus court à partir des informations géographiques d'une carte routière et en utilisant les algorithmes de recherche du plus court chemin, par exemple Dijkstra. A partir du chemin du routage calculé, le véhicule source sélectionne ensuite une séquence d'intersections par lesquelles le paquet de données doit transiter afin d'atteindre le véhicule destinataire. Cette séquence d'intersections est constituée d'un ensemble de points géographiques fixe de passage du paquet de données. Pour envoyer les messages d'une intersection à une autre, l'approche Gloutonne est utilisée.

II.5.2 Le protocole A-STAR (Anchor-based Street and Traffic Aware Routing) [31][43][44]

A-STAR est un protocole de routage basé sur la localisation (position) pour un environnement de communication véhiculaire métropolitain. Il utilise particulièrement les informations sur les itinéraires d'autobus de ville pour identifier une route d'ancre (anchor route) avec une connectivité élevée pour l'acheminement des paquets. A-STAR est similaire au protocole GSR du fait qu'ils adoptent les deux une approche de routage basée sur l'ancrage (anchor based) qui tient compte des caractéristiques des rues. Cependant, contrairement à GSR, il calcule les anchor paths en fonction du trafic (trafics de bus, véhicules, etc.). Un point est associé à chaque rue en fonction de sa capacité (grande ou petite rue qui est desservie par un nombre de bus différent). Les informations de routes fournies par les bus donnent une idée sur la charge du réseau véhiculaire dans chaque rue. Ce qui donne une image de la ville a des moments différents.

II.5.3 Le protocole UMB (Urban Multi hop Broadcast Protocol)

C'est un protocole efficace de la norme 802.11, basé sur l'algorithme de diffusion multi saut pour les réseaux inter véhiculaires avec support d'infrastructure, dans le but de réduire les collisions et d'utiliser efficacement la bande passante. Contrairement aux protocoles de diffusion par inondation, UMB confie les opérations d'envoi et de reconnaissance des paquets aux nœuds les plus éloignés sans connaître à priori des informations sur la topologie du réseau.

UMB est décomposé en deux phases : la première appelée diffusion directionnelle, où le véhicule source sélectionne un nœud dans la direction de diffusion pour faire un relaying de données sans aucune information sur la topologie. La deuxième diffusion aux intersections pour disséminer les paquets dans toutes les directions, pour cela UMB utilise des répéteurs installés dans les intersections pour l'envoi des paquets vers tous les segments. On suppose que chaque véhicule est équipé par un récepteur GPS (Global Position System) et une carte routière électronique. Le principal avantage du protocole UMB est la fiabilité de diffusion multi-saut dans les canaux urbains [18][23] [42]

II.5.4 Le protocole GyTAR (improved Greedy Traffic-Aware Routing protocol) [24][31][36][41]

GyTAR est un protocole de routage géographique basé sur la localisation (position) et adapté aux réseaux véhiculaires capable de trouver des chemins robustes dans un

environnement urbain. L'objectif de ce protocole est de router les données de proche en proche en considérant les différents facteurs spécifiques à ce genre d'environnements/réseaux. Ce protocole suppose que chaque véhicule connaît sa position courante et ceci grâce au GPS. De plus un nœud source est sensé connaître la position du destinataire pour pouvoir prendre des décisions de routage, cette information est donnée par un service de localisation tel que GLS (Grid Location Service) et peut déterminer la position des intersections voisines à travers des cartes numériques. Il est constitué de deux composants :

▪ **La sélection des intersections (carrefours)**

GyTAR adopte un routage basé sur le jet d'ancre avec connaissance de la rue. Les intersections ou les jonctions sont choisies dynamiquement l'une après l'autre dans le but de prendre en compte la variation de la circulation des véhicules en temps réel. Lors de la sélection de la prochaine intersection destinataire, un nœud (source ou même intermédiaire) cherche la position des intersections voisines dans la carte routière. Un score est donné à chaque intersection en prenant en considération la densité de circulation T_j entre l'intersection courante et la prochaine intersection candidate et la distance curvimétrique D_j vers la destination. La meilleure intersection choisie comme destination, est alors la jonction dont le score est élevé :

$$\text{Score}(J) = \alpha \times f(D_j) + \beta \times g(T_j)$$

Tel que α et β sont des facteurs de poids.

J : Intersection candidate.

D_j : La distance curvimétrique entre J et la destination.

T_j : Densité du trafic entre J et la destination.

La figure II.5 illustre un exemple de la manière de la sélection de la prochaine intersection : Au départ le véhicule **jaune** reçoit un paquet, il calcule le score de chaque jonction voisine. Considérant sa distance curvimétrique et la densité du trafic, la jonction (**J2**) aura le score le plus élevé, ce qui fait que cette intersection sera choisie comme prochaine intersection.

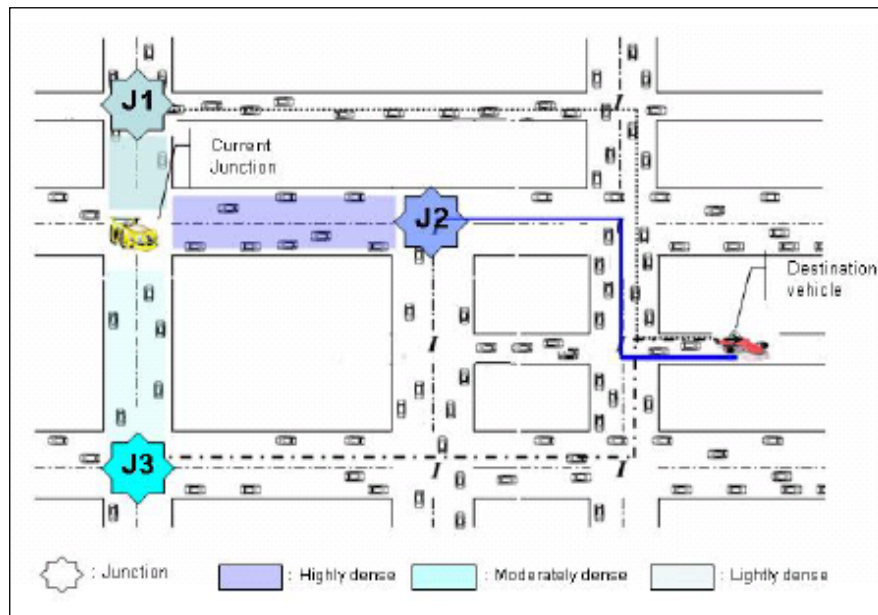


Figure II.5 : La sélection des intersections dans GyTar

▪ **L'envoi de données entre deux intersections**

Une fois l'intersection destinataire est choisie, tous les paquets de données sont marqués par la position de la prochaine intersection.

Chaque véhicule maintient une table dans laquelle la position, la vitesse et la direction de chaque véhicule voisin sont sauvegardées. Cette table est mise à jour à travers les messages HELLO échangés périodiquement entre tous les véhicules. Ainsi, lorsqu'un paquet est reçu le véhicule récepteur calcule, en prédiction, la nouvelle position, pour chaque véhicule voisin, en utilisant les informations enregistrées dans sa table. Ensuite le prochain nœud voisin (i.e. le plus proche à la jonction destinataire) est choisi.

La figure II.6 illustre l'approche de l'envoi de donnée entre deux jonctions, où le véhicule (1), qui se déplace dans la même direction que le véhicule d'expédition avec une vitesse plus grande que celle du véhicule (2), recevra le paquet envoyé à l'instant t_2 ; il est le plus proche de la prochaine jonction. Cependant, si la prévision n'a pas été employée, le véhicule d'expédition aurait choisit le véhicule (4) comme prochain saut au lieu du véhicule (1) puisqu'il était le plus proche de la jonction de destination à l'instant t_1 .

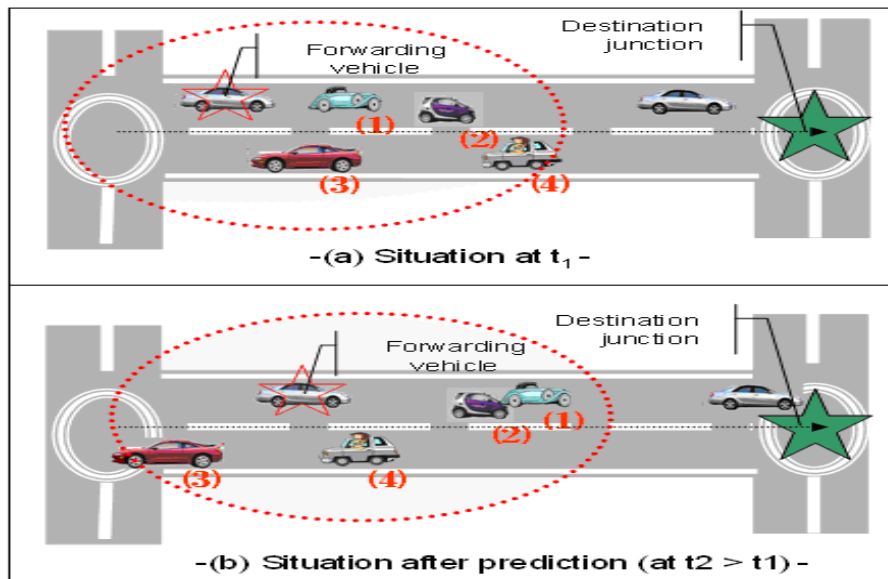


Figure II.6 : Echanges de données entre deux intersections en utilisant la stratégie GYTAR

▪ Stratégie de recouvrement

Dans le protocole GYTAR, il existe des risques qu'un paquet reste collé dans un optimum local (le véhicule émetteur pourrait être le plus proche de la prochaine jonction). Par conséquent, la stratégie basée sur l'idée de *porter et envoyer* est exigée.

Le véhicule émetteur du paquet en mode de recouvrement portera le paquet jusqu'à ce que la prochaine jonction soit atteinte (figure II.7.a) ou jusqu'à ce qu'un autre véhicule, plus près de la jonction de destination, atteigne sa gamme de transmission (figure II.7.b).

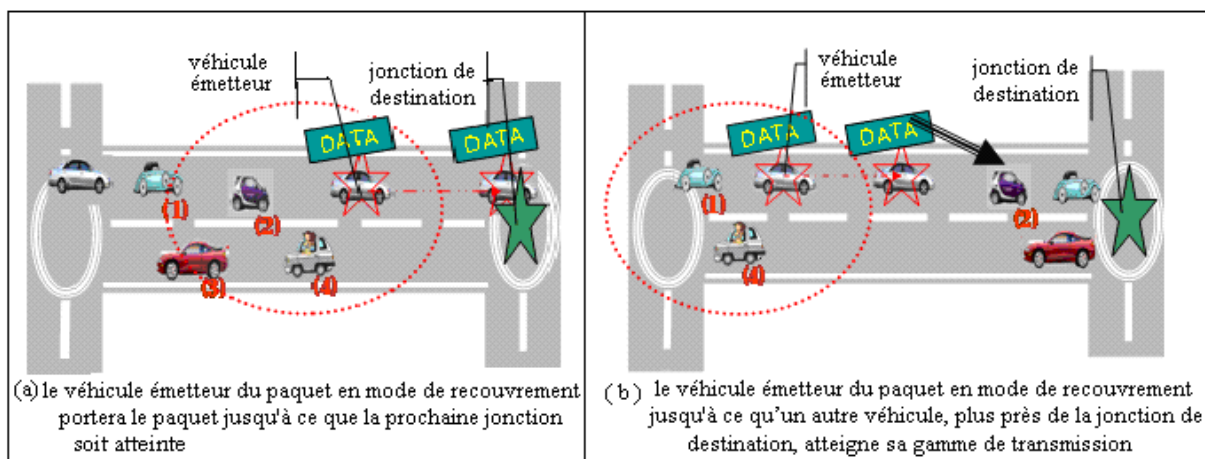


Figure II.7: Stratégie de recouvrement utilisée dans un optimum local.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le concept de routage dans les réseaux Ad Hoc, les problèmes liés à la conception des protocoles de routage et la classification des protocoles selon différentes manières et plusieurs critères.

Nous avons décrit également les protocoles OLSR et DSR ainsi que leurs fonctionnements.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons la solution que nous avons proposée pour la modélisation, l'implémentation et la simulation des réseaux VANETs dans une ville.

*C*HAPITRE III

*C*ONCEPTION ET REALISATION

Introduction

L'objectif principal de notre application est l'étude des performances des protocoles de routage DSR et OLSR appliqués aux réseaux VANETs par la simulation dans l'environnement d'une ville. Par conséquent, pour pouvoir obtenir des résultats de simulations proches de la réalité, le modèle de mobilité doit être le plus réaliste possible, mais le problème que nous avons rencontré c'est que les modèles de mobilité disponibles au niveau des simulateurs sont conçus pour les réseaux MANETs (par exemple le modèle Random Way Point, Random Walk et Random Direction Model) et ne conviennent pas pour les réseaux VANETs. Pour remédier à ce problème nous allons concevoir un modèle de mobilité pour les réseaux VANETs.

Le modèle de mobilité se compose de méthodes qui gèrent les déplacements à l'intérieur de la zone de simulation, qui est dans le cas des VANETs, une carte routière d'une certaine dimension, et de méthodes de communication qui permettent la connexion aux stations de base, la communication des véhicules entre eux et la circulation de l'information entre les nœuds du réseau. L'exécution de ce modèle va générer des fichiers *TRACE* qui décrivent les déplacements des nœuds mobiles du réseau, et les requêtes échangées par ces derniers. Ces fichiers traces sont ensuite utilisés par un simulateur de réseaux mobiles (NS2).

III Conception et réalisation

Avant de débiter notre conception et comparer les performances des protocoles OLSR et DSR sur les réseaux VANET, nous présentons des appellations et notations qui seront utilisées dans ce chapitre

III.1 Conventions et appellations

- **Degré d'un point**

Le degré d'un point est le nombre de routes qui se croisent dans ce point.

- **Jonction**

C'est le point d'intersection des routes ; elle est caractérisée par les coordonnées **X** et **Y**.

Il existe trois types de jonctions :

a) Jonction unaire : C'est une jonction dont le degré est égal à un.

b) Jonction binaire : C'est une jonction dont le degré est égal à deux.

c) Jonction multiple: C'est toute jonction dont le degré est supérieur à deux.

- **Route**

Une route est la ligne liant deux jonctions (soient **j1** et **j2**, les deux champs associés à la première et à la deuxième jonction dans l'enregistrement route). Elle est caractérisée par une vitesse min, une vitesse max, une charge max (calculée en nombre de véhicules).

- **Zone de stationnement**

La zone de stationnement est la partie de la route où les véhicules peuvent stationner.

- **Voie**

Chaque route contient deux voies de mouvement. Par convention, les véhicules circulant sur la voie « une » sont à destination de la jonction **j1** de cette route, et les véhicules circulant sur la voie « deux » sont à destination de la jonction **j2** de cette même route.

- **Point d'entrée/sortie**

Un point d'entrée/sortie n'est rien qu'une jonction située à la borne de la carte routière. Il permet l'accès ou la sortie des véhicules du réseau simulé.

- **État d'un conducteur**

L'état est la réaction du conducteur lors de son mouvement continu sur la même route ou lorsqu'il atteint une jonction.

Lors du mouvement continu sur la même route l'état est soit de continuer le mouvement, soit de stationner durant une certaine durée.

En atteignant une jonction l'état est donc soit de tourner à gauche avec un certain degré (première route à gauche, deuxième route à gauche,...), soit de tourner à droite avec un certain degré (première route à droite, deuxième route à droite,...) ou de sortir du réseau simulé.

▪ **Véhicule prioritaire**

Un véhicule est dit prioritaire s'il a le droit de circuler sur son chemin sans attente (si c'est possible i.e. si un véhicule prioritaire est devant un autre véhicule prioritaire, la notion de priorité ne s'applique pas).

Donc, tout véhicule non prioritaire doit obligatoirement céder le passage aux véhicules prioritaires.

▪ **Bornes de la carte**

Sont les limites traçant la partie de la carte routière effectivement utilisée comme étant une zone de mouvement des véhicules.

▪ **Xmax et Ymax**

Sont la largeur et la longueur de la carte routière codifiée, qui vont servir par la suite à la précision de la zone de mouvement dans le simulateur réseau **NS2**.

▪ **Point (xmin, ymin)**

Est le point se situant à l'extrémité supérieure gauche des bornes de la carte, qui va servir pour recalculer les positions des jonctions, en le considérant comme un nouveau point d'origine, afin d'assurer une compatibilité entre les informations portées par la carte codifiée et la zone de mouvement de l'outil NAM spécifiée par Xmax et Ymax. Par conséquent, les positions des nœuds ne seront pas hors de la zone de mouvement dans le visualisateur NAM.

▪ **Direction de mouvement**

La direction de mouvement indique la trajectoire de circulation des véhicules. Cette direction est toujours orientée de la jonction « **j1** » de la route vers la jonction « **j2** » de la même route en cas de circulation sur la voie numéro « **2** », et de la jonction « **j2** » de la route vers la jonction « **j1** » de la même route, sinon.

▪ **Voie libre devant un véhicule**

On dit que la voie est libre devant un véhicule « **k** » jusqu'au point « **i** » si la partie, de la route, déterminée par le point de position du véhicule « **k** » et le point « **i** » ne contient aucun véhicule.

▪ **Positions des véhicules**

Nous supposons que chaque véhicule peut déterminer sa position et que chaque poste peut aussi détecter la présence des véhicules circulant dans sa zone de couverture.

La **figure III.1** illustre les différentes appellations utilisées dans ce chapitre.

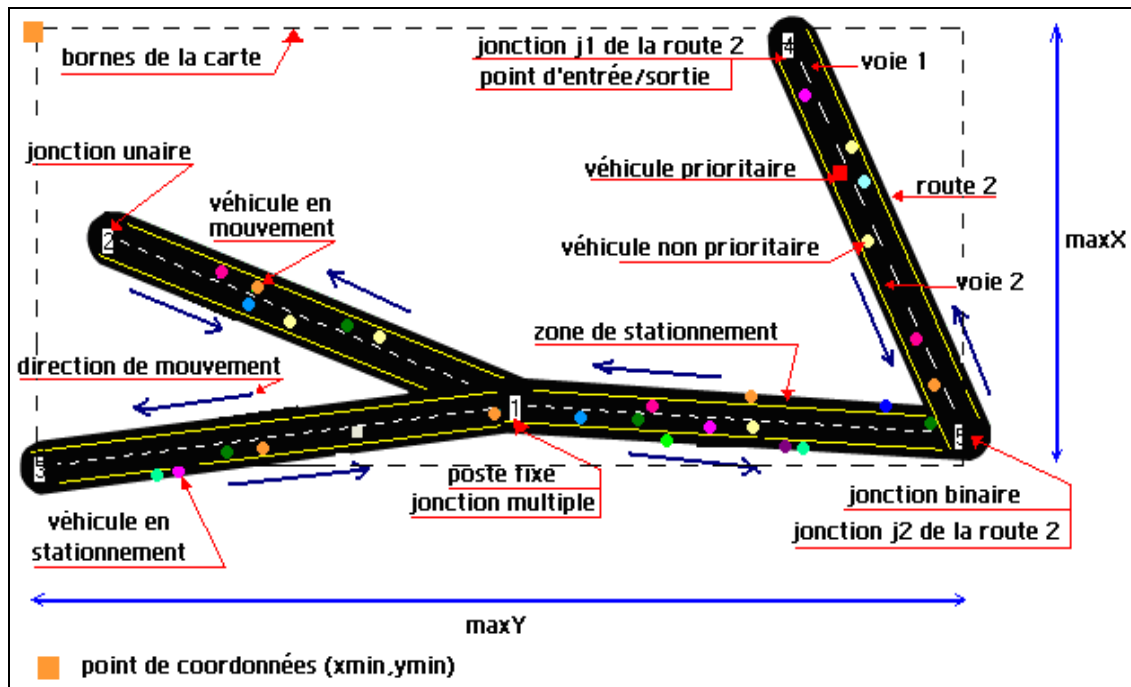


Figure III.1 : Schéma explicatif des différentes appellations.

III.2 Conception et description du modèle de mobilité

Le modèle de mobilité que nous avons implémenté est un modèle de mobilité permettant de créer un environnement VANET proche de la réalité. Il utilise des cartes routières réelles. Dans ce modèle, les véhicules circulent sur des routes bien tracées en respectant le chemin, la limitation de vitesse, et les priorités entre les véhicules. Il permet également de pallier à la problématique du mouvement aléatoire des véhicules et de simuler un réseau VANET réaliste avec l'outil NS2.

Dans ce chapitre nous allons expliquer le fonctionnement de ce modèle, avant cela nous présentons des appellations et notations qui seront utilisées.

III.2.1 La zone de simulation

Lorsque l'on a recours à la simulation des réseaux mobiles, on se doit de fournir une zone de simulation appropriée au scénario désiré pour visualiser le mouvement des nœuds. Dans le cas des VANETs, la zone de simulation se présente comme étant une carte routière.

Cette carte est une carte prise par Google Earth ou tirée de la base de données TIGER/Lines et personnalisée par l'utilisateur selon les besoins de son scénario.

La création ou la personnalisation d'une carte routière est effectuée avec l'intervention de l'utilisateur par une application graphique.

La création des routes consiste à choisir les deux jonctions « j1 » et « j2 » et de spécifier la vitesse max et la vitesse min de cette route. La **figure III.2** illustre un exemple d'une carte codifiée par l'intervention de l'utilisateur.

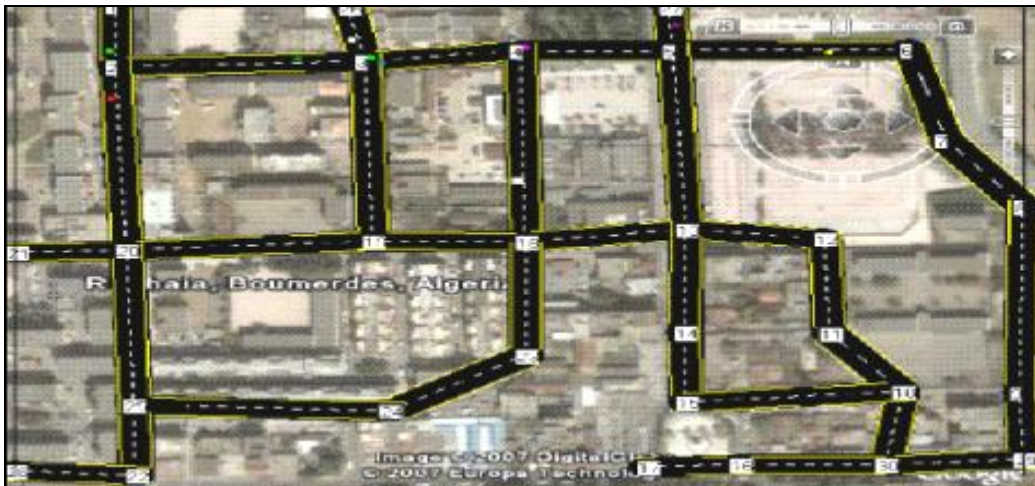


Figure III.2 : Exemple d'une carte codifiée par l'intervention de l'utilisateur.

III.2.2 Les nœuds mobiles

Les nœuds mobiles représentent les véhicules dont la mobilité est simulée par le modèle. Chaque nœud est représenté par des paramètres définitifs (gardant les mêmes valeurs le long de la simulation) qui sont l'accélération standard ($AccMax$), le ralentissement standard ($AccMin$) et par des paramètres temporaires (qui changent de valeur à tout instant), à savoir la vitesse, l'accélération actuelles. En général, le paramètre d'accélération prend l'une des trois valeurs suivantes : $AccMax$ en phase d'accélération, $AccMin$ en phase de ralentissement et 0 si le nœud garde une vitesse constante.

L'ensemble des nœuds est divisé en deux classes :

- Les véhicules ou nœuds rapides qui ont des paramètres d'accélération et de ralentissement élevés et peuvent atteindre les vitesses maximales autorisées.
- Les véhicules ou nœuds lents qui ont des paramètres d'accélération et de ralentissement plus bas que ceux des nœuds rapides.

III.2.3 Les postes fixes

Les postes fixes ou les stations de base sont des interfaces de communication placées tout au long des routes, et sont caractérisées par un périmètre ou zone de couverture. Les stations de base permettent de découper notre zone de simulation en domaines, chaque domaine est limité par la zone couverte par la station de base. Elles permettent de connecter les nœuds au réseau internet, fournissent des informations sur l'état des routes et relient si la connexion directe est impossible, des nœuds distants.

Si un nœud mobile sort de la zone de couverture de son poste fixe précédent, il sera affecté à un autre poste.

Parmi les jonctions créées par la procédure de codage, nous avons choisi quelques unes pour implémenter les postes fixes (un poste par jonction sélectionnée).

La sélection d'une jonction est effectuée par une procédure de sélection. Après positionnement du poste fixe, son périmètre sera calculé en fonction de la longueur de la route la plus longue. A chaque ajout d'un point fixe, la procédure teste si la zone de mouvement est totalement couverte, sinon un autre poste fixe doit être ajouté.

III.2.4 Distance de sécurité

La distance de sécurité est définie par la distance qui sépare deux véhicules. Cette distance est calculée suivant la formule utilisée dans [ROT 92]. Cette formule est issue d'une étude menée sur le comportement des véhicules sur la route (car-following model). Elle dépend notamment de la longueur du véhicule, de sa vitesse actuelle et du temps de réaction du conducteur :

$$S = a + b * V + c * V^2$$

Où :

S : la distance de sécurité.

V : la vitesse courante du véhicule.

a : la longueur du véhicule. (Nous avons pris la valeur de 5.5 mètres)

b : le temps de réaction (Nous avons pris la valeur d'1 seconde)

c : l'inverse du double du maximum de la décélération moyenne. (Nous avons utilisé la valeur empirique de 0.0070104 s²/m).

III.2.5 Changement de route ou segments

Lorsqu'un nœud arrive au terme d'une route, il ralentit pour aborder la jonction ou l'intersection. Si la voie est libre devant lui, il choisit une route de manière aléatoire et

continue son parcours tant qu'il n'a pas encore atteint sa destination. Les jonctions sont gérées par les policiers.

III.2.6 Gestion jonctions par les policiers

Nous avons intégré un mécanisme de contrôle du trafic, afin d'éviter les collisions au niveau des jonctions. Le mécanisme utilisé est le policier qui consulte l'état du conducteur, et lui donne la permission du mouvement suivant son état.

III.2.7 Continuité de la connexion

A chaque fois qu'un nœud mobile (véhicule) sort de la zone de couverture de son poste fixe, il se retrouvera forcément dans la zone de couverture d'un autre poste fixe. Dans une telle situation le nouveau poste fixe envoie une requête au véhicule nouvellement détecté dans sa zone.

A la réception de la requête du nouveau poste fixe par le véhicule, ce dernier doit envoyer une réponse contenant l'identité du véhicule et l'adresse de son dernier poste fixe.

Lors de la réception de la réponse du véhicule, le nouveau poste fixe doit envoyer une requête à destination de l'ancien poste fixe, dont le véhicule était associé, pour pouvoir récupérer toutes les demandes passées par ce véhicule à son ancien poste fixe et assurer la continuité de la connexion dans le réseau VANET-Postes.

III.2.8 Conventions de circulation

- Le mouvement des nœuds est assuré par la procédure « move » appelée périodiquement. A chaque fois qu'un nœud mobile atteint une jonction, il doit marquer un arrêt en attendant l'ordre de circuler à nouveau. Cet ordre est donné par un policier existant au niveau de chaque jonction. Dans le programme, l'ensemble des policiers est représenté par la procédure « policier » qui consulte l'état du conducteur, et lui donne la permission du mouvement suivant son état.
- Un véhicule ne circule que si sa voie sera libre pour ne pas créer d'accidents lors du mouvement.
- Si un véhicule prioritaire circule derrière un véhicule non prioritaire, ce dernier lui cède le passage en se dirigeant vers la zone de stationnement. Notons que la notion de priorité est appliquée entre les classes de véhicules et non pas au sein de la même classe (Nous avons deux classes de véhicules : la classe des véhicules prioritaires, et la classe des véhicules non prioritaires).

- Lorsqu'un conducteur atteint une jonction, et suivant son état, il doit soit passer à la route choisie pour continuer son mouvement, soit sortir du réseau si c'est son état et si la jonction atteinte est un point d'entrée/sortie du réseau simulé.
- L'attribution des états est effectuée par une procédure générant des états aléatoires à chaque atteinte d'une jonction. Lors du mouvement continu (La jonction cible n'est pas encore atteinte), si l'état est de « sortir du réseau », l'interprétation est alors « stationnement ». La durée de stationnement est attribuée par une procédure générant des nombres aléatoires.

III.2.9 Le réseau simulé

Dans notre application nous avons simulé un réseau hybride, composé de :

- Réseau purement VANET.
- Réseau VANET-Postes.

III.2.9.1 Réseau purement VANET :

C'est le réseau de communication inter-véhicules, d'architecture **P2P** (à plat), qui n'a besoin d'aucune infrastructure préexistante, ni de points d'accès fixes.

III.2.9.2 Réseau VANET-Postes :

Afin de pouvoir exploiter les différentes architectures du réseau (clients/serveurs et à plat), nous avons créé le réseau **VANET-Postes**, basé sur une architecture clients/serveurs, où les postes fixes jouent le rôle de serveurs et les véhicules circulant dans leurs zones de couverture sont les clients.

III.3 La simulation du réseau VANET

La simulation est l'implantation d'un modèle simplifié du système à l'aide d'un programme de simulation adéquat. Cette méthode traduit le comportement du système à évaluer d'une manière réaliste. La simulation permet de tester et visualiser à moindre coût les résultats sous forme de graphes faciles à analyser et à interpréter. Elle n'est pas une méthode exacte, et nécessite de prêter une attention particulière aux interprétations des résultats de simulation.

Il existe plusieurs outils de simulation, citons à titre d'exemple : NS2 (Network Simulator 2), GloMoSim (Global Mobile Simulator), Opnet (Open Network) et JistSwan

Pour faciliter le choix d'un simulateur, des aspects peuvent être considérés tels que :

Bibliothèque de modèles : Si l'on souhaite utiliser un protocole déjà inclus dans la bibliothèque, il est alors inutile de l'implémenter.

Fiabilité du simulateur et des protocoles simulés : La fiabilité des protocoles inclus dans le simulateur est primordiale pour rendre la mesure de performances d'un protocole la plus fidèle à la réalité.

Performances brutes : Se mesurent en temps d'exécution et en utilisation de la mémoire. Si nous souhaitons simuler un réseau comportant un grand nombre de nœuds, le temps d'exécution doit rester raisonnable et la mémoire utilisée adaptée à la machine exécutant le simulateur.

Facilité d'extension : La facilité d'ajout de nouveaux modèles au simulateur est primordiale pour en évaluer les performances.

Mesure de performances : Certains simulateurs incluent la génération automatique de statistiques en fonction de différentes métriques.

Type de réseau Architecture : (filaire ou ad hoc) ou ses applications.

Licence de distribution : Définit les droits d'utilisation du logiciel, les droits de diffusion (duplication) et les droits de modification.

Notre choix s'est porté sur le Network Simulator NS2 et ceci pour différentes raisons qui sont :

- Son modèle libre permet l'ajout très rapide de modèles correspondant à des technologies émergentes. Ceci le rend meilleur logiciel de simulation par événements discrets d'après les spécialistes des télécommunications.
- Le logiciel NS2 est fourni avec une interface graphique (NAM) permettant de démontrer le fonctionnement des réseaux.
- Il permet d'étendre le simulateur et de le personnaliser, et il donne une liberté de programmation vu qu'il est fourni avec son code source qu'on peut modifier et recompiler autant qu'on le souhaite.

Pour la plate forme notre choix s'est porté sur la plate forme de Linux pour la simple raison que NS2 est nettement plus facile à installer et à configurer sous Linux que sous Windows. Nous avons travaillé avec ns-allinone-2.34 sous Linux ubuntu 10.10

III.3.1 Présentation de NS2 [1][11]

Le simulateur du réseau NS2 est un outil (logiciel) de simulation de réseaux informatiques développé lors d'un projet de la DARPA. Le simulateur se compose d'une interface de programmation en tcl et d'un noyau écrit en C++ dans lequel la plupart des protocoles réseaux ont été implémentés :

- Couche MAC CSMA, CDMA, 802.X, Token ring, MPLS, liens satellite

- Couche Réseaux IP, routage dans les réseaux ad hoc (aodv, dsr , dsdv, tora, amodv), routage dans les réseaux filaire (Link state, Distance vector), les réseaux multicast, IntServ, DiffServ
- Couche Transport TCP, UDP
- Traffic parreto, ON/OFF, CBR, FTP, telnet

III.3.1.1 Les composants d'un réseau sous NS2

Un modèle de réseau sous NS est constitué de :

a) Nœuds : Un nœud est une collection de classifieurs et d'agents. Il existe deux types de nœuds dans NS.

a.1) Un nœud unicast : Contient :

- Un classificateur d'adresses permettant de retrouver une référence à un autre objet de la simulation à partir d'une comparaison sur un critère dont la valeur est contenue dans le paquet. Il a un rôle de démultiplexeur.
- Un port classificateur qui est un tableau contenant les références des agents attachés au nœud.

a.2) Un nœud multicast : En plus des composants d'un nœud unicast, contient :

- Un classificateur spécial : qui classifie les paquets multicast et les paquets unicast.
- Un classificateur multicast : qui exécute le routage multicast.

La figure III.3 illustre un exemple d'un nœud dans NS2

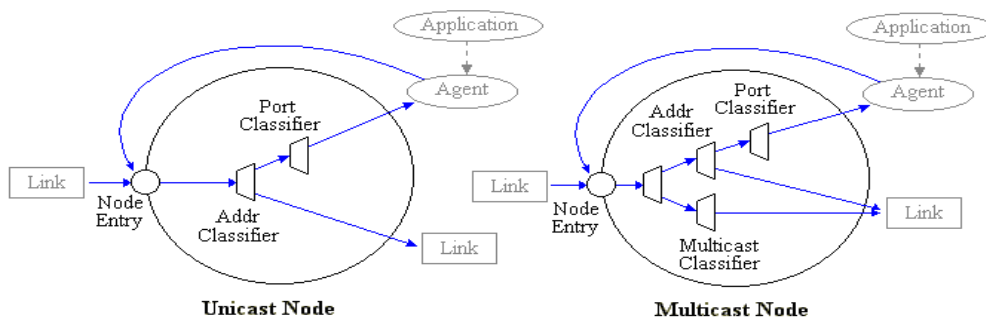


Figure III.3 : Nœud dans NS2 (Unicast & Multicast).

Par défaut, dans NS2 les nœuds créés sont Unicast. Pour créer des nœuds multicast l'utilisateur doit explicitement le spécifier dans son script OTcl en utilisant l'option « multicast on » lors de la création de l'instance de simulation (objet de simulation).

b) Liens de communication entre les nœuds : Servent à raccorder les nœuds entre eux.

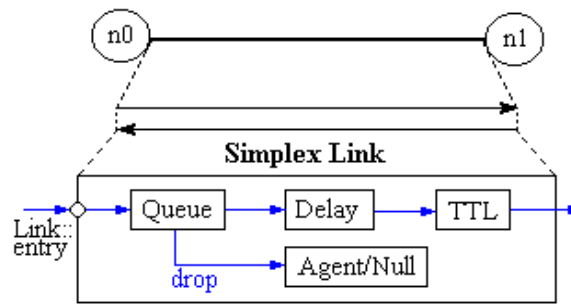


Figure III.4 : Lien dans NS2.

Tout type de lien dans NS2 contient :

- **Link entry** : Point d'entrée du lien, pointe son premier objet.
- **Queue** : File d'attente des paquets.
- **Delay** : Élément caractérisant le lien en terme de délai.
- **TTL** : Manipule la durée de vie des paquets.
- **Agent/Null** : Traite les pertes de paquets au niveau de la file d'attente.

La figure III.4 illustre un exemple d'un lien dans NS2

c) **Agents de communication** : Ils modélisent les constructeurs et les consommateurs des paquets. Ces agents sont attachés aux nœuds et connectés les uns aux autres, afin d'échanger des données entre les nœuds.

d) **Application** : Génère le trafic de données selon certaines applications (CBR, FTP), et se sert des agents de transport.

III.3.1.2 Flot de simulation :

Pour effectuer une simulation par NS2, l'utilisateur écrit un ensemble de commandes dans un fichier texte appelé script OTcl qui décrit l'environnement de la simulation : La topologie du réseau, les caractéristiques des liens physiques, les protocoles utilisés...etc.

NS2 interprète le script OTCL et exécute la simulation. Les résultats obtenues (Fichier trace et fichier NAM) peuvent être visualisés avec l'outil NAM (Network Animator) et analysés à partir des courbes tracées par l'outil Xgraph (Un traceur de graphes).

La figure III.5 représente un flot de simulation avec NS2

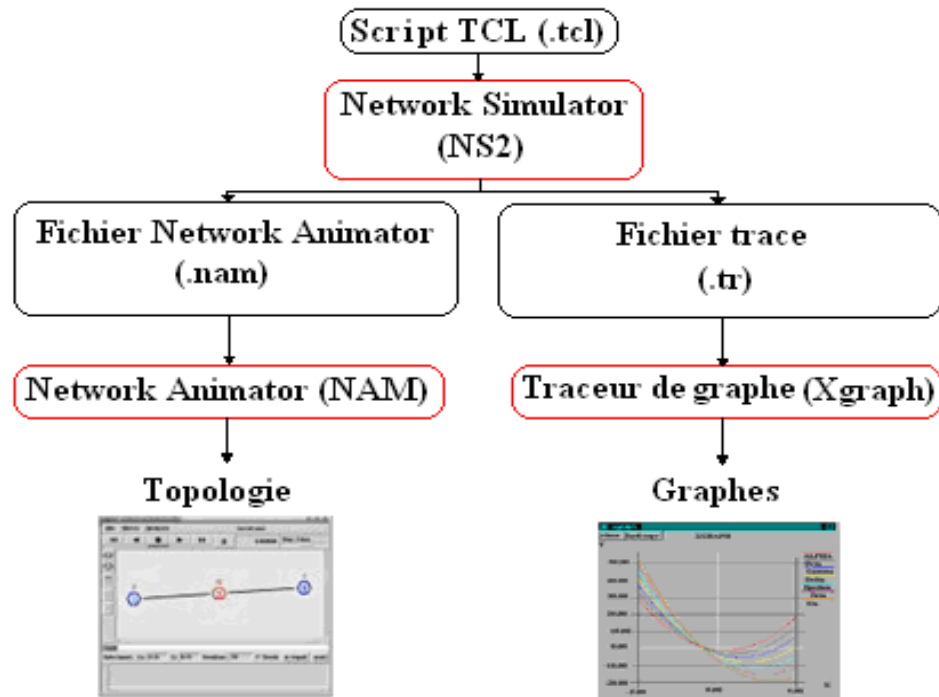


Figure III.5 : Flot de simulation avec NS2.

III.3.1.2.1 TCL/OTCL/Tk:

- **TCL (Tools Command Language)** : Est un langage interprété, traité par un interpréteur TCL (NS par exemple). Les programmes écrits en Tcl sont en fait des fichiers texte constitués de commandes. Ces fichiers sont nommés scripts.
- **OTCL** : Est une extension orientée objet de Tcl, il utilise les fonctions standards du langage Tcl mais également ajoute des commandes à l'interpréteur.
- **Tk (Tool kit)** : Est un langage interprété permet de construire des interfaces graphiques.

III.3.1.2.2 NAM (Network Animator)

Le NAM est un outil d'animation basé sur *Tcl/Tk*, utilisé dans NS afin d'interpréter et de visualiser le tracé de simulation des réseaux, ainsi que le tracé de données.

Le NAM peut être démarré en tapant la commande « nam <nom du fichier NAM (.nam)> », dans le shell de Linux.

III.3.1.2.3 Xgraph

Xgraph est un outil permettant de tracer des courbes à partir de tableaux traçant des données de x/y. Il trace des données de tout nombre de dossiers sur le même graphique et peut manipuler des tailles de l'ensemble de données illimitées et n'importe quel nombre de fichiers de données.

III.3.1.2.4 Fichier trace (résultat de la simulation)

Le fichier trace est un fichier qui retrace tous les évènements qui se sont produits pendant la simulation à savoir émission, réception, perte de paquets ainsi que le passage des paquets par les différentes couches du modèle TCP/IP. Il existe deux formats du fichier trace ; l'ancien format et le nouveau format. Nous avons opté pour le nouveau format car il est beaucoup plus explicite que l'ancien.

Ce type de fichier est généré en spécifiant, dans le script Tcl, la commande :

`$ns use-newtrace` (Avec « ns » est le nom de l'instance de simulation). Chaque valeur notée dans ce fichier est précédée de sa signification. Il contient des informations sur :

- N: Propriétés des nœuds.
- I: Informations sur le niveau IP du paquet.
- H: Informations sur le nœud suivant.
- M: Informations sur le niveau MAC du paquet.

Evénement	Flag	Type	Valeur
s: Send r: Receive d: Drop f: Forward	-t	Double	Temps (* Global Setting).
	-Ni	Entier	Identifiant du nœud.
	-Nx	Double	Coordonnée X du nœud.
	-Ny	Double	Coordonnée Y du nœud.
	-Nz	Double	Coordonnée Z du nœud.
	-Ne	Double	Niveau d'énergie du nœud.
	-NI	Chaîne de caractères	Niveau de trace (AGT, RTR, MAC, etc.).
	-Nw	Chaîne de caractères	Raison de perte.
	-Hs	Entier	Identifiant du nœud source.
	-Hd	Entier	Identifiant du nœud destination.
	-Ma	hexadécimal	[Duration] : Temps attendu avant d'émettre sur le médium.
	-Ms	hexadécimal	Adresse Ethernet de la source.
	-Md	hexadécimal	Adresse Ethernet de la destination.
-Mt	hexadécimal	Type Ethernet.	
Is	Entier	Numéro de port du nœud source	

	Id	Entier	Numéro de port du nœud destination
	Il	Entier	Taille du paquet
	Iv	Entier	Nombre de sauts
	Ii	Entier	Identifiant d'un paquet
	It	Chaîne de caractères	Type du paquet

Tableau III.1 : Tableau explicatif d'une ligne de fichier trace nouveau format.

Selon le type de paquet, des informations additionnelles peuvent être tracées.

La **figure III.6** illustre un exemple de fichier trace (.tr) nouveau format

```
r -t 28.507814264 -Hs 20 -Hd 20 -Ni 20 -Nx 647.26 -Ny 232.63 -Nz 0.00 -Ne -1.000000 -
NI RTR -Nw --- -Ma 13a -Md 14 -Ms 3 -Mt 800 -Is 3.255 -Id 20.255 -It AODV -Il 44 -Ii 0
-Iv 30
```

Figure III.6: Ligne de fichier trace nouveau format.

III.4 Réalisation

III.4.1 Algorithmes de réalisation de codage des cartes routières

À la création des routes, des numéros sont attribués à ces dernières suivant leurs ordres de création. Par convention, au niveau de chaque jonction, les routes sont numérotées de zéro au degré de cette jonction moins un.

La procédure « organroutjonction » organise les routes au niveau de chaque jonction, en les réordonnant suivant le mouvement inverse des aiguilles d'une montre. Voici un exemple de cas : pour une jonction illustrée par la **figure III.7**, la procédure « organroutjonction » classifie les routes dans un tableau associé à la jonction atteinte (soit le tableau tabroutj), comme suit :

Routes	Route 0	Route 3	Route 4	Route 1	Route 2
Ordre de classification	0	1	2	3	4

La jonction atteinte est de degré cinq (5), et l'état du conducteur est « tourner à gauche ». La route sur laquelle circule le véhicule est la route numéro un (1)

La procédure de génération des nombres aléatoires retourne la valeur trois (3), donc la nouvelle route est la route numéro « 0 ».

Pour faire ceci, on trace un trait passant par la jonction en question qui nous permet de diviser les routes en deux classes : Routes du plan supérieur, et routes du plan inférieur.

Les routes du plan supérieur seront classifiées selon l'ordre décroissant des abscisses de leurs jonctions « j1 » si la jonction en question est la jonction « j2 », ou selon l'ordre décroissant des abscisses de leurs jonctions « j2 » si la jonction en question est la jonction « j1 ». Le résultat de cette classification est mis dans un tableau « PlanSup ».

Avec le même traitement les routes du plan inférieur seront classifiées mais selon l'ordre croissant. Le résultat de cette classification est mis dans un tableau « PlanInf ».

Les éléments du tableau « tabroutj » sont alors le résultat de la concaténation des deux tableaux « PlanSup » et « PlanInf » dans cet ordre.

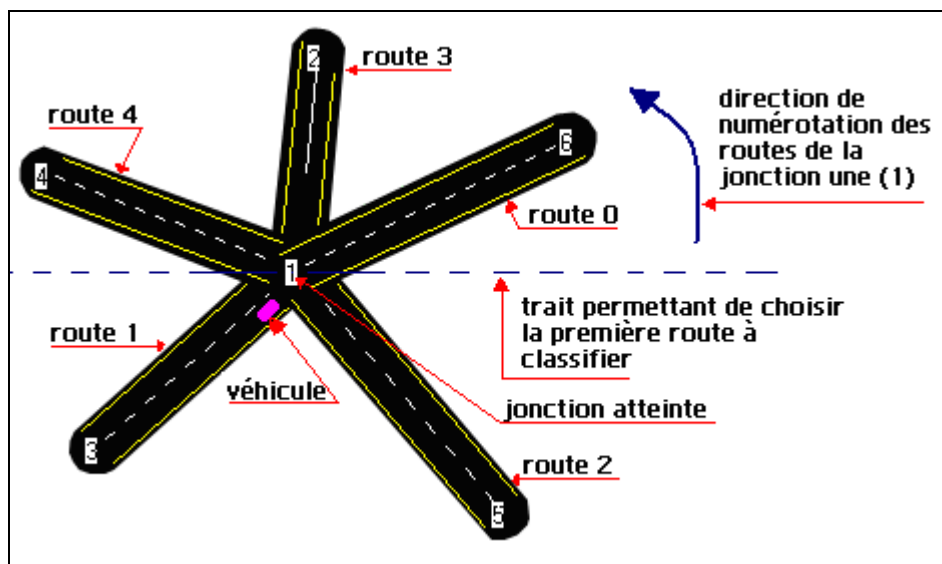


Figure III.7 : Réorganisation des routes au niveau d'une jonction.

III.4.2 Algorithmes de réalisation du modèle de mobilité

Parmi les procédures les plus intéressantes à la réalisation du modèle de mobilité, nous choisissons de détailler les procédures : « move », « policier », et « intersect », rappelant d'abord leurs principes :

III.4.2.1 Move (n) : C'est la procédure qui permet de faire bouger le nœud « n » dans le réseau, elle est appelée périodiquement (nous avons pris une période de temps égale à 0.25 secondes).

Selon la route de circulation du nœud « n » et suivant sa voie, on tire les coordonnées (jx, jy) de la jonction cible (C'est la jonction vers laquelle le nœud est en destination, c'est la jonction « j1 » de la route « r » si la voie est égale à un, et c'est la jonction « j2 » de la route « r » sinon). Les coordonnées actuelles du nœud « n » sont représentées par le point (sx, sy).

En suite, on fait un décalage du point de coordonnées (jx, jy) afin de trouver les coordonnées (ciblx, cibly) du point déterminant la destination finale du mouvement du nœud « n » sur la route « r ». Le point de coordonnées (ciblx, cibly) est le point d'intersection des deux droites (Δ3) et (Δ2), avec :

(Δ1) : Droite qui passe par les deux points centres des jonctions j1 et j2 de la route « r ».

(Δ2) : Droite qui passe par le point de coordonnées (jx, jy) et qui est perpendiculaire avec la droite (Δ1).

(Δ3) : Droite qui passe par le point de coordonnées (sx, sy) et qui est perpendiculaire avec la droite (Δ2).

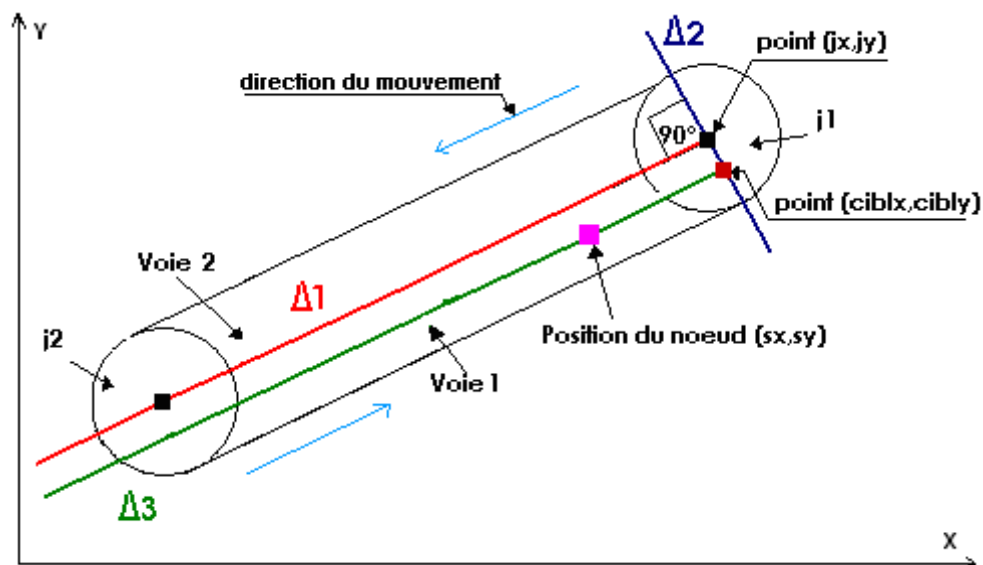


Figure III.8 : schéma illustratif du mouvement d'un nœud.

Pour calculer les coordonnées (x0,y0) de la nouvelle position atteinte par le nœud « n », nous suivons les étapes suivantes :

- 1) Calculer la distance max qui sépare le point (sx, sy) du point (ciblx, cibly) par la formule suivante : $\text{distance_max} = \sqrt{[(sx-ciblx)^2 + (sy-cibly)^2]}$
- 2) Générer un nombre aléatoire dans l'intervalle [0, distance_max], soit « dist » ce nombre. Notons que la génération du nombre aléatoire « dist » est répétée tant que la voie devant le véhicule n'est pas libre.
- 3) Pour trouver la solution (x0,y0), nous proposons deux méthodes :

3.1) Soit à résoudre le système suivant :
$$\begin{cases} (x-sx)^2+(y-sy)^2=dist^2 ; \text{ fonction du cercle.} \\ y=a*x+b ; \text{ fonction de la droite } (\Delta 3). \end{cases}$$

Pour ce système, nous trouvons deux solutions, donc pour le choix du point solution nous appliquons l'algorithme (*) suivant :

Si (sx différent de ciblx) **alors**

Si (ciblx est supérieur à sx) **alors**

On prend le point dont la coordonnée de l'abscisse est la plus grande.

Sinon on prend le point dont la coordonnée de l'abscisse est la plus petite.

Sinon (En cas d'égalité entre ciblx et sx alors on teste les coordonnées cibly et sy)

Si (cibly est supérieur à sy) **alors**

On prend le point dont la coordonnée 'y' est la plus grande.

Sinon on prend le point dont la coordonnée 'y' est la plus petite.

3.2) si $ciblx-sx \neq 0$:

$$x0 = \begin{cases} sx + [(dist*|ciblx-sx|)/distance_max] & \text{si le véhicule est sur la voie 1} \\ sx - [(dist*|ciblx-sx|)/distance_max] & \text{si le véhicule est sur la voie 2} \end{cases}$$

$y0 = a*x0+b$; avec « a » et « b » sont les coefficients de la droite ($\Delta 3$).

Si $ciblx=sx$:

$x0=sx$;

$$y0 = \begin{cases} sy + dist & \text{si le véhicule est sur la voie 1} \\ sy - dist & \text{si le véhicule est sur la voie 2} \end{cases}$$

4) Calculer la vitesse du nœud par la formule : $vitesse=dist/0.25$ (m/s)

5) Comparer la vitesse du nœud avec la vitesse min et la vitesse max permises sur la route du mouvement, en consultant les champs « vmin » et « vmax » de la structure « route[r] ». Le résultat de comparaison est tracé dans le fichier « bdd.txt »

6) Appeler la procédure « atteinrejonction », en lui faisant passer en paramètres les deux valeurs « n » et « j1 » si la jonction atteinte est j1 de la route « r », ou les paramètres « n » et « j2 » sinon.

III.4.2.2 Atteinrejonction (n,jon) : C'est une procédure appelée après tout mouvement d'un nœud, afin de tester si le nœud en question est arrivé à la jonction cible ou non. Dans le cas où le nœud « n » atteint la jonction « jon », cette procédure bloque le mouvement du nœud « n » et signale au « policier » l'arrivée d'un nœud « n » sur la jonction « jon », en lui passant les paramètres d'appel (n,jon) .

Soit le nœud « n » se trouvant à la position (sx,sy), tel que : $sx=n.posx$ et $sy=n.posy$; cette procédure permet de tester si ce nœud « n » est dans le périmètre de la jonction cible « jon » de coordonnées (xj, yj), en testant si le point « n » de coordonnées (sx, sy) appartient au cercle dont le point centre est de coordonnées (xj, yj) et de rayon égal à 20.

Ce cercle est représenté par la fonction mathématique suivante :

$$(x-xj)^2 + (y-yj)^2 - (20)^2 = 0$$

Le point (xj, yj) est le point central de la jonction « jon » i.e. :

$$xj=tabj[jon].x \text{ et } yj=tabj[jon].y$$

Le test d'appartenance est donc une simple vérification mathématique, représentée par :

$$[(sx-xj)^2 + (sy-yj)^2 - (20)^2] \leq 0 \Rightarrow sy^2 - 2.sy.yj + (sx^2 + xj^2 - 2sx.xj + yj^2 - 400) \leq 0$$

Si le test est vrai, le véhicule est mis en attente en positionnant le champ « halt » du véhicule « n » à la valeur « vrai », et la procédure « **policier (n, jon)** » sera appelée. Sinon le champ « halt » reste à faux pour que le véhicule puisse continuer son mouvement.

III.4.2.3 Policier(n,jon) : C'est la procédure qui représente l'ensemble des policiers de toutes les jonctions du réseau. Elle permet de consulter l'état du nœud « n », et de faire véhiculer le nœud « n » suivant l'état et la jonction atteinte « jon ». Son fonctionnement est le suivant:

- 1) Consulter l'état du nœud « n ».
- 2) Si l'état est « sortir du réseau » et si la jonction « jon » est un point d'entrée/sortie alors le véhicule « n » sera supprimé du réseau, en mettant le champ « pres » à faux pour qu'il ne sera plus comptabilisé ni au mouvement ni aux envois des messages.
- 3) Si la jonction « jon » est une jonction unaire, dans ce cas le véhicule fera un demi-tour sur sa même route, alors seulement la voie du nœud « n » sera changée : $n.voie=3-n.voie$. Le calcul de sa position est fait par la procédure « intersect ».
- 4) Si la jonction « jon » est une jonction binaire ou multiple, la voie et la route du nœud « n » seront changées comme suit:

Soit « r » le numéro de la route où circule le véhicule « n » : $r = n.route$

Soit « nbr » le degré de la jonction « jon », d'où $nbr = tabroutj[jon].length$

On alloue un degré d'inclinaison selon la formule : $degré = r \text{ modulo } nbr$

La nouvelle route « newr » à affecter est la route se trouvant à la position « nr » du tableau « tabroutj » associé à la jonction « jon », tel que : $nr = (r \pm degré) \text{ modulo } nbr$.

(+ : si l'état= « tourner à droite », - : si l'état= « tourner à gauche »).

La nouvelle route est alors : $newr = tabroutj[jon][nr]$.

Une fois, la route « newr » est affectée au véhicule « n », on attribue à ce dernier la voie selon laquelle il doit circuler par appel à la procédure « Intersect ». Ceci en lui passant les

paramètres « n », « jonc » et « jonv » tels que « jonc » et « jonv » sont les deux jonctions de la route « newr », avec « jonc » qui est la jonction atteinte (à partir de laquelle le nœud « n » doit reprendre son mouvement sur la route « newr »).

III.4.2.4 Intersect (n,jonc,jonv) : C'est la procédure permettant de positionner le véhicule « n » au début de la jonction « jonc » afin d'aller vers la jonction « jonv ». Le processus de fonctionnement est le suivant :

Soit « newr » la nouvelle route affectée au véhicule « n » par la procédure « policier ».

La voie est calculée suivant le type de la jonction « jonv » dans l'enregistrement de la route « newr » i.e. si la jonction « jonv » est la jonction « j1 » de la route « newr » alors la voie affectée sera la voie une, sinon la voie sera deux. On aura donc le test suivant :

Si (route[newr].j1=jonv) alors n.voie=1 sinon n.voie=2.

Une fois la voie est affectée au nœud « n », sa position n'est rien d'autre que le point d'intersection de la droite ($\Delta 3$) avec le cercle du centre (x_j, y_j) et de rayon égale à 40, tel que (x_j, y_j) sont les coordonnées de la jonction « jonc » et ($\Delta 3$) la même droite représentée dans la figure III.8.

Soit (x_v, y_v) les coordonnées de la jonction « jonv » données par :

$$x_v = \text{tabj}[\text{jonv}].x \text{ et } y_v = \text{tabj}[\text{jonv}].y$$

Les coordonnées (s_x, s_y) de la position du nœud « n » sont donc définies par le système d'équations mathématiques suivant :

$$\begin{cases} (x-x_j)^2+(y-y_j)^2=40^2 ; \text{ fonction du cercle.} \\ y=a*x+b ; \text{ fonction de la droite } (\Delta 3). \end{cases}$$

La résolution d'un tel système (dans notre cas) donne forcément deux points d'intersection. Le choix du point à prendre est réalisé au travers l'algorithme (*) vu précédemment en changeant $(ciblx, cibly)$ par (x_v, y_v) et en remplaçant (s_x, s_y) par (x_j, y_j) :

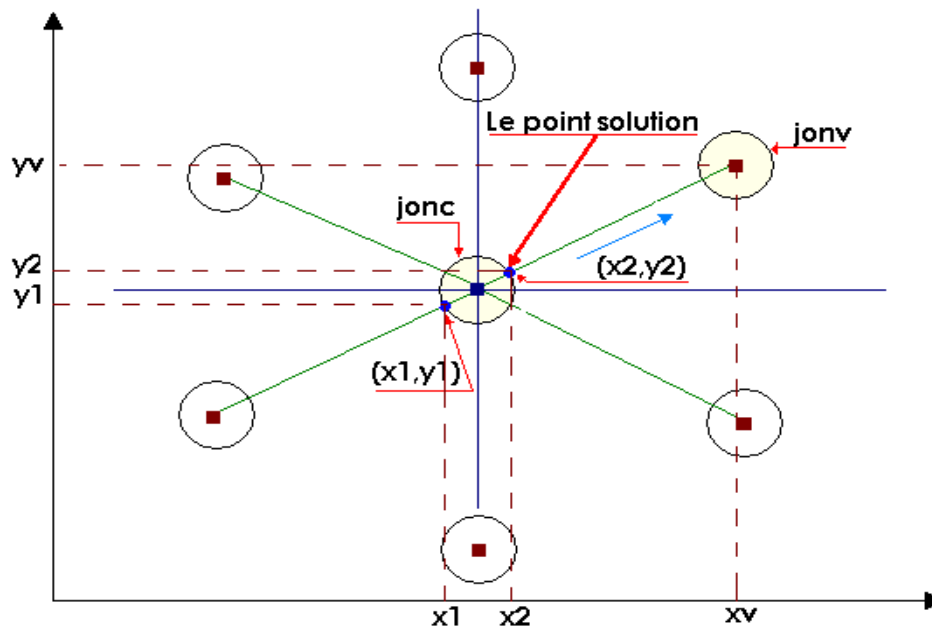


Figure III.9 : Choix du point solution.

Le véhicule continuera son mouvement sur sa nouvelle route jusqu'à atteindre la jonction de destination et là la procédure « **Atteindrejonction** » sera re-déclenchée et le processus qui gère la redirection d'un nœud vers une autre route recommencera ainsi.

III.4.3 Création du réseau

III.4.3.1 Transmission des messages

III.4.3.1.1 Création des agents

Dans notre étude, nous avons pris avantage de la classe **Agent/Message** pour réaliser la transmission des messages entre les nœuds du réseau.

Nous avons créé quatre sous-classes de la classe **Agent/Message**, tel que pour chaque réseau, deux agents de type **Agent/Message** sont créés : l'un pour l'envoi et l'autre pour la réception.

SenderV et ReceiverV sont les Agents du réseau purement VANET,

Sender et Receiver sont les agents du réseau VANET-postes fixes.

La création de ces sous-classes, est alors réalisée par les quatre commandes TCL suivantes :

```
Class SenderV -superclass Agent/Message
Class ReceiverV -superclass Agent/Message
Class Sender -superclass Agent/Message
Class Receiver -superclass Agent/Message
```

III.4.3.1.2 Connexion des agents

Les agents sont attachés aux nœuds selon le type de réseau, et chaque agent de type Sender est connecté avec l'agent de type Receiver.

Si un nœud mobile **A** était à la portée de communication d'un poste fixe **B**, et lors de son mouvement il sera sous la portée de communication d'un autre poste fixe (soit le poste **C**), alors les agents de communication entre le nœud **A** et le poste fixe **B**, devront être détachés et d'autres agents doivent être créés pour faire le lien de communication entre le véhicule **A** et son nouveau poste fixe associé (le poste fixe **C**).

Le détachement et l'attachement des agents aux nœuds, ainsi que l'établissement des connexions entre les agents sont effectués à chaque mouvement des nœuds par les deux procédures : « miseajourposte » et « miseajourvoisinage », tel que :

- ❖ **Miseajourvoisinage** : est la procédure responsable de mettre à jour le voisinage de chaque nœud mobile dans le réseau VANET. Elle permet d'attacher, ou de détacher les agents aux nœuds avec un éventuel établissement d'une connexion entre les agents.
- ❖ **Miseajourpostes** : permet de traiter l'appartenance des nœuds mobiles à la portée d'un poste fixe, et ainsi de détacher ou d'attacher et connecter leurs agents.

La **figure III.10** illustre l'attachement des agents aux nœuds et la connexion entre ces derniers.

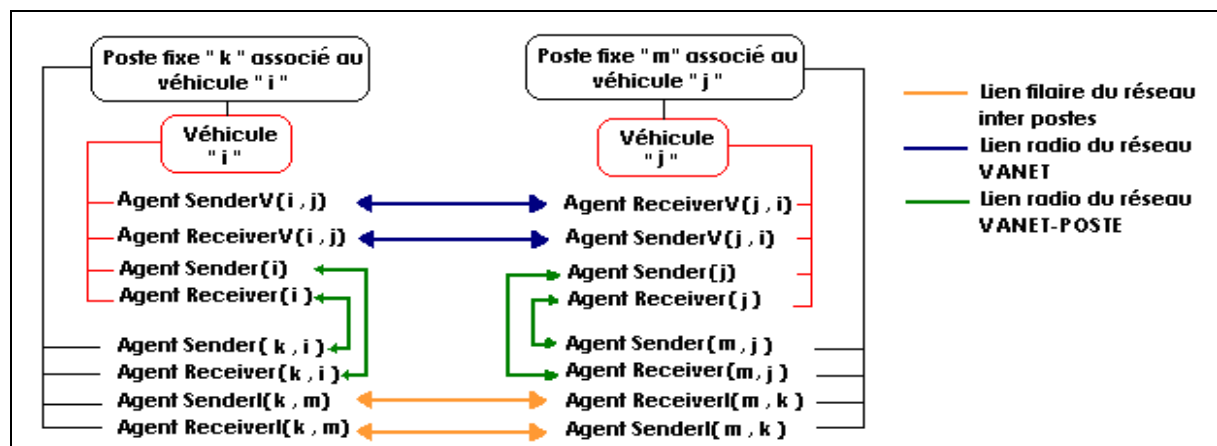


Figure III.10 : Attachement des agents aux nœuds.

III.4.3.1.3 Envoi des paquets de données (Messages)

Nous avons supposé que les arrivées des requêtes suivent un processus de poisson de paramètre λ , donc les durées séparant deux envois successifs suivent une loi exponentielle (**T**) de même paramètre λ .

La durée séparant deux envois successifs peut être donnée par la formule suivante :

$$t = (-1/\lambda) * \ln(1-U)$$

Avec U la fonction de répartition de la loi T : $U = 1 - e^{-\lambda \cdot t}$; $t \geq 0$

Pour bien comprendre l'envoi des données, nous allons illustrer ce dernier, pour chaque réseau, par des exemples et des schémas illustratifs.

Dans NS2, la taille des paquets de type Message est de 64 octets. Si la taille du message envoyé dépasse les 64 octets, nous devons établir une stratégie qui nous permet soit d'agrandir la taille des paquets en modifiant le fichier « message.h », soit d'envoyer les messages par parties (par tranches), soit de codifier les messages avant de les envoyer. Nous avons opté pour la technique de codage des messages en supposant qu'au niveau de chaque nœud il existe une application permettant le décodage :

- ❖ **La procédure « trait »** : Permet de traiter la réponse reçue par l'émetteur.
- ❖ **La procédure « traitreq »** : Permet de traiter la requête reçue par le récepteur.

a) Envoi dans le réseau purement VANET

Les nœuds du réseau VANET sont des véhicules pouvant s'échanger des messages entre eux. Dans notre application, ces messages sont générés aléatoirement par une fonction de génération des requêtes (cas d'émission), ou bien sont des messages d'alerte. Lors de la réception de ces requêtes, les véhicules récepteurs répondent par des messages correspondant aux requêtes reçues, par une fonction de traitement des requêtes.



Figure III.11 : Transmission des messages dans le réseau purement VANET.

b) Envoi dans le réseau VANET-Postes

Dans ce réseau les véhicules sont des clients, générant des requêtes vers leurs postes fixes associés qui jouent le rôle de serveurs. Selon la requête client reçue par le serveur, ce dernier la traite et envoie la réponse appropriée au client. La procédure de traitement des requêtes fait référence au fichier « base de données » généré lors de la création du scénario de mouvement des nœuds, afin de tirer les statistiques désirées par le client.

Les requêtes qui peuvent être générées par un véhicule ayant l'identifiant « k » sont les suivantes :

- ❖ **W*[number_diff \$k \$nbrnoeud]**: Le véhicule « k » envoie une requête pour connaître la position d'un noeud dont l'identifiant est généré par la fonction «number_diff ».
- ❖ **I*[randroute]** : Le véhicule « k » veut avoir des informations sur une route dont le numéro est généré aléatoirement par la fonction « randroute ».
- ❖ **T*[randroute]*[allocTaux]** : Le véhicule « k » veut avoir des statistiques sur la route dont le numéro est généré aléatoirement par la fonction « randroute ».

La fonction « allocTaux » permet de générer un identifiant indiquant le taux à calculer parmi l'ensemble des identifiants suivant :

- P** : Taux de véhicules prioritaires.
- S** : Taux de véhicules en stationnement.
- L** : Taux de véhicules circulant lentement.
- A** : Taux de véhicules en excès de vitesse.
- D** : Taux d'accidents.

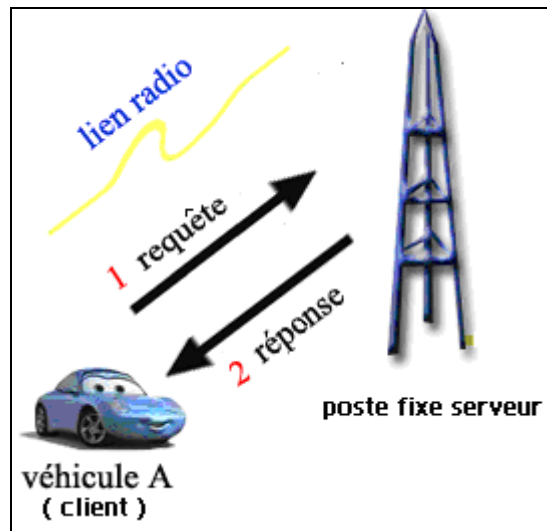


Figure III.12 : Transmission des messages dans le réseau VANET-Postes.

III.4.3.2 Envoi des acquittements

Pour les deux types de réseaux, une gestion du renvoi et des acquittements est établie comme suit :

A chaque envoi d'une donnée (requête ou réponse), le nœud émetteur initialise un « Timer » à une certaine valeur positive. À la réception d'une donnée, le nœud récepteur envoie un acquittement au nœud émetteur.

La valeur du « Timer » est décrémentée à chaque top d'horloge. Si cette valeur atteint la valeur zéro et si l'acquittement du nœud récepteur n'est pas encore reçu par l'émetteur, ce dernier réactive le « Timer » et renvoie la donnée.

III.4.3.3 Renvoi des requêtes et des réponses

A chaque envoi d'une requête (resp. réponse), le nœud émetteur enfile le couple (donnée, destination) dans une file des requêtes (resp. file des réponses) pour permettre le renvoi en cas de non réception de l'acquittement du nœud destinataire, si le Timer déclenche un Timeout.

Si le timeout est déclenché sans avoir reçu l'acquittement par le nœud émetteur, ce dernier défile la requête (resp. la réponse) de la file des requêtes (resp. file des réponses), et la renvoie au nœud destinataire et réactive le « Timer » à nouveau.

À la réception de l'acquittement, avant que le timeout ne sera déclenché, le nœud émetteur supprime la requête (resp. la réponse) de sa file des requêtes (resp. file des réponses).

III.5 Calcul des valeurs des métriques

Les métriques sont des paramètres de test du protocole de routage qui permettent de mesurer les performances de celui-ci à bases des quelles la comparaison entre les protocoles sera effectuée.

Dans notre étude, nous avons pris en compte les métriques suivantes :

III.5.1 Calcul du taux de perte des paquets

Le taux de perte des paquets est le rapport entre le nombre de paquets perdus, et le nombre total des paquets envoyés.

$$\text{Taux de perte} = \text{nombre de paquets perdus} / \text{nombre de paquets émis}$$

Dans le nombre des paquets perdus, nous incluons les paquets de données et les paquets de contrôle qui servent à trouver les routes et à les maintenir. Ce taux est recalculé à chaque émission ou perte d'un paquet dans le réseau. Ce test est très important car il nous donne également le taux de bonne réception des paquets dans le réseau car :

$$\text{Taux de réception} = 1 - \text{taux de perte}$$

Cette métrique nous permet de choisir, le protocole qui minimise les pertes des paquets.

Le taux de perte des paquets est calculé grâce à l'outil AWK qui permet de filtrer du fichier trace généré que les lignes contenant « s » ou « d » à la première colonne et les reporter sur un fichier intermédiaire.

Voici un exemple d'une ligne du fichier trace à sélectionner :

```
d -t 0.212764903 -Hs 4 -Hd -2 -Ni 4 -Nx 530.00 -Ny 355.00 -Nz 0.00 -Ne -1.000000 -NI  
MAC -Nw COL -Ma 0 -Md ffffffff -Ms 15 -Mt 800 -Is 21.255 -Id -1.255 -It AODV -Il 100 -  
If 0 -Ii 0 -Iv 27
```

Afin de ne pas copier toute la ligne sélectionnée inutilement dans le fichier intermédiaire, AWK permet aussi de prendre uniquement les colonnes nécessaires. Pour ce cas, les colonnes sélectionnées sont : la première pour indiquer le type d'évènement sur le paquet, la deuxième pour indiquer le moment où s'est produit l'évènement et la troisième pour l'identifiant de l'émetteur.

Ensuite, pour appliquer la formule, nous allons parcourir ce fichier intermédiaire ligne par ligne, à chaque fois qu'un 'd' est rencontré le nombre de paquets perdus est incrémenté et le rapport : *nombre de paquets perdus/nombre de paquets total émis*, est effectué.

Cependant, il y a un autre élément à prendre en considération qui est l'envoi des messages de contrôles en broadcast (c'est-à-dire à tous le réseau) ; dans ce cas un seul *send* est fait mais plusieurs nœuds reçoivent donc plusieurs *receive* seront tracés sur le fichier trace, et si ces paquets ne seront pas reçus ceci sera interprété par plusieurs perte.

Donc si on ne fait pas attention, on comptabilisera plusieurs fois le même paquet perdu. Pour remédier à cette situation, nous avons ajouté un test afin qu'il empêche l'incrémentation du nombre des paquets perdus plusieurs fois.

III.5.2 Calcul du taux d'overhead de routage

L'Overhead du réseau permet de mesurer le taux de paquets de contrôle de routage dans le réseau par rapport au nombre total de paquets émis. Nous avons donc la formule suivante :

Overhead= nombre de paquets de contrôle de routage / le nombre total des paquets émis

Ce taux est recalculé à chaque émission ou réception d'un paquet au niveau de la couche Internet. Le calcul de l'overhead de routage est important pour déterminer la nature des paquets qui occupe le réseau. Par exemple, si le taux d'overhead est très élevé cela veut dire qu'il y aura beaucoup de chances que le canal de communication soit occupé par les paquets de contrôle de routage, donc les paquets de données ne seront plus prioritaires, et par conséquent le taux d'envoi effectif va diminuer.

Donc ce taux nous permet de connaître le type de paquets qui inondent le plus le réseau (paquets de données ou paquets de contrôle).

III.5.3 Calcul de la charge du réseau

La charge du réseau est le nombre de paquets existant dans le réseau, ce nombre est recalculé à chaque émission ou réception de paquets. Ce test est fait pour savoir si le réseau est chargé ou pas, il est donné par la formule suivante :

$$\text{Charge du réseau} = \text{nombre de paquets envoyés} - (\text{nombre de paquets reçus} + \text{nombre de paquets perdus})$$

Cette métrique permet de choisir parmi les protocoles testés, celui qui encombre le moins le réseau.

Ce test sert à calculer à chaque émission, réception ou perte de paquet la charge du réseau et de l'écrire dans un fichier en sortie que lira XGraph pour dessiner la courbe des valeurs de charge du réseau en fonction du temps.

Nous devons alors filtrer le fichier trace avec AWK , comme nous avons fait précédemment, cette fois ci, en sélectionnant les lignes contenant dans la première colonne « s » pour send, « r » pour receive ou « d » pour drop prise au niveau de la couche MAC, puis reporter sur le fichier intermédiaire la première, la troisième et la septième colonne pour avoir l'identifiant de l'émetteur.

La variable qui calcule la charge du réseau est donc incrémentée à chaque send et décrémentée à chaque receive ou drop, tout en tenant compte des messages broadcast.

III.5.4 Calcul du délai de bout en bout

Le délai de bout en bout est la durée de temps prise par le paquet, à partir de sa source d'envoi vers sa destination de réception. Nous calculerons ce délai pour chaque paquet dans le réseau suivant cette formule :

$$\text{Délai de bout en bout} = \text{instant de réception du paquet} - \text{instant d'émission du paquet}$$

Cette métrique permet de choisir le protocole de routage dont le délai de bout en bout est le minimum possible.

Le calcul de cette métrique se fait comme suit :

Nous créons un tableau de N*N entiers, avec N est le nombre total des nœuds du réseau c'est à dire c'est le nombre des véhicules incrémenté du nombre des postes fixes. Chaque case va contenir la valeur du délai de bout en bout du paquet en cours de transmission.

Lorsqu'un nœud k décide d'envoyer un paquet au nœud m , il met la valeur du temps actuel ($\$ns\ now$) dans la case du tableau qui lui est réservée $Tab(k,m)$. Cela se fait dans la procédure $Send$ (soit $sendvv$, ou $sendvp$) de la classe $Sender$.

Lorsque le nœud m reçoit la requête du nœud k , il exécute la procédure $recv$ de la classe $Receiver$. Dans cette dernière, il calculera le temps de bout en bout du nœud k qui a envoyé la requête en faisant :

$$\text{Délai de bout en bout} = \text{temps actuel} - \text{tab}(k,m)$$

III.5.5 Calcul du temps de réponse

Le temps de réponse est le temps qui s'écoule entre l'instant où un nœud envoie une requête et l'instant où il reçoit la réponse (de cette même requête).

$$\text{Temps de réponse} = \text{instant de réception de la réponse} - \text{instant d'émission de la réponse}$$

Cette donnée permet de juger si le protocole en question est capable de répondre aux requêtes, le plus rapidement possible.

III.5.6 Calcul de la gigue

La gigue est la différence entre le délai de bout en bout max et le délai de bout en bout min.

$$\text{Gigue} = \text{Délai de bout en bout max} - \text{Délai de bout en bout min}$$

Ce test est très important, car si la gigue est faible cela peut vouloir dire que les nœuds sont proches les uns des autres donc la connectivité du réseau est forte ou bien les nœuds sont très mobiles (qui est le cas des VANET).

Nous disons qu'il y a une forte connectivité dans le réseau si les nœuds se trouvent dans les mêmes portés de transmission les uns des autres. A l'inverse, si les valeurs des giges sont grandes cela veut dire que les vitesses des nœuds sont très variables et que la connectivité du réseau n'est pas stable. Donc les délais de bout en bout sont très variables.

Le choix du protocole est jugé par le fait que ce dernier assure la stabilité de la gigue (variation de délai) car si la gigue est stable, il y a moins de calcul nécessitant la régulation du débit et donc moins de congestion dans le réseau.

III.5.7 Calcul de la bande passante

La bande passante est le nombre de Méga bit de données reçus par seconde. Périodiquement on recalcule ce nombre en utilisant la formule suivante :

$$\text{Bande passante} = \text{taille du message reçu en bits} / \text{délai de bout en bout pour ce paquet (secondes)}$$

Plus la bande passante est grande, plus le réseau est chargé et plus il y a des pertes de paquets.

Pour programmer ça, nous utilisons une variable « nboctetsreçustotal » initialisée à zéro qui compte le nombre de paquets de données reçus dans le réseau. Pour effectuer ce calcul, on utilise l'algorithme suivant :

A chaque réception d'un paquet les procédures *recv* de *Sender* et *recv* de *Receiver* sont exécutées. Nous cherchons le nombre d'octets composant le paquet. Cela est fait grâce à la fonction TCL « *bytlength* » qui donne le nombre d'octets composant le paquet reçu. Soit « nb » le nombre d'octets reçus, nous aurons alors :

$$\text{Nboctetsreçutotal} = \text{Nboctetsreçutotal} + \text{nb}$$

Périodiquement, nous appelons la procédure *record* qui calculera la valeur de la bande passante consommée comme suit :

$$\text{Bande passante consommée} = \text{Nboctetsreçutotal} / \text{période} * 8 / 100000 \text{ Mb/s}$$

Avec : Période : durée en seconde qui sépare deux calculs de la bande passante.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons expliqué la solution que nous avons proposée pour modéliser les réseaux VANETs, nous avons aussi détaillé les différentes classes que nous avons utilisées tout en montrant le rôle de chacune d'elles. Ensuite nous sommes passés à la partie simulation où nous avons montré l'implémentation du réseau VANET sous NS2, pour terminer avec les métriques à calculer afin de mesurer les performances des protocoles de routage dans un environnement VANET.

Le prochain chapitre sera consacré aux tests et à la discussion des résultats.

CHAPITRE 4

TESTS et ANALYSE des RESULTATS

Introduction

Le but de toute simulation est de tester les systèmes réalisés avant qu'ils soient mis en marche afin de déterminer les conditions exactes de leur fonctionnement, évaluer leurs performances et prévoir les différents états liés à ces systèmes et donc de bien réagir et prendre des décisions.

Dans notre cas d'étude, les tests à effectuer sont nombreux (selon le nombre de métriques à faire varier). Nous avons choisi les plus importants afin de montrer les performances des protocoles de routage OLSR et DSR dans un réseau VANET. Ces protocoles sont implémentés sous NS-2 et ils ont déjà fait leurs preuves dans des études précédentes, c'est pour cela que notre choix s'est porté dessus.

IV.1 Les facteurs de la simulation

IV.1.1 Temps de simulation

Le temps de simulation est fixé et unifié pour tous les tests et ne dépend pas du type de la mobilité.

IV.1.2 Mobilité des nœuds

La variation de la mobilité des nœuds est un paramètre essentiel. Pour cela nous avons considéré deux cas de mobilité (faible et forte) selon la charge du réseau routier, le nombre des véhicules actuellement dans le réseau, le nombre de véhicules qui entrent au réseau ainsi que leur fréquences d'entrée.

IV.1.3 Nombre de nœuds

Le nombre de nœuds dans le réseau est choisi selon la mobilité et la capacité de la carte routière :

Si la mobilité est forte (mouvement rapide des nœuds), cela veut dire qu'il y a une grande probabilité pour que la voie devant un véhicule soit libre, et donc ce dernier peut accélérer. Le nombre de véhicules initialement dans le réseau est réduit, les véhicules quittent rapidement le réseau. Ceci étant dû au fait que le taux de stationnements est très réduit et la vitesse des nœuds est grande, d'où les véhicules qui arrivent durant la simulation sont de grand nombre afin de ne pas laisser le réseau vidé de véhicules. Aussi le temps qui sépare l'arrivée de deux véhicules successifs est grand pour que chaque véhicule puisse s'éloigner et sauvegarder ainsi les propriétés de la forte mobilité.

Si la mobilité est faible (mouvement lent des nœuds), le nombre de nœuds est grand, les arrivées sont rares car le réseau est déjà chargé avec les nœuds initiaux et les nœuds qui sortent sont de petit nombre, ce qui conduit aux encombrements.

IV.1.4 Carte routière

Nous avons choisi deux cartes routières pour chaque type de mobilité, donc nous avons utilisé deux cartes: une illustrant un environnement de faible mobilité et une autre de forte mobilité.

La carte correspondante au mouvement de forte mobilité (**figure IV.1**) représente une route à sens unique : les véhicules qui arrivent durant la simulation, entrent à partir des points d'entrée 4, 6, ou 5. Les véhicules peuvent quitter le réseau seulement par les jonctions 6, 5 ou 1. Dans cette carte, nous remarquons que la jonction 4 est un point d'entrée, et la jonction 1 est un point de sortie obligatoire (pour les nœuds qui atteignent cette jonction).

La carte modélisant la mobilité faible (**figure IV.2**) est représentée par trois routes, à sens unique, qui se déchargent dans une quatrième route à sens unique. À la sortie de la quatrième route, les véhicules se trouvent coincés dans un sous réseau routier constitué de deux routes.

Ce qui cause un encombrement d'où la faible mobilité des véhicules.

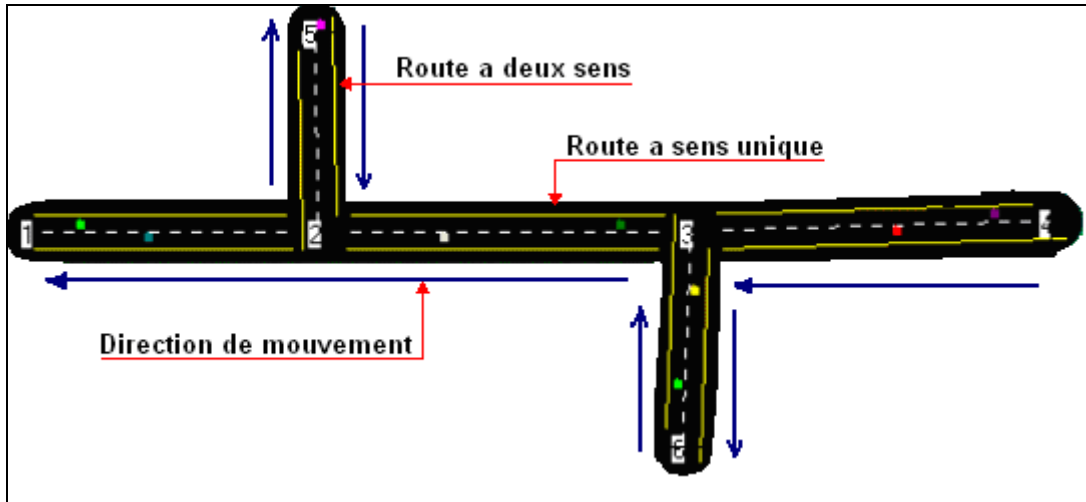


Figure IV.1 : Carte illustrant un environnement de forte mobilité.

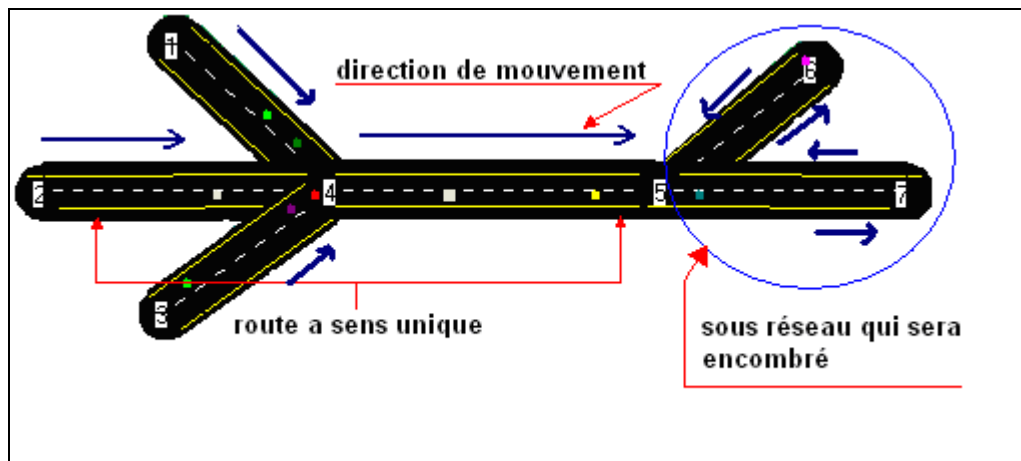


Figure IV.2 : Carte illustrant un environnement de faible mobilité.

IV.1.5 Le facteur λ et Le nombre de requêtes

Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre précédent, les temps d'émission des requêtes suivent un processus de Poisson, alors les durées séparant deux arrivées successives seront exponentielles de paramètre λ .

Plus λ est grand, plus l'intervalle séparant deux requêtes successives sera petit. Donc le nombre total de requêtes augmente.

Nous allons tester les performances de notre réseau avec six valeurs de λ prises aléatoirement qui peuvent générer des nombres différents de requêtes. Mais pour l'émission d'une requête dans le réseau VANET-poste, deux conditions s'ajoutent : l'existence du véhicule dans le réseau et sa connexion à son poste. Et pour les requêtes entre les véhicules (réseau purement véhiculaire), le nœud émetteur doit exister dans le réseau et il doit y avoir un chemin vers la destination (nœud récepteur), sinon la requête est enfilée et des renvois seront effectués. Le nombre de requêtes générées par λ , n'est pas forcément le nombre de requêtes réellement exécutées.

Notons que l'émetteur n'a pas une connaissance préalable d'existence du nœud destinataire. Pour cela, si le chemin entre l'émetteur et le destinataire n'existe pas, la requête sera enfilée.

IV.1.6 Protocole de transport

Afin de choisir le protocole de transport (UDP, TCP), des pré-tests selon les taux de réception, la gigue moyenne et le temps de réponse maximal sont nécessaires, sans oublier la variation du facteur λ (suivant la charge du réseau).

Donc pour chaque protocole de routage, on choisira le protocole de transport qui donne le plus grand taux de réception, la gigue moyenne la plus petite et le plus petit temps de réponse.

IV.2 Génération des scénarios de tests

La mobilité et la charge du réseau ont une influence importante sur le comportement du système car moins le réseau est chargé, plus la durée entre deux requêtes successives est grande, et donc moins de surcharge sur les postes fixes d'où l'amélioration du temps de réponse des requêtes qui sera plus petit.

Plus le mouvement des nœuds est fort, plus la topologie change rapidement et donc plus des paquets de contrôle surchargent le réseau. Ce qui fait que la probabilité de perte de paquets augmente.

Nous avons généré six scénarios de mouvement, représentés dans le tableau **IV.1**.

	Faible mobilité	Forte mobilité
Réseau Faiblement chargé	Modèle LF (Scénario1)	Modèle FF (Scénario4)
Réseau Moyennement chargé	Modèle LM (Scénario2)	Modèle FM (Scénario5)
Réseau très Chargé	Modèle LC (Scénario3)	Modèle FC (Scénario6)

Tableau IV.1 : Les différents scénarios selon la mobilité des nœuds et la charge du réseau.

IV.3 Les pré-tests

IV.3.1 Scénarios utilisés

Avant de commencer les tests, nous allons présenter les scénarios de mouvement que nous avons utilisés (**Tableau IV.2**).

Forte mobilité	Nombre de nœuds initiaux dans le réseau	10
	Nombre de nœuds ajoutés durant la simulation	26
	Nombre de nœuds supprimés durant la simulation	36
	Carte routière	forteMob.tcl
	Taux de stationnement	0.002
	Durée de stationnement	1
	Fréquence d'ajout des nœuds	0.7
	Fréquence de suppression des nœuds	0.02
Faible mobilité	Nombre de nœuds initiaux dans le réseau	20
	Nombre de nœuds ajoutés durant la simulation	5
	Nombre de nœuds supprimés durant la simulation	4
	Carte routière	faibleMob.tcl
	Taux de stationnement	0.15
	Durée de stationnement	8
	Fréquence d'ajout des nœuds	0.09
	Fréquence de suppression des nœuds	0.5

Tableau IV.2 : Scénarios de mouvement utilisés.

Notant que le taux de stationnement cité dans le tableau précédent représente le taux d'arrêt volontaire des véhicules. Mais lors de la génération du scénario de mouvement, des

véhicules peuvent stationner de façon obligatoire pour céder le passage à un véhicule prioritaire, ou si la voie devant ces derniers est trop chargée.

IV.3.2 Pré-tests de choix du facteur λ

Pour faire les pré-tests, nous avons généré pour chaque type de charge de réseau le même nombre initial de requêtes, les mêmes requêtes initiales, le même scénario de mouvement (selon la mobilité), et le même nombre de postes fixes (2 postes fixes). Nous avons donc généré le même environnement de travail pour faire les tests équitablement.

Comme la génération de requêtes dépend du mouvement des nœuds, nous ne pouvons pas assurer la génération du nombre de requêtes que l'on veut. Pour cela, nous avons choisi de prendre des valeurs assez grandes avec ajout d'une condition de test dans le programme, qui teste si le nombre de requêtes à générer est atteint ou non. Nous avons fait des pré-tests de durée de simulation de 100 secondes, en faisant varier le paramètre λ , et en calculant le nombre de requêtes réellement générées.

Nous remarquons dans le **tableau IV.3**, que les valeurs de λ dans le cas de forte mobilité sont grandes par rapport à celles de faible mobilité. Cela est dû à la rapidité du mouvement des nœuds (cas de forte mobilité), ainsi les nœuds s'éloignent rapidement, ils ne seront pas à portée de communication. Donc nous avons augmenté la probabilité de test d'envoi, et par conséquent la valeur de λ est grande.

Forte mobilité	Valeur de λ	1.7	2.6	6.5
	Nombre de requêtes générées	15	30	60
	Durée moyenne séparant deux émissions successives (en seconds)	2.19	0.74	0.36
	Type de scénario généré	FF	FM	FC
Faible mobilité	Valeur de λ	0.5	1.5	2.5
	Nombre de requêtes générées	15	30	60
	Durée moyenne séparant deux émissions successives (en seconds)	2.55	1.21	0.78
	Type de scénario généré	LF	LM	LC

Tableau IV.3 : Les scénarios des tests utilisés.

IV.3.3 Pré-tests de choix du protocole de transport

Nous avons utilisé une fonction objective afin de choisir le protocole de transport adéquat.

La fonction objective n'est rien qu'une fonction mathématique qui peut interpréter les résultats numériques. Nous avons pris la fonction suivante :

$$F = \text{MAX} \{f(T, D)\} = \text{MAX} \{(0.9 * T) + (0.1 / D)\} \quad \text{avec } T : \text{ le taux de réception}$$

$$D : \text{ le temps max de réponse.}$$

Notons que si aucune réponse n'est reçue, le D tend vers l'infinie et le quotient 0.1/D tend vers 0, ce qui donne

$$F = \text{MAX} \{f(T)\} = \text{MAX} \{T\}$$

Le tableau IV.4 expose les résultats obtenus durant la simulation avec TCP et UDP en faisant varier la durée séparant deux émissions de requêtes successives (λ), selon les trois valeurs citées précédemment.

		DSR		OLSR			Charge du réseau
Protocole de transport	TCP	79.76	81.63	79.79	76.13	Faible	
		83.34	86.20	67.72	65.19	Moyenne	
		81.37	83.23	81.34	65.22	Forte	
	UDP	82.59	90.16	74.00	59.59	Faible	
		83.70	83.91	64.12	51.02	Moyenne	
		85.42	53.63	69.62	59.92	Forte	
		Forte	Faible	Forte	Faible		

Tableau IV.4 : Les valeurs de la fonction $f(T, D)$

Les résultats sont résumés dans le tableau IV.5.

		TCP	UDP
Forte mobilité	DSR	81.49	83.90
	OLSR	76.28	69.24
Faible mobilité	DSR	83.68	75.90
	OLSR	68.84	56.84

Tableau IV.5 : Moyenne de la fonction $f(T, D)$ pour chaque protocole de routage, selon TCP et UDP pour les deux cas de mobilité.

D'après les résultats obtenus et les analyses, nous remarquons que TCP génère moins de pertes de paquets que UDP dans les deux types de mobilité (faible et forte). Le taux de réception est plus élevé. Ceci est dû au fait qu'avec TCP, les paquets de données sont acheminés en ordre, et si l'émetteur ne reçoit pas l'acquittement après une durée d'attente, la retransmission de paquet sera exécutée, ce qui minimise les taux de pertes. Par contre, avec le protocole UDP, les paquets n'arrivent pas dans l'ordre de leurs émissions, et il n'y a pas de retransmission en cas de perte.

C'est pour tout cela que nous choisirons de travailler avec TCP car les taux de réception des paquets sont meilleurs que ceux d'UDP.

IV.4 Analyse des résultats

IV.4.1 Analyse des résultats en forte mobilité

IV.4.1.1 Le taux de réception

La figure IV.3 représente le taux de réception des messages échangés dans les réseaux véhiculaire. Le protocole DSR présente le pourcentage de réception parfait (100%); il est suivi par OLSR avec un pourcentage de 56.42%.

Ceci s'explique par le fait que les protocoles réactifs ne cherchent pas le chemin vers la destination, sauf en cas de besoin (à la demande). Ce qui diminue le nombre de paquets de contrôle, et empêche d'encombrer le réseau inutilement, ceci diminuant les pertes des paquets et augmentant le taux de réception, contrairement aux protocoles proactifs.

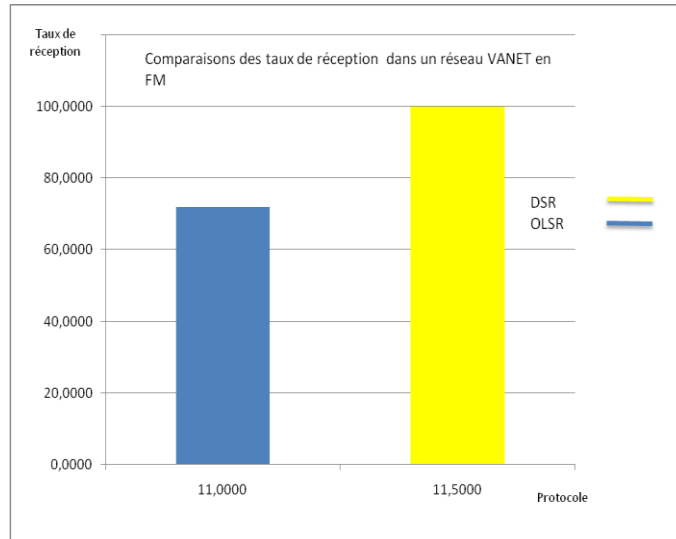


Figure IV.3 : Représentation en bars des taux de réception des messages dans le réseau VANET en FM.

En comparant avec le nombre de requêtes VANET réellement générées, nous trouvons que 5.5% des paquets VANET sont émis dans le réseau en utilisant DSR, alors que 7.7% sont envoyés en utilisant OLSR. Donc le réseau VANET pur est moins chargé en DSR ce qui diminue la probabilité de perte des paquets.

Notons que le nombre de requêtes VANET généré est le même pour les protocoles de routage DSR et OLSR (car nous avons utilisé le même scénario), mais le nombre de requêtes VANET envoyées dépend de la réception du paquet avant l'écoulement du time out, ce qui cause des renvois de messages inter véhicules. C'est pour cela que nous trouvons le nombre de paquets VANET émis, différent d'un protocole à un autre.

IV.4.1.2 Le temps de réponse maximal

Le temps de réponse est la durée séparant l'émission d'un paquet requête et la réception de la réponse finale.

La requête est soit passée d'un véhicule vers son poste fixe, soit vers un autre véhicule, ou bien elle est passée entre les postes fixes pour faire des mises à jour.

D'après les bars schématisés dans la figure IV.4, DSR présente un temps de réponse de 0.58 s. par contre OLSR présente OLSR. Cela est dû au fait que DSR est réactif, d'où au moment de l'envoi, il cherche à trouver le chemin vers la destination ce qui prend du temps. Contrairement au protocole proactif OLSR qui fait la mise à jour périodique des routes, les chemins vers une destination donnée sont connus à l'avance.

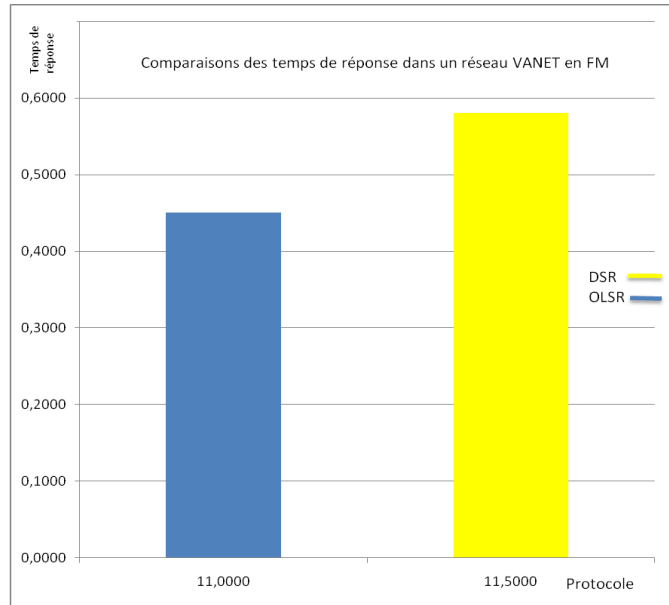


Figure IV.4 : Représentation des temps de réponses maximaux dans le réseau VANET en FM.

IV.4.1.3 La gigue

La gigue est la différence entre le délai de bout en bout min et le délai de bout en bout max, les résultats obtenus pour cette métrique et pour chacun des protocoles de routage sont illustrés dans les figures IV.5 et IV.6.

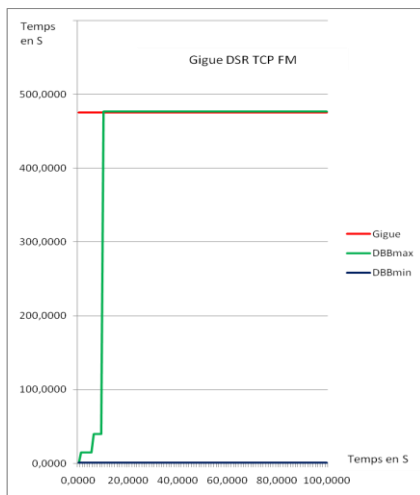


Figure IV.5 : Représentation du délai de bout en bout max et min et la gigue pour le protocole DSR en FM.

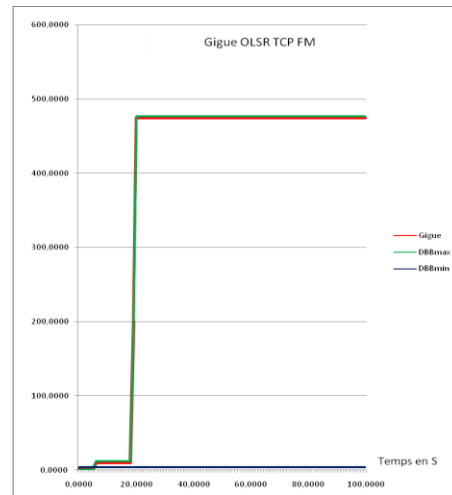


Figure IV.6 : Représentation du délai de bout en bout max et min et la gigue pour le protocole OLSR en FM.

En comparant les figures IV.5 et IV.6 nous constatons que DSR a la gigue la plus stable plus longtemps, ceci est dû à ses délais bout en bout min et max qui sont souvent stables. Ses temps de réponses sont souvent les mêmes.

IV.4.1.4 La charge du réseau

La charge du réseau avec les paquets de données (respectivement de contrôle) est le nombre de paquets de données (respectivement de contrôle) qui circulent dans le réseau. Donc plus la charge est faible, plus les requêtes sont satisfaites. Très clairement, nous remarquons que la classe proactive charge plus le réseau en paquets de données et de contrôle contrairement à la classe réactive. Pour l'explication, deux cas se présentent :

- **Le cas de la charge avec les paquets de contrôle (figure IV.7)**

Cela s'explique par le fait que les protocoles proactifs envoient beaucoup plus de messages de contrôle que les réactifs.

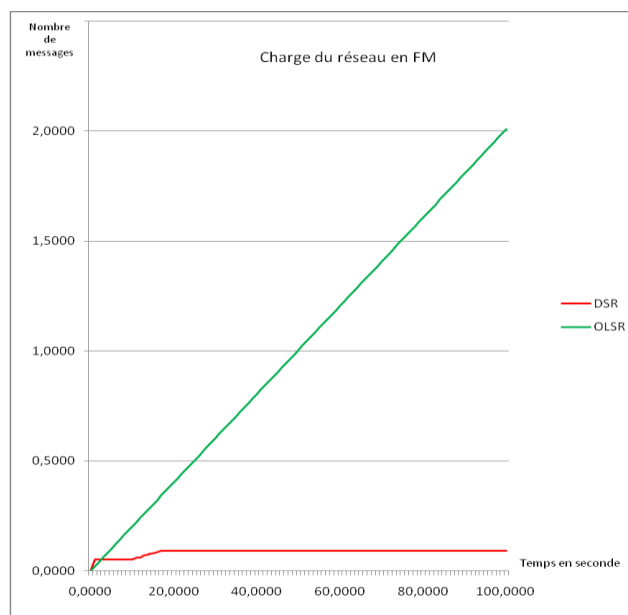


Figure IV.7 : Charge du réseau par rapport aux paquets de contrôle en FM.

- **Le cas de la charge avec les paquets de données (figure IV.8)**

Cela est dû au fait que le taux de réception des messages est élevé pour la classe réactive et bas pour la classe proactive. En effet, comme les protocoles réactifs ont de meilleurs taux de réception, ils chargent moins le réseau car les renvois de messages sont rarement effectués puisque les messages sont bien reçus.



Figure IV.8: Charge du réseau par rapport aux messages de données en FM.

IV.4.1.5 Overhead

L'Overhead est le rapport entre la charge du réseau par rapport aux messages de contrôle et le nombre total de messages émis.

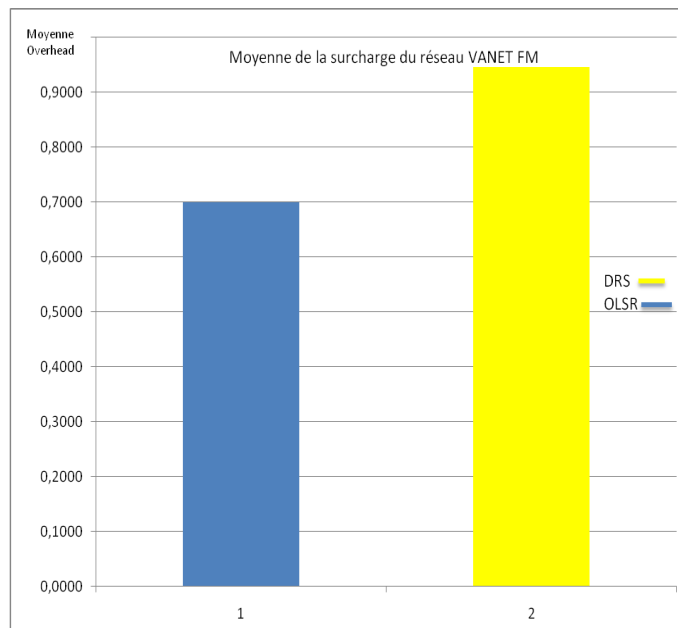


Figure IV.9 : Représentation de la surcharge moyenne du réseau (Overhead) par les paquets de contrôle et de données en FM.

D'après la figure IV.9, nous remarquons que le protocole réactif DSR est celui qui surcharge moins le réseau, ceci étant dû à son faible nombre de messages de contrôle

contrairement au protocole proactif OLSR qui surcharge beaucoup plus le réseau à cause de ses nombreux messages de contrôle et de sa forte charge.

IV.4.1.6 Conclusion des tests en forte mobilité:

De ce qui précède, nous ne pouvons pas conclure quel est le meilleur protocole à choisir car chaque protocole est performant pour une métrique donnée, et ne l'est pas forcément pour une autre métrique. C'est pour cela que nous avons fixé une fonction objective pour le choix définitif du protocole de routage qui satisfait au mieux notre réseau.

Pour les mêmes raisons citées, notre objectif est de minimiser le temps de réponse maxi, et de maximiser le taux de réception des paquets de données.

Avec cette fonction, nous pouvons remarquer que le protocole DSR est plus performant qu'OLSR.

✓ Donc pour un réseau à forte mobilité nous choisissons le protocole de routage DSR avec comme protocole de transport TCP pour notre réseau VANET.

IV.4.2 Analyse des résultats en faible mobilité

IV.4.2.1 Le taux de réception

Comme en forte mobilité, on a tenu à représenter le taux de réception en communication inter véhicules.

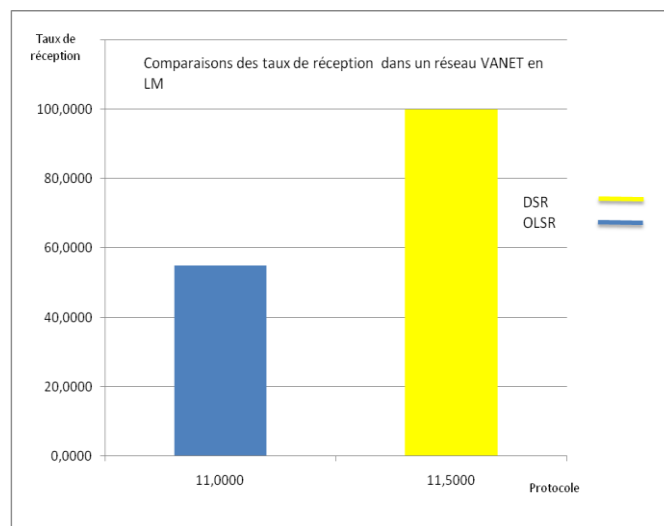


Figure IV.10 : Représentation en bars des taux de réception des messages dans le réseau VANET pur en LM.

D'après la **figure IV.10**, dans le réseau VANET, le protocole DSR présente le pourcentage de réception parfait (100%), par contre OLSR présente un pourcentage de 54% avec même explication qu'en cas de forte mobilité.

IV.4.2.2 Le temps de réponse maximal

DSR est réactif. Au moment de l'envoi, il cherche à trouver le chemin vers la destination ce qui prend du temps d'où son grand temps de réponse contrairement à OLSR qui a le plus petit temps de réponse.

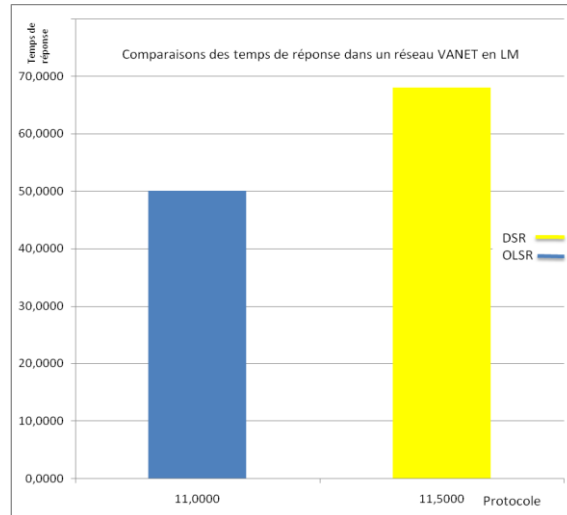


Figure IV.11 : Représentation des temps de réponses maximaux dans le réseau VANET en LM.

IV.4.2.3 La gigue

Tout comme en forte mobilité, on s'aperçoit d'après les figures ci-dessus l'obtention de la gigue par la différence entre les délais bout en bout min et max.

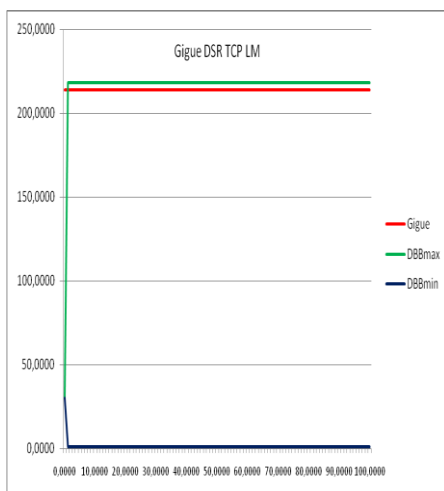


Figure IV.12 : Représentation du délai de bout en bout max et min et la gigue pour le protocole DSR en LM.

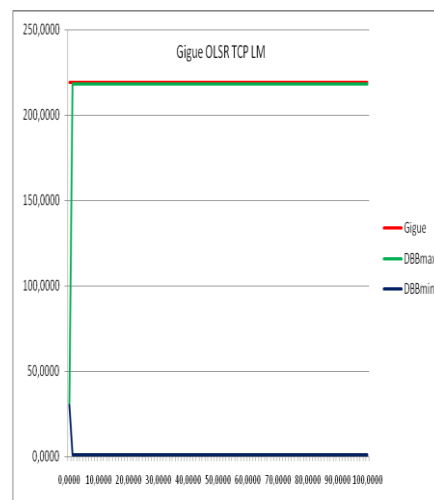


Figure IV.13 : Représentation du délai de bout en bout max et min et la gigue pour le protocole OLSR en LM.

On constate selon la **figure IV.12** et la **figure IV.13** que DSR a la gigue la plus basse. On remarque que les deux protocoles ont une gigue moyennement stable; donc on ne peut pas juger le meilleur protocole à partir de cette métrique.

IV.4.2.4 Charge du réseau

Nous remarquons que DSR charge le moins le réseau en faible mobilité, cela s'explique par le même raisonnement qu'en cas de forte mobilité. Ceci est lié aux taux de réception et au nombre de paquets de contrôle émis par chaque protocole

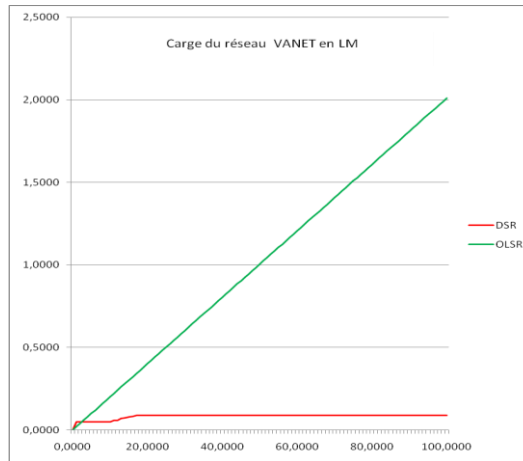


Figure IV.14 : Représentation de la charge du réseau VANET par les paquets de données en LM.

IV.4.2.5 Overhead

D'après la **figure IV.15**, on s'aperçoit que le protocole proactif OLSR surcharge beaucoup plus le réseau que le protocole réactif DSR avec même explication qu'en forte mobilité.

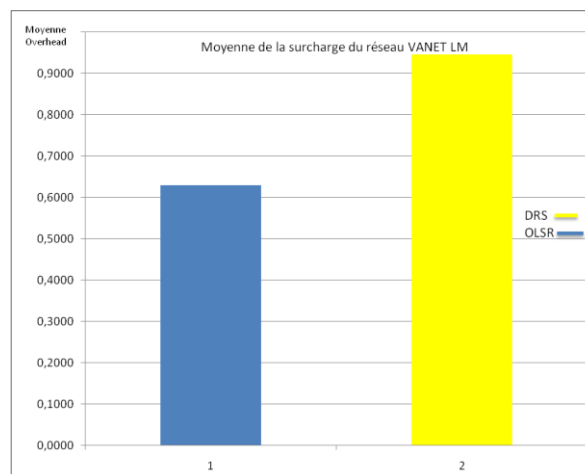


Figure IV.15 : Représentation de la surcharge du réseau (Overhead) par les paquets de contrôle et de données en LM.

IV.4.2.6 Conclusion des tests en faible mobilité:

Comme en forte mobilité, nous avons fixé une fonction objective pour le choix définitif du protocole de routage le plus adéquat à notre réseau, en minimisant le temps de réponse maxi et maximisant le taux de réception des paquets de données.

Avec cette fonction, nous pouvant constater que le protocole DSR est plus performant qu'OLSR.

✓ Donc pour un réseau à faible mobilité, nous choisissons le protocole de routage DSR avec TCP comme protocole de transport.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons testé les performances de notre réseau véhiculaire qui nous ont révélé que le protocole de transport TCP, s'est avéré plus fiable en terme de temps de réponse, de gigue et en consommation de la bande passante qu'UDP

Et pour les protocoles de routage, on a pu constater que pour la majorité des cas le protocole DSR est plus performant et plus adéquat pour notre réseau dans les deux cas de mobilité

Conclusion Générale

Le développement des nouvelles technologies a favorisé une formidable évolution des réseaux véhiculaires. Cette évolution vise à rendre les réseaux plus sûrs, plus efficaces, plus fiables et plus écologiques aussi bien du point de vue de l'industrie automobile que des opérateurs de réseaux et services. Les réseaux véhiculaires sont en effet une classe émergente des réseaux mobiles Ad Hoc, permettant des échanges de données entre véhicules ou encore véhicules et infrastructure. Ils suscitent un intérêt certain dans le but d'améliorer la sécurité et l'efficacité des transports routiers ainsi que l'amélioration du confort de l'utilisateur en lui fournissant une multitude des services d'information, d'aide à la décision, de guidage et d'accès à internet.

Notre domaine d'étude est concentré à l'étude des performances des protocoles de routage OLSR et DSR dans un réseau VANET.

Pour atteindre notre objectif et obtenir des résultats de simulation proches de la réalité, nous avons implémenté un modèle de mobilité pour un réseau VANET en tenant compte de plusieurs notions de réalisme à savoir : la circulation sur les routes, le respect des vitesses maximales autorisées sur les routes, stationnement des véhicules, la distance de sécurité entre les véhicules et le respect des priorités entre les classes des véhicules.

Nous avons testé le protocole DSR de la classe des protocoles réactifs et le protocole OLSR de la classe des protocoles proactifs conçus pour un réseau Ad Hoc, dans un réseau VANET.

D'après les résultats qu'on a obtenus, on a déduit que le mouvement des nœuds joue un rôle très important dans l'étude des performances d'un réseau mobile. Pour cela, il est nécessaire de choisir un modèle de mobilité réaliste pour que les résultats de la simulation soient fiables.

Dans les perspectives, nous proposons d'améliorer les performances d'un réseau véhiculaire en suivant ces points :

- Utilisation de règles supplémentaires du code de la route, comme la priorité à droite.
- Intégration de nouveaux types de routes à plus de deux voies.
- Extension de notre application à une version parallèle afin de prendre en charge de très grandes zones de simulation avec un nombre important de nœuds.
- Différencier les périmètres des zones de couverture et les puissances d'émission dans la source NS2.

- Prise en charge du Multicast.
- Intégration des panneaux de signalisation.
- Intégration des feux de circulations.

- [1] P. Anelli , E. Horlait, « NS-2: Principes de conception et d'utilisation » Septembre 99.
http://personnel.univ-reunion.fr/panelli/4_teaching/TP-NS-2/Doc/Manuel_NS1.3.pdf
- [2] A. Bachir , A. Benslimane, «A multicast protocol in ad hoc networks inter-vehicle geocast » , Vehicular Technology Conference, 2003. The 57th IEEE Semiannual, Volume: 4, On page(s): 2456- 2460.
- [3] H. Badis and K. Al Agha and I. Gaw, edzki. « QoS Routing in Ad Hoc Networks Using QOLSR With No Need of Explicit Reservation ». September 2004.
- [4] F Bai, N Sadagopan and A Helmy . « A framework to systematically analyze the impact of mobility on performance of routing protocols for ad hoc networks». Proc. IEEE Infocom, San Francisco, CA, 2003.
- [5] Lionnel Barrere « Etude et proposition de service dans les réseaux mobiles ».Thèse Doctorat. Université Bordeaux I 2009.
- [6] Anne Benoit, « Algorithmique des réseaux et des télécoms », 2006
<http://graal.ens-lyon.fr/~abenoit/reso05/cours/3-adhoc.pdf>
- [7] James Bernsen, and D. Manivannan, « Unicast Routing Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks: A Critical Comparison and Classification», Elsevier Journal of Parvasive and Mobile Computing, vol. 5, pp. 1-18, 2009.
- [8] Claude Chaidet, Isabelle Guérin Lassous « Routage QoS et réseau Ad hoc » Janvier 2003 <http://hal.inria.fr/docs/00/07/18/86/PDF/RR-4700.pdf>
- [9] T.H. Clausen and P. Jacquet, «Optimized Link State Routing(OLSR) », RFC 3626, October 2003.
- [10] Jérémie Defaye, « les différents types de réseaux sans fil » Conservatoire des arts et métiers Rhône –Alpes- Centre de Lyon 2007.
- [11] K. Fall, K. Varadhan, «The ns manual» UC Berkeley, LBL, USC/ISI, and Xerox PARC Mai 2010. http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/ns_doc.pdf
- [12] Sylvain Faure, « Mise en place de la Qualité de Service sur un lien WAN» 21 Juin 2005.
- [13] Magnus Frodigh, Per Johansson and Peter Larsson. « Wireless ad hoc networking –The art of networking without a network ». Ericsson Review N° 4, 2000
- [14] Anne Gégout, « Les réseaux Ad Hoc » Mars2005, www.tdf.fr/medias/view/?id=704

- [15] Erek Gokt Kturk « Ad Hoc Networks, Theirs Simulation, Emulation and real world Experiments » <http://folk.uio.no/erek/talks/050323odtumanet.pdf>.
- [16] D. Johnson, D. A. Maltz, Y.-C. Hu, « The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR) », IETF Internet Draft, work in progress, draft-ietf-manet-dsr-09.txt, April 2003
- [17] Yacine Khaled, Hamid Menouar, Yacine Challal « Reactive and Adaptative Protocol for Inter Vehicle Communication (RAP-IVC) » UMR-CNRS France.
- [18] Gokhan Korkmaz, Eylem Ekici, and FusunOzguner
« An Efficient Fully Ad-Hoc Multi-Hop Broadcast Protocol for Inter-Vehicular communication Systems ». Department of Electrical and Computer Engineering, The Ohio State University. 2006.
- [19] Gökhan Korkmaz. « GPS Based wireless communication protocols for Vehicular Ad-Hoc Networks Dissertation » Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in the Graduate School of the Ohio State University, B.S., M.S. The Ohio State University 2006
- [20] Sorin Paun Laurentiu « Gestion de la mobilité dans les réseaux ambiants » Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble 2005.
- [21] Tayeb Lemlouma, « Le routage dans les réseaux mobiles ad hoc » [www.opera.fr/people/TayebLemlouma/papers/AdHoc_presentation .pdf](http://www.opera.fr/people/TayebLemlouma/papers/AdHoc_presentation.pdf)
- [22] Yannick Lepage « La gestion d'un réseau sans fil » 2006 http://ateliers.aquops.qc.ca/IMG/pdf/Reseau_sans_fil.pdf
- [23] C. Lochert, H. Hartenstein, J. Tian, D. Herrmann, H. Füßler, M. Mauve, « A Routing Strategy for Vehicular Ad Hoc Networks in City Environments » , IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2003) pp. 156-161, Columbus, OH, USA, June 2003.
- [24] A. Mahajan, N. Potnis, K. Gopalan, and A.-I. A. Wang, Urban mobility models for vanets, in Proceedings of the 2nd IEEE International Workshop on Next Generation Wireless Networks, December 2006
- [25] Cyrine Merabet Modèles WiFi. www-sop.inria.fr/sloop/personnel/Cyrine.Mrabet/papiers/Mod%E8le%20WIFI3.pdf
- [26] R. Meraihi « Gestion de la qualité de service et contrôle de topologie dans les réseaux Ad Hoc » Thèse doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de

Paris, 2005.

- [27] R. Meraihi, Mohamed Senouci, Moez Djebri « Réseau mobile Ad Hoc et réseaux de capteurs sans fil » chapitre de livre Edition Hermes 2006
- [28] Hassnaa Moustafa « Routage unicast et multicast dans les réseaux mobiles Ad Hoc » Thèse doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris, 2004
- [29] A. Munaretto, H. Badis, K. Al Agha and G. Pujolle. A Link-state QoS Routing Protocol for Ad Hoc Networks. In the proceedings of IEEE MWCN2002, Stockholm, Sweden, September 2002.
- [30] Amina Naimi-Meraihi « Délai de routage dans les réseaux Ad Hoc 802.1 » Thèse doctorat. INRIA Rocquencourt 2005.
- [31] Zeyun Niu, Wenbing Yao, Qiang Ni, Yonghua Song, « DeReQ: A QoS Routing Algorithm for Multimedia Communications in Vehicular Ad Hoc Networks », Department of Electronic and Computer Engineering Brunel University, UK. 2008
- [32] C. E. Perkins and E. Belding Royer, « Ad Hoc on Demand Distance Vector (AODV) Algorithm », in Proceedings of Systems and Applications (WMCSA'99) , pp. 90-100, 1999.
- [33] C.E.Perkins, E.Belding Royer and S.Das, «Ad hoc on demand distance vector (AODV) routing ». <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>, July 2003 IETF RFC 3561.
- [34] Maxim Raya and Jean-Pierre Hubaux : « Securing vehicular ad hoc networks » Journal of Computer Security 15 (2007) 39–68 39 IOS Press.
- [35] S . Rimour, « Généralités sur les réseaux : chapitre 1 », IUT C . F département informatique mars 2002.
- [36] Amit Kumar Saha, David B.Johnson, « Modeling mobility for vehicular ad hoc Networks », Proceedings of the 1st ACM international workshop on vehicular ad hoc networks. Internatinal conference on mobile Computing and Networking, Philadelphia, USA 2004.
- [37] P Santi and D Blough, « The critical transmitting range for connectivity in sparse wireless ad hoc networks ». IEEE Transactions on Mobile Computing 2003.
- [38] Vsile Marian Scuturici, « Utilisation efficace des serveurs web en tant Que serveurs vidéo pour le applications de la vidéo à la demande », Thèse de doctorat 2001.

- [39] Fabrice Theoleyre, Fabrice Valois « Routage Hybride sur structure virtuelle dans un réseau mobile Ad Hoc » 2005
www.lsr.imag.fr/users/fabrice,theoleyre/publis/2005_05_01_01-theoleyre_valois-Cfip2005.pdf
- [40] Jérôme Vandermeerschen « Hybridation entre les modes Ad Hoc et infrastructure dans les réseaux de type Wifi-Fi » 2006 <http://code.ulb.ac.be/dbfiles/media832.pdf>
- [41] L. Wischhof, H. Rohling, « Congestion control in vehicular ad hoc networks » Dept. of Telecomm, Hamburg Univ. of Technol., Germany; Vehicular Electronics and Safety, 2005. IEEE International Conference on 14-16 Oct. 2005.
- [42] H. Wu, R. Fujimoto, R. Guensler and M. Hunter, « MDDV: A Mobility-Centric Data Dissemination Algorithm for Vehicular Networks », in Proceedings of the 1st ACM Workshop on Vehicular Ad hoc Networks (VANET 2004), pp: 47-56, Philadelphia, USA, October 2004.
- [43] J. Zhao, G. Cao, « VADD: Vehicle-Assisted Data Delivery in Vehicular Ad Hoc Networks », INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings , vol., no., pp.1-12, April 2006.
- [44] M. Zhang and R. S. « Wolff, Border Node-based Routing Protocols for VANETS in Sparse and Rural Areas », Autonet Workshop, IEEE Globecom, Washington DC, November 2007.