

---

# Analyse du trafic et du routage dans un réseau Ad Hoc de véhicules

**Muriel Mabilia, Anthony Busson, Véronique Vèque**

*Institut d'Electronique Fondamentale  
Bat 220, Université Paris-Sud, Centre Scientifique d'Orsay  
91405 cedex*

---

*RÉSUMÉ. Dans cet article, nous présentons certaines caractéristiques des réseaux ad hoc de véhicules. Nous donnons un certain nombre de résultats analytiques (taille des graphes connexes, probabilité qu'il existe un chemin entre deux véhicules) et des résultats obtenus par simulation (durée de vie d'une connexion). Ces derniers résultats sont obtenus à partir d'un modèle réaliste de trafic routier. Enfin, nous comparons deux protocoles de routage (DSR et GPSR) afin d'étudier leur comportement dans ce réseau fortement dynamique.*

*ABSTRACT. In this paper, we present some characteristics of Vehicular Ad Hoc NETWORKS (VANET). In the first part we give analytical results on the size of connected clusters and the probability that two nodes belong to the same cluster. We also use a traffic simulator to obtain the distribution of the lifetime of a connection between two vehicles. In the last section, we compare two routing protocols (DSR and GPSR) in order to study their behavior in this extremely mobile network.*

*MOTS-CLÉS : réseau Ad Hoc, routage géographique, simulation*

*KEYWORDS: Ad hoc network, geographic routing protocol, simulation*

---

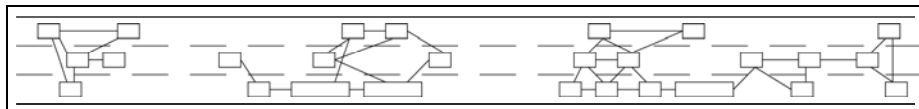
## **1. Introduction**

Les communications inter-véhicules deviennent un sujet majeur. En effet, les applications sont nombreuses tant pour améliorer la sécurité routière que pour communiquer via l'Internet. Les solutions sont généralement basées sur un fonctionnement ad-hoc, c'est-à-dire que les voitures n'utilisent pas d'infrastructure pour communiquer mais les liaisons sans fil des autres voitures pour atteindre un destinataire qui n'est pas à portée radio. Les spécificités topologiques de ce type de réseau font que les communications longue distance (plusieurs kilomètres) sont très difficiles. Aussi, ce réseau ad hoc est souvent complété par une partie infrastructure constituant un réseau hybride. Ainsi, des bornes d'accès reliées par un réseau filaire sont déployées le long des routes et permettent l'accès à Internet et aux services offerts par le réseau d'infrastructure. Le réseau Ad Hoc permet d'assurer la continuité d'accès au réseau et de couvrir l'intégralité de la voie. Localement, les communications inter-véhicules peuvent, par exemple, remonter des alarmes de sécurité jusqu'aux véhicules à proximité. Nous nous sommes principalement intéressés à la partie Ad Hoc du réseau. Par rapport à un réseau Ad Hoc statique, les véhicules sont des noeuds très mobiles et on parle de réseau fortement dynamique. Le réseau est souvent non connexe c'est-à-dire qu'à un instant donné, il n'existe pas de route disponible entre une source et une destination. La topologie des routes et le mouvement très particulier des véhicules font que les modèles de mobilité usuellement utilisés (aléatoires dans le plan) sont inadéquats dans ce contexte. De même, la plupart des protocoles de routage définis dans le cadre du groupe MANET de l'IETF sont inefficaces dans ce contexte tant la mobilité des noeuds est forte. Cet article comporte deux parties. La première au paragraphe 2 traite des spécificités topologiques de ce type de réseau. Nous donnons la probabilité d'existence d'un chemin entre deux véhicules. Il s'agit d'un résultat analytique obtenu à partir de la représentation spatiale des voitures. Ce résultat peut permettre de dimensionner un réseau hybride. Nous nous intéressons également aux temps de vie des connexions, et à d'autres quantités statistiques qui permettent de cerner les applications qui pourront être mis en pratique. Pour ces quantités, il faut prendre en compte la dynamique du réseau, la façon dont les véhicules bougent les uns par rapport aux autres. Pour modéliser de manière réaliste le trafic routier nous utilisons un modèle microscopique de trafic décrit au paragraphe 3.2. Nous considérons ce trafic sur une autoroute pour un seul sens et sans intersection. Dans la seconde partie (paragraphe 3), nous nous intéressons aux comportements des protocoles de routage dans ces réseaux. Nous comparons les deux protocoles les plus à mêmes de fonctionner : DSR et GPSR. Une discussion sur la comparaison avec les travaux existants et sur les implications de nos résultats est menée dans la dernière partie au paragraphe 4.

## **2. Caractéristiques du réseau de véhicules**

### **2.1. Analyse**

Dans cette partie, nous nous intéressons aux caractéristiques topologiques du réseau ad hoc de véhicules. L'une des caractéristiques du graphe représentant les liens

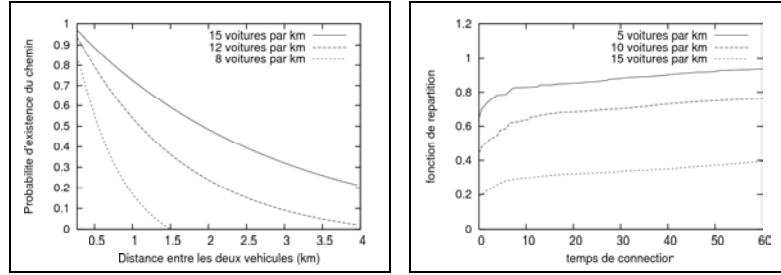


**Figure 1.** Exemple de réseau fragmenté sur une autoroute à 3 voies.

radio entre les véhicules est qu'il est très fragmenté. En effet, le graphe est constitué de "grappes" de noeuds connexes mais il n'existe pas de chemin entre ces grappes. Les communications sont alors uniquement possibles entre les voitures d'une même grappe. On a représenté un exemple de réseau sur la figure 2.1 sur une autoroute à 3 voies. Les traits noirs représentent les liens bidirectionnels entre les véhicules. Les processus habituellement utilisés pour modéliser la position des voitures sur une autoroute sont généralement des processus déterministes, des processus de Poisson ou des processus plus complexes mais encore basés sur des processus de Poisson [GAZ 02, BAI 94]. L'utilisation de ces processus dépend de la précision que l'on souhaite, de l'environnement (ville, autoroute, etc.) et de la densité du trafic. En effet, des modèles différents sont utilisés selon que le trafic est très dense (on est alors proche de l'embouteillage) ou qu'il est faible. Dans le cas où l'on a des densités faibles, les véhicules sont assez éloignés et les comportements individuels des conducteurs sont indépendants les uns des autres, vérifiant ainsi les propriétés des processus de Poisson. Quant au trafic urbain, il demande des processus plus complexes dus à sa topologie et aux corrélations spatiales plus fortes qui existent entre les véhicules, créées par exemple par les feux ou les croisements. Dans ce premier paragraphe, nous considérons que les voitures sont distribuées suivant un processus de Poisson. Ceci est proche de la réalité pour la situation que l'on considère : autoroute et trafic fluide. Si l'on suppose que la portée radio des véhicules est nettement plus grande que la largeur de l'autoroute alors on peut modéliser l'ensemble des véhicules par un processus de Poisson sur la ligne. L'intensité du processus est notée  $\lambda$  et peut être interprétée comme le nombre moyen de véhicules par kilomètre sur l'ensemble des voies. On suppose que la portée radio des véhicules est constante et égale à  $R > 0$  ( $R = 250$  mètres dans cet article) pour tous les véhicules. Ce modèle a été largement étudié [HAL 98]. Si on fait l'analogie avec les files d'attente, la longueur d'une grappe correspond à la période d'occupation des serveurs dans une file  $M/D/\infty$ . On sait par exemple que la probabilité d'avoir  $k$  ( $k \in \mathbb{N}^*$ ) noeuds dans une grappe est égale à  $k * (1 - \exp\{-\lambda R\})^{k-1} \exp\{-2\lambda R\}$ . La taille moyenne d'une grappe est alors  $2 \exp\{\lambda R\} - 1$ . De même, nous connaissons la loi de la longueur d'un cluster ([HAL 98] théorème 2.1 page 88).

On peut en déduire la probabilité  $p$  que deux véhicules à distance  $d$  soient connectés :

$$p = 1 \text{ si } d < R \text{ et } p = 1 - \exp\{-\lambda R\} - \int_R^d f(x)dx \text{ pour } d > R \text{ avec}$$



(a) Probabilité qu'il existe un chemin (b) Fonction de répartition de la durée de vie d'une connexion entre deux véhicules en fonction de la distance.

**Figure 2.** Probabilité d'existence d'un chemin et durée de vie des connexions

$$f(x) = \frac{\lambda}{\exp\{R\lambda\} - 1} \left[ 1 + \sum_{j=1}^{\lfloor \frac{x}{R} \rfloor} \frac{(-1)^j}{j!} (\lambda(x - (j+1)R))^{j-1} \times \exp\{-jR\lambda\} (\lambda(x - (j+1)R) + j) \right]$$

Sur la figure 2(a), nous traçons cette probabilité en fonction de la distance qui sépare les deux véhicules. Sans surprise, il apparaît que cette probabilité diminue avec la distance et augmente avec la densité. Cette distribution peut nous permettre de dimensionner un réseau hybride en termes de nombre de bornes et d'écart entre elles. Les distances entre ces bornes sont calculées de manière à ce que la probabilité qu'un véhicule ne puisse pas accéder à une borne par le réseau Ad Hoc soit inférieure à une certaine valeur.

## 2.2. Statistiques

Cependant, le modèle précédent ne permet pas de prendre en compte la dynamique du réseau. Par exemple, il est intéressant d'évaluer la durée pendant laquelle deux voitures appartiennent à la même grappe, afin de savoir si des applications nécessitant des connexions de longue durée peuvent être envisagées dans ce type de réseau. Pour obtenir ces statistiques, nous utilisons le simulateur décrit au paragraphe 3.2. Il s'agit d'un simulateur qui reproduit de manière fidèle le trafic routier sur une autoroute.

Nous définissons la durée de vie d'une connexion comme le délai durant lequel deux voitures appartiennent à la même grappe ou bien de manière équivalente le temps durant lequel il existe un chemin entre deux voitures. Sur la figure 2(b), nous traçons la fonction de répartition ( $\mathbb{P}(\text{durée de vie} \leq t)$ ) qui représente la proportion de fois où la durée de vie du chemin n'a pas dépassé  $t$  de la durée de vie d'une connexion. Ces statistiques sont obtenues pour une autoroute à 3 files avec respectivement, 5, 10 et 15 voitures par file et par kilomètre (en moyenne). Pour la sélection des deux voitures,

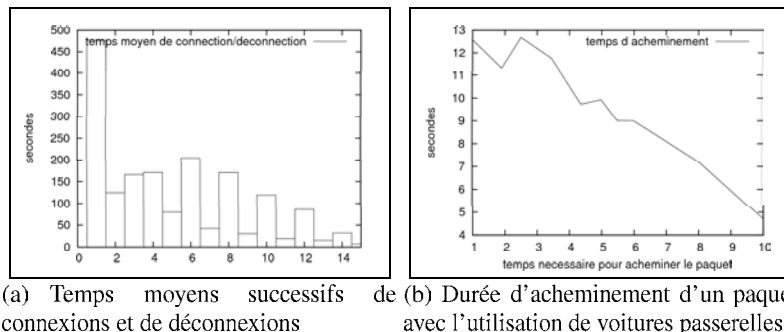
nous choisissons une première voiture aléatoirement puis nous prenons la voiture qui est juste devant sur une file voisine. Bien-sûr, on note que plus le trafic est dense, plus grand sera le temps durant lequel il existe un chemin entre les deux véhicules.

Moins intuitivement, on voit que la distribution de cette durée a des propriétés qui semblent proches des distributions à queues lourdes ; ce qui confirmerait ce qui a été trouvé dans [M.M 04, WAN 04]. Par exemple, pour la densité la plus faible, 70% des connexions durent moins d'une seconde. Par contre, il existe une proportion non négligeable (7%) de connexions de plus de 1 minute et même 0,2% de connexions qui durent plus de 15 minutes.

La durée de vie qui est considérée en générale dans la littérature [M.M 04, WAN 04, ESK 04] fait référence à la durée de vie du chemin jusqu'à la première coupure, c'est à dire au premier instant où les deux véhicules n'appartiennent plus à la même grappe. Cette quantité peut être trompeuse dans la mesure où le temps de déconnexion qui suit peut être extrêmement court et donc finalement peu pénalisant. Nous avons mesuré les temps moyens successifs durant lesquels deux voitures étaient connectées puis déconnectées. Le nombre moyen de véhicules par kilomètre et par file est de 5 et la durée de la simulation est d'une heure. Précisément, nous choisissons deux voitures l'une derrière l'autre comme précédemment mais sur des files différentes, puis nous calculons la moyenne sur 1000 échantillons du temps durant lequel il existe un chemin jusqu'à la première coupure. Nous mesurons alors le temps durant lequel il n'existe pas de chemin et ainsi de suite. Sur la figure 3(a), les barres impaires correspondent aux durées de vies successives des périodes durant lesquelles il existe un chemin et les barres paires aux temps durant lesquels il n'existe pas de chemin. Du fait que les deux véhicules étaient choisis initialement très proches l'un de l'autre, les voitures sont initialement connectées durant une longue période d'environ 470 secondes. Mais la première déconnexion dure en moyenne 120 secondes. Les temps de connexion et de déconnexion se succèdent alors et décroissent en moyenne lentement. On notera que les temps durant lesquels les voitures sont déconnectées sont alors plus longs que les périodes durant lesquelles elles sont connectées. Pour les autres intensités, que nous ne présentons pas ici par manque de places, les valeurs sont différentes mais ces résultats restent quantitativement valides : les temps de déconnexion sont plus longs que les temps de connexion (excepté pour le premier) et ils sont assez longs (de l'ordre de la minute). Nous pensons que cette longue période de déconnexion limite les applications qui peuvent être utilisés dans ces réseaux ad hoc de véhicules. Il existe plusieurs solutions qui permettent de palier ce problème de fragmentation du réseau :

1) Utiliser un réseau hybride où des bornes permettent alors d'interconnecter les fragments de réseau.

2) Utiliser des voitures passerelles qui gardent temporairement les paquets de données en attendant de trouver un chemin à la destination. L'intérêt est que l'on n'a pas à attendre que ce soit la source elle-même qui atteigne la grappe de la destination mais une des voitures passerelles.



**Figure 3.** Deux quantités statistiques

Cette dernière solution a été proposée pour palier les problèmes de connectivité dans les réseaux fortement mobiles. Il existe plusieurs approches permettant de sélectionner les passerelles. Des algorithmes de sélection pour les réseaux ad hoc mobiles ont été proposés dans [VAH, G.A 05]. Nous avons cherché à savoir si cette approche pouvait constituer une solution contre la fragmentation. Une telle étude a déjà été menée dans [CHE 01] mais les véhicules choisis étaient distants d'au moins 10 kilomètres. Avec ces distances, les communications inter-véhicules sont pratiquement impossibles.

Nous reprenons les mêmes hypothèses que précédemment, lors de la première déconnexion entre les deux véhicules nous supposons qu'un paquet de données est instantanément diffusé à toutes les voitures atteignables. Toutes les voitures qui ont le paquet le redistribuent alors de la même manière dès qu'elles croisent une voiture qui ne l'a pas encore. Nous mesurons alors le délai qu'il faut pour atteindre la destination. Ce délai est alors une borne inférieure au délai nécessaire pour atteindre la destination lorsque des passerelles sont utilisées. Sur la figure 3(b), nous avons tracé ces délais en fonction du nombre de véhicules par voie et par kilomètre (avec 3 voies). Les délais décroissent avec la densité des véhicules. Il y a une amélioration nette du délai pour atteindre la destination. Par exemple, avec une densité de 5 véh/km/voie, le temps de la première déconnexion est en moyenne de 120 secondes (voir figure 3(a)) et seulement de 10 secondes avec l'utilisation des relais (cas optimiste). Cependant, ce délai varie toujours autour de 10 secondes, ce qui n'est compatible qu'avec certaines applications. De plus, ceci est inenvisageable dès que le trafic est important, l'ensemble des paquets émis durant ces 10 secondes peuvent remplir les buffers des passerelles surtout s'il y a plusieurs sources.

### 3. Routage dans les réseaux Ad Hoc de véhicules

Dans cette deuxième partie, nous nous intéressons aux comportements des protocoles de routage dans ces réseaux de véhicules. Nous comparons les deux protocoles les plus à même de fonctionner : DSR et GPSR. Ils sont plus efficaces car moins sen-

sibles aux changements topologiques fréquents. Des études du même type ont déjà été effectuées dans [Füß 02b, Füß 02a, HAR 03] mais peu de résultats ont été publiés et un certain nombre de paramètres ne sont pas donnés ou nous semblent peu réalistes.

### 3.1. DSR et GPSR

Le protocole DSR (Dynamic Source Routing [JOH 04]) est un protocole de routage pour les réseaux ad hoc. Il est de type réactif et utilise un routage à la source. Une route est construite lorsque la destination n'est pas dans la table du noeud émetteur. Il utilise alors deux mécanismes principaux : *Route Discovery* et *Route Maintenance*. La découverte de route est utilisée lorsqu'on ne possède pas de route vers le destinataire et consiste à construire une nouvelle route. La source diffuse dans le réseau une requête de recherche de route (RREQ). Lorsque le destinataire reçoit la requête, il envoie une Route Reply qui contient la liste des noeuds traversés par la requête. L'initiateur mettra sa table à jour à réception de RREPLY. Afin d'améliorer les performances, les noeuds intermédiaires peuvent recopier dans leur cache la liste d'adresses contenues dans un message Route Reply ainsi que celle transportée par les paquets de données.

GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) [KAR 00] est un algorithme de routage géographique proactif qui utilise la position des noeuds en plus de la destination pour décider du prochain noeud auquel retransmettre le paquet. Par défaut, un noeud GPSR utilise le mode *glouton* et retransmet le paquet à son voisin le plus proche de la destination. La connaissance de ses voisins se fait par diffusion périodique de messages *Hello* contenant l'adresse du noeud et sa position (x,y). Dans les réseaux fortement dynamiques, la fréquence de ces *Hello*s a un impact important sur la pertinence de la liste des voisins. Dans les simulations, nous comparerons donc deux versions de GPSR avec des *Hello*s échangés toutes les 0,5 et 1,5 secondes. Lorsque le noeud n'a pas de voisins immédiats dans la direction du destinataire, il utilise le mode *perimeter* décrit dans [KAR 00].

### 3.2. Simulateur de trafic et simulateur réseau

Afin d'obtenir des trajectoires proches de celles des automobiles, nous utilisons un simulateur de trafic que nous avons codé en C. Celui-ci consiste, pour chaque noeud, à reproduire le comportement type d'un automobiliste. Un automobiliste aura un comportement qui dépendra de son environnement (vitesse, distance avec la voiture de devant, etc.). A chaque véhicule est associée une vitesse cible qui est la vitesse à laquelle le conducteur roulerait s'il était tout seul sur sa voie. S'il est effectivement tout seul, il adapte son accélération pour atteindre cette vitesse cible. S'il n'est pas seul, il va adapter sa vitesse à son environnement, et en particulier à la vitesse de la voiture juste devant. Enfin, si l'automobiliste n'est pas content de sa file, et si une file voisine semble lui offrir un meilleur environnement, alors il a la possibilité de changer de file. Toutes ces décisions sont des fonctions de l'environnement auxquelles on introduit une composante aléatoire permettant de modéliser le fait que deux conducteurs dans deux situations égales n'ont pas forcément les mêmes réactions. Le modèle que l'on utilise pour notre simulateur est présenté de manière très précise dans [AHM 99]. Il

existe déjà de nombreux simulateurs de ce type, commerciaux [VIS] ou libres [COR], mais nous avons choisi de coder notre propre simulateur pour avoir un contrôle total sur les paramètres, pour pouvoir faire des statistiques efficaces (traitement des données au sein du simulateur) et pour générer une sortie des résultats que l'on peut introduire directement dans le simulateur NS (décrit ci-dessous).

Les simulations ont été réalisées avec l'outil `ns-2` (Network Simulator) dans sa version 6, qui fournit une implémentation de DSR et GPSR. Chaque véhicule transmet grâce à un lien radio 802.11 de débit égal à 2 Mbit/s avec une portée radio de 250 mètres.

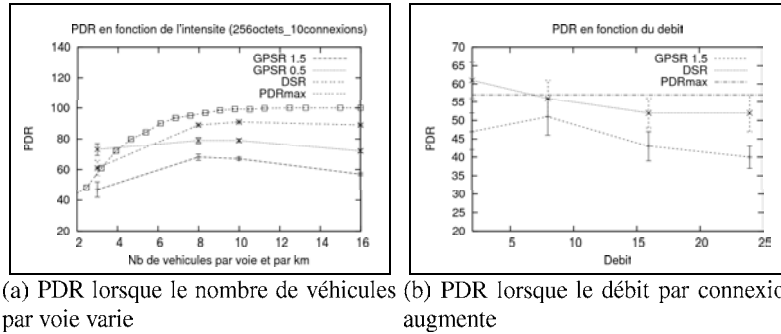
Nous avons choisi comme modèle de propagation le "Two-Ray ground reflection model", qui prend en compte, le chemin direct et la réflexion du sol. Nous utilisons le simulateur de trafic pour générer le mouvement des noeuds. La position des noeuds et leur vitesse sont alors introduits dans NS. L'environnement simulé est une autoroute de 14 km comportant 3 voies (un seul sens est pris en compte). Lorsque l'intensité ne varie pas, le nombre moyen de véhicules par voie est de 3. Lorsque le débit ne varie pas, il est égal à 2Kbit/s pour chaque connexion. Il s'agit d'un trafic CBR (*Constant Bit Rate*). Les paquets ont une taille de 256 octets. Pour établir les connexions entre les voitures, nous choisissons des voitures au hasard dans les deux premiers kilomètres de l'autoroute. Chaque point des figures est obtenu comme la moyenne de 50 simulations. Chaque échantillon correspond à une simulation d'une durée de 150 secondes. Sur l'ensemble des graphiques, les barres verticales correspondent à un intervalle de confiance à 95%.

### 3.3. Comparaison de DSR et GPSR

Dans un premier temps, nous observons le PDR (*Packet Delivery Ratio*) qui est défini comme le rapport du nombre de paquets reçus sur le nombre de paquets envoyés. Les pertes de paquets peuvent être produites parce que il n'existe pas de chemin ou bien à cause d'une erreur du protocole de routage. Dans DSR, certaines erreurs sont dues au délai introduit par la découverte de chemin et par le temps nécessaire à la découverte d'un nouveau chemin lorsque l'ancien est devenu invalide. Dans GPSR, certaines erreurs sont dues au fait que la liste des voisins d'un noeud est obsolète. Enfin, pour les deux protocoles, il y a les erreurs consécutives à la congestion du réseau et aux collisions.

La figure 4(a) représente le PDR en fonction de l'intensité des voitures c'est-à-dire du nombre de véhicules par kilomètre et par voie. Afin de dissocier les pertes dues à la topologie (il n'existe pas de route) de celles dues au protocole de routage, nous avons tracé sur cette même figure la probabilité (obtenue à partir du simulateur de trafic) qu'il existe une route entre deux véhicules (choisis dans les mêmes conditions que pour les simulations NS). Cette courbe représente le maximum que le PDR peut atteindre tous





**Figure 4.** Packet Delivery Ratio *en fonction de l'intensité et du débit*

protocoles de routage confondus. Il apparaît que DSR offre des performances assez proches de ce maximum et qu'il est meilleur par rapport à GPSR<sup>1</sup>.

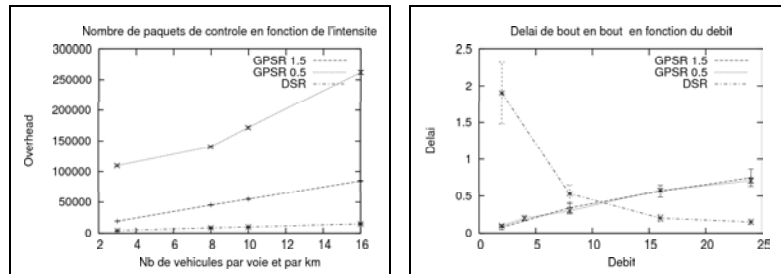
Sur la figure 4(b), nous avons tracé le PDR en fonction du débit des connexions. Le PDR diminue avec le débit pour les deux protocoles. Pourtant, la somme des débits pour l'ensemble des 25 connexions ne dépasse pas 250 Kbit/s. Ce résultat s'explique par deux phénomènes que nous avons vérifié sur les traces NS. Nous utilisons ici des paquets très courts (de 256 octets) ce qui génère un grand nombre de paquets et diminue les performances au niveau 2 (backoff, collisions, etc.). L'étroitesse du réseau (la largeur de l'autoroute) fait que tous les noeuds entre une source et une destination reçoivent les paquets ce qui génère des goulots d'étranglements importants.

La figure 5(a) caractérise l'overhead généré par chacun des protocoles de routage, overhead qui croît avec la charge. Sur la figure 5(a), on constate que la périodicité des messages Hello dans GPSR influe grandement l'overhead. Logiquement, le nombre de paquets de contrôle augmente avec le nombre de noeuds (véhicules) dans le réseau. Les courbes montrent la supériorité de DSR dont le nombre de messages de routage est de l'ordre de 8000 pour 8 véhicules/km/voie.

#### 4. Discussion

Nous pensons que les résultats présentés dans cet article ont mis en avant deux points. Le premier illustre au travers de nouvelles conditions de simulation et au travers de nouvelles quantités statistiques qu'il est très difficile de garantir aux applications des connexions de longue durée (même de l'ordre de la minute) ainsi que des communications qui font intervenir des véhicules source et destination éloignés l'un de l'autre. Pour les applications de sécurité routière de type diffusion d'alarme ce

1. On notera que l'un des points (pour GPSR) est supérieure au PDR maximum. Ceci est dû au fait que la courbe du PDRmax est calculé comme la moyenne de 50000 échantillons et que celle de GPSR est obtenu avec 50 échantillons. Les voitures des 50 échantillons étaient alors plus connectés que la moyenne.



(a) Nombre de paquets de contrôle lorsque le nombre de véhicules par voie par connexion augmente  
(b) Délai de bout en bout lorsque le débit varie

**Figure 5.** Packet Delivery Ratio et délai de bout en bout.

n'est pas réellement problématique. Par contre, pour toutes les applications de type téléphonie, accès à Internet, diffusion d'informations routières sur l'état du trafic ou publicitaires (restaurants, hôtels, stations services aux alentours, etc.), une infrastructure hybride semble s'imposer pour assurer la continuité de service. Pour ce dernier, nous avons proposé des pistes de dimensionnement.

Pour les communications unicast, nous avons comparé DSR et GPSR. Les études précédentes [Füß 02b, Füß 02a] ont montré que GPSR offrait de meilleurs résultats surtout en terme de PDR. Le fait que *les protocoles de routage géographiques soient meilleurs que les protocoles réactifs dans les réseaux de véhicules* est généralement admis dans l'ensemble de la littérature. Mais les résultats présentés dans l'article de référence [Füß 02b] ne sont pas conformes à la réalité et sont très discutables. Les auteurs trouvent un PDR de 100% pour GPSR quelque soit la fréquence des HELLOs utilisées. Ceci peut être dû au fait que dans cet article, ils considèrent uniquement des échantillons de trafic où les voitures sont connectées durant toute la durée de la simulation. Ce qui est en pratique assez rare. Récemment, dans [DON 04], les problèmes induits par GPSR ont été inventoriés et sont principalement causés par la forte mobilité des noeuds du réseau. Nous les retrouvons effectivement dans nos simulations et nous les expliquons afin de justifier la supériorité de DSR sur GPSR. La première cause d'erreurs vient du déplacement des noeuds rendant la liste des voisins obsolète. La deuxième cause (la plus importante dans nos simulations) est due au fait que la destination bouge alors que sa position connue de l'émetteur est initialisée et portée dans le paquet de données à l'émission du paquet et reste inchangée jusqu'à atteindre la destination. Si la destination a bougé par rapport à sa position initiale, GPSR peut ne pas trouver de chemin même si celui-ci existe. Par exemple, imaginons qu'un noeud A se trouve plus proche de la position initiale de la destination (à l'émission du paquet) que la destination elle-même. C'est ce noeud A qui recevra le paquet et qui cherchera un voisin plus proche de la position initiale, sans même chercher à savoir si la destination se trouve à portée radio. Dans ce cas, le paquet n'atteindra jamais la destination. Ces deux causes font que dans nos simulations, DSR est meilleur que GPSR.

Ceci ne veut pas dire que les protocoles réactifs avec découverte de chemin sont meilleurs que les protocoles géographiques. Des versions différentes de protocole géographique qui résolvent les problèmes mentionnés ci-dessus ont été proposées [DON 04]. Nous pensons qu'elles seraient adaptées à un réseau de véhicules.

Nous pensons qu'un protocole de routage géographique qui n'utiliserait pas de liste de voisins comme décrit dans [H.F 03] permettrait de palier à ces deux problèmes. C'est donc le voisin le plus proche de la destination qui diffuse le paquet en premier, les autres noeuds qui reçoivent ce paquet annulent alors leur propre transmission. L'intérêt de ce mécanisme est qu'il n'y a plus de paquets de contrôle donc moins de congestion et qu'il n'y a pas d'erreur dues aux listes de voisins obsolètes. Une autre piste est d'améliorer GPSR par une évaluation dynamique de la position de la destination et des voisins [H.F 03, DON 04]. Certains de ces mécanismes n'ont pas été testés dans le contexte des réseaux de véhicules. Aussi, nous projetons d'évaluer les performances de ce protocole et de le comparer aux protocoles existants et à DSR (éventuellement optimisé pour les réseaux de véhicules) car il nous semble que finalement, il n'est pas aussi clair que les protocoles géographiques soit meilleurs que les protocoles réactifs avec découverte de chemin.

## 5. Conclusion

Dans cet article, nous avons modélisé un réseau ad hoc de véhicules en appliquant des résultats existants sur les processus de couverture. D'autres statistiques, prenant en compte une composante temporelle ont été obtenues par simulation. Enfin, une comparaison de deux protocoles de routage a été effectuée dans ce contexte de réseau de véhicules. Nous avons observé un PDR (*Packet Delivery Ratio*) assez faible pour ce réseau de véhicules en raison, entre autres, de la fragmentation du réseau. Une comparaison de DSR et GPSR a montré que le protocole réactif offrait de meilleures performances que le protocole géographique. DSR n'offre pas seulement un overhead très faible mais présente aussi un meilleur taux de réception de paquets. Par contre, le délai est toujours meilleur avec GPSR et quelque soit les conditions de trafic. L'explication de nos résultats provient de problèmes induits par la mobilité des noeuds dans le protocole GPSR qui conduisent à des erreurs de routage et à des pertes de paquets. De nouveaux protocoles pallient ces inconvénients et seront étudiés dans un contexte de véhicules très prochainement.

## 6. Bibliographie

- [AHM 99] AHMED K. I., « Modeling Drivers' Acceleration and Lane Changing Behavior », Doctor of Science in Transportation Systems, Massachusetts Institute of Technology, Boston (MA), 1999.
- [BAI 94] BAILEY S., BEZ R., « A parametric study of traffic load effects in medium span bridges », *In : Developments in Short and Medium Span Bridge Engineering '94, The Canadian Society for Civil Engineering, 1994, (pp. 503-514).*, San Diego, CA, USA, 1994.
- [CHE 01] CHEN Z. D., KUNG H., VLAH D., « Ad hoc relay wireless networks over moving vehicles on highways », *MobiHoc '01 : Proceedings of the 2nd ACM international sympo-*

*sium on Mobile ad hoc networking & computing*, New York, NY, USA, 2001, ACM Press, p. 247–250.

- [COR] « CORSIM User Manual, Version 1.01, The Federal Highway Administration, US Department of Transportation ».
- [DON 04] DONGKIN SON AHMED HELMY B. K., « The effect of mobility induced location errors on geographic routing in mobile ad hoc and sensor networks : analysis and improvement using mobility prediction », *IEEE Transactions on mobile computing*, vol. 3, n° 3, 2004, p. 233 - 245.
- [ESK 04] ESKANDARIAN J. B. A., HOFFMAN L., « Challenges of Intervehicle Ad Hoc Networks », *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*, vol. 5, n° 1, 2004, p. 347-351.
- [Füß 02a] FÜSSLER H., MAUVE M., HARTENSTEIN H., KÄSEMANN M., VOLLMER D., « A Comparison of Routing Strategies for Vehicular Ad Hoc Networks », rapport n° TR-02-003, July 2002, Department of Computer Science, University of Mannheim.
- [Füß 02b] FÜSSLER H., MAUVE M., HARTENSTEIN H., KÄSEMANN M., VOLLMER D., « Poster : Location-Based Routing for Vehicular Ad-Hoc Networks », *Proc. of ACM MobiCom '02 (electronic edition)*, September 2002.
- [G.A 05] G. ALLARD P. JACQUET B. M., « Routing in Extremely Mobile Networks », *Fourth Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop, île de Porquerolles, France*, 2005.
- [GAZ 02] GAZIS D. C., *Traffic Theory*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [HAL 98] HALL P., *Introduction to the Theory of Coverage Processes*, John Wiley and Sons, 1998.
- [HAR 03] HARTENSTEIN H., FÜSSLER H., MAUVE M., FRANZ W., « Simulation Results and Proof-of-Concept Implementation of the FleetNet Position-Based Router », *Proc. of Eighth International Conference on Personal Wireless Communications (PWC '03)*, Venice, (Italy), 2003, p. 192–197.
- [H.F 03] H. FÜSSLER J. WIDMER M. M., « Beaconless Position-Based Routing for Mobile Ad-Hoc Networks », rapport n° TR-03-001, 2003, Department of Computer Science, University of Mannheim.
- [JOH 04] JOHNSON D. B., MALTZ D. A., HU Y.-C., « The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR) », July 2004, Internet-Draft, `draft-ietf-manet-dsr-10.txt`.
- [KAR 00] KARP B., KUNG H. T., « GPSR : Greedy Perimeter Stateless Routing for wireless networks », *Proc. of 6th ACM/IEEE Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000)*, 2000, p. 243–254.
- [M.M 04] M.M. ARTIMY W. R., PHILLIPS W. J., « Connectivity in inter-vehicle ad hoc networks », *Engineering Canadian Conference on Electrical and Computer*, vol. 1, 2004.
- [VAH ] VAHDAT A., BECKER D., « Epidemic routing for partially-connected ad networks », rapport.
- [VIS] « VISSIM 3.60 User Manual, PTV Planung Transport Verkehr AG company ».
- [WAN 04] WANG S. Y., « Predicting the lifetime of repairable unicast routing paths in vehicle-formed mobile ad hoc networks on highways », *PIMRC 2004, 15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 4, n° 1, 2004, p. 2815-2819.