

Chapitre

Communications véhicule à véhicule: applications et perspectives

1. Introduction

L'objectif de l'intelligence ambiante est de créer un espace quotidien intelligent, immédiat d'utilisation, intégré dans les murs de nos maisons, dans nos bureaux, dans nos routes, dans nos voitures..., en somme partout. Ce nouveau concept doit être invisible, il doit en effet se fondre dans notre environnement quotidien et doit être présent au moment où nous en avons besoin.

Une des applications de ce concept consiste 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.) et de rendre le temps passé sur les routes plus conviviale (accès à l'Internet, jeux en réseau, aider deux personnes à se suivre sur la route, groupe de discussion dans un embouteillage, etc.). Cette application est l'exemple type de ce qu'on appelle les systèmes de transport intelligents (ITS, Intelligent Transportation System) et dont le but est d'améliorer la sécurité, l'efficacité et la convivialité dans les transports routiers au travers de l'utilisation des nouvelles technologies d'information et de communication (NTIC).

Les systèmes de gestion de trafic 'conventionnels' sont basés sur des infrastructures centralisées où des caméras et des capteurs implantés sur la route collectent des informations sur la densité et l'état du trafic et transmettent ces

Chapitre rédigé par Rabah MERAIHI, Sidi-Mohammed SENOUCI,
Diamal-Eddine MEDDOUR et Moez JERBI.

données à une unité centrale pour les traiter et prendre les décisions adéquates. De tels systèmes exhibent un coût de déploiement assez important et se caractérisent par un temps de réaction long pour le traitement et le transfert des informations, dans un contexte où le délai de transmission de l'information est vital et revêt d'une importance majeure dans ce type de systèmes. De plus, les équipements mis en place sur les routes nécessitent une maintenance périodique et chère. Par conséquent, pour un large déploiement d'un tel système un important investissement dans l'infrastructure de communication et de capteurs est nécessaire. Cependant, avec le développement rapide des technologies de communications sans fil, des systèmes de localisation et de collecte d'information via les capteurs, une nouvelle architecture décentralisée (ou semi-centralisée) 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 s'appuie sur un système distribué et autonome et est formé par les véhicules eux même sans l'appui d'une infrastructure fixe pour le relayage des données et des messages. On parle dans ce cas d'un réseau ad hoc de véhicules (VANET, Vehicle Ad hoc NETWORK), qui n'est autre qu'une application dédiée et spécifique des réseaux ad hoc mobiles conventionnels (MANET, Mobile Ad hoc NETWORK)¹. Un exemple de réseau VANET urbain est illustré dans la figure suivante.



Figure 1. Exemple de réseau VANET [KOS 05].

Dans ce chapitre nous nous intéressons à l'étude de la principale composante des systèmes ITS qui est la communication inter-véhicules (IVC, Inter Vehicle Communication) ainsi qu'aux services associés. Pour les services dits de sécurité routière, des informations sur des dangers potentiels (conditions météorologiques, état de la route, état opérationnel d'un véhicule, etc.) pourront être échangées entre

¹ Un réseau mobile ad hoc (MANET) est un système autonome composé de stations mobiles interconnectées par des liens sans fil sans l'administration d'une infrastructure centralisée. Suivant les communications existantes dans le réseau, les stations (ou nœuds) mobiles peuvent jouer le rôle de routeur pour relayer les données.

des véhicules pour informer les conducteurs en temps réel. Les exemples de services ne se limitent pas seulement aux applications de sécurité routière mais d'autres types d'applications notamment de confort (accès mobile à l'Internet, convoi de voitures, jeux, etc.) offrent des perspectives intéressantes pour les opérateurs de télécoms qui cherchent de nouvelles niches de services. Le reste du chapitre est organisé comme suit: dans la partie 2 nous présentons une description détaillée des caractéristiques, des spécificités et des applications diverses des communications véhiculaires. Outre une présentation des projets existants dans ce domaine, la partie 3 traitera de l'état de l'art et de l'étude des travaux de recherche proposés dans la littérature pour faire face à la dynamique et aux contraintes liées aux réseaux de véhicules. Les problématiques suivantes seront en particulier discutées, à savoir : le routage, la dissémination de données, les modèles de mobilité, la couche d'accès au médium et la sécurité. La partie 4 conclura le chapitre.

2. Propriétés et applications

2.1. Propriétés des réseaux VANET

Faisant partie intégrante d'un système ITS, les communications inter-véhicules brassent les technologies et les disciplines suivantes, comme représenté dans la Figure 2 :

- Collecte d'information et perception de l'environnement proche : en utilisant différents capteurs (conditions météorologiques, état de la route, état de la voiture, pollution et autres) et des caméras, le conducteur peut à bord de son véhicule disposer d'un certain nombre d'informations et d'une meilleure visibilité lui permettant ainsi de réagir d'une manière adéquate aux changements de son environnement proche;

- Traitement (*Processing*) : avec une grande capacité de traitement à bord, les véhicules de nos jours sont dotés d'intelligence et sont capables d'*interpréter* les informations collectées pour ensuite aider le conducteur à prendre une décision (particulièrement dans les systèmes d'aide à la conduite);

- Stockage : un grand espace de stockage est nécessaire dans ce contexte afin de disposer des différentes classes et types d'information. Ces structures de données seront alimentées et mises à jour en fonction des événements et décisions du système de communication. A noter que dans un réseau de véhicules, l'énergie et l'espace de stockage sont suffisamment disponibles;

- Routage et communication : pour l'échange et la diffusion d'information dans le réseau lui-même ou vers d'autres types de réseaux (IP ou cellulaire par exemple). Ce qui permet ainsi d'augmenter le périmètre de précaution grâce à une perception étendue de l'environnement et ainsi une meilleure anticipation des difficultés de conduite.

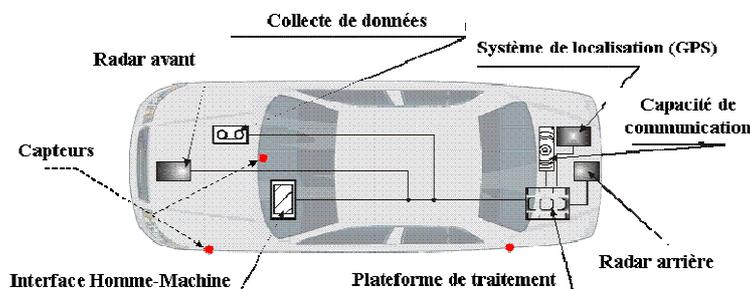


Figure 2. Voiture Intelligente [HUB 05].

Ces différentes technologies sont présentes dans l'ensemble des environnements où la technologie IVC peut être mise en application. Néanmoins, suivant les domaines d'application, les environnements concernés et leur caractéristiques peuvent différer: espace libre, rural, semi-urbain, urbain, tunnels; les propriétés de communications sans fil comme la portée et la capacité peuvent être également contrastées. Sur le plan d'architecture, un système de communication inter-véhicules peut être soit : ad hoc véhicule-à-véhicule pur, ou bien hybride pour servir éventuellement de passerelle vers d'autres réseaux et services.

Comme mentionné précédemment, un réseau VANET représente un cas d'application particulier des réseaux MANET. Néanmoins, les travaux de recherche étudiés et réalisés dans le domaine des MANET ne peuvent pas être directement appliqués dans le contexte des réseaux de véhicules vu quelques spécificités des réseaux VANET qui rendent l'application des protocoles et architectures des réseaux ad hoc inadaptée. Dans ce qui suit nous présentons quelques propriétés et contraintes liées à l'environnement des réseaux de véhicules qui les distinguent des réseaux ad hoc :

- Capacité de traitement, d'énergie et de communication : contrairement au contexte des réseaux ad hoc mobiles où la contrainte d'énergie, à titre d'exemple, représente une des problématiques traitées dans la littérature, 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 (Wi-Fi, Bluetooth [BLE 01] et autres);

- Environnement de déplacement et modèle de mobilité : les environnements pris en compte dans 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 infrastructures routières soit dans des autoroutes ou au sein même d'une zone métropolitaine. Les contraintes imposées par ce type d'environnement, à savoir les obstacles radio (ex: dus aux

immeubles) et les effets du multipath et de fading, affectent considérablement le modèle de mobilité et la qualité des transmissions radio à prendre en compte dans les protocoles et solutions proposées. En outre, la mobilité est liée directement au comportement des conducteurs;

– Type de l'information transportée et diffusion : l'une des applications clés des réseaux de véhicules étant la prévention et la sécurité routière, les types de communications s'axeront sur les diffusions de messages d'une source (ou d'un point) vers plusieurs destinataires. Néanmoins, les véhicules sont concernés par la diffusion en fonction de leur position géographique et leur degré d'implication dans l'évènement déclenché. Dans de telles situations, les communications sont principalement unidirectionnelles;

– Topologie du réseau et connectivité : à la différence des réseaux ad hoc, les réseaux VANET sont caractérisés par une forte mobilité, liée à la vitesse des voitures, qui est davantage importante sur les autoroutes. Par conséquent, un élément peut rapidement rejoindre ou quitter le réseau en un temps très court, ce qui rend les changements de topologie très fréquents. De plus, des problèmes tels que le partitionnement du réseau peuvent fréquemment apparaître, essentiellement quand le système IVC n'est pas largement répandu et équipé dans la majorité des véhicules. Les solutions proposées doivent alors prendre en considération cette contrainte spatiotemporelle où la connectivité est un des paramètres clés, avec un diamètre de réseau limité. L'hétérogénéité des nœuds en terme de vitesse (voitures et bus : les bus ont une vitesse régulière et plus petite) offre des informations supplémentaires à prendre en compte dans l'élaboration des solutions et des architectures pour les réseaux de véhicules. Une des contraintes et des paramètres à étudier de près est le problème de fragmentation du réseau VANET en fonction des conditions spatiotemporelles, notamment quand le taux de pénétration de ces systèmes dans le marché est faible. Cela implique une connectivité faible et des durées de vie des routes très limitées. Par ailleurs, les propriétés inhérentes aux réseaux VANET notamment en terme de taille ouvrent des problématiques de passage à l'échelle et nécessitent une révision complète des solutions existantes;

– D'un point de vue réseaux de capteurs, un nœud (véhicule) dans le réseau peut être considéré comme un capteur de grande capacité, doté de fonctionnalités diverses ou bien comme étant un réseau local composé de terminaux existants à bord de la voiture. De plus les informations collectées par les capteurs du véhicule peuvent être combinées pour ainsi éliminer les redondances et réduire le nombre de transmissions. La contrainte d'énergie et le facteur de mobilité inexistant différencient clairement les réseaux de capteurs des réseaux de véhicules, conçus pour des domaines d'applications différents. En outre, les informations collectées par les capteurs à bord des véhicules sont utilisées dans le fonctionnement des protocoles et peuvent affecter le comportement du réseau d'une manière générale.

2.2. Applications des réseaux VANET

Les principales applications des réseaux IVC peuvent être classées en trois catégories: (i) applications de sécurité routière, (ii) applications d'aide à la conduite, et (iii) applications de confort. Nous détaillons ci-après ces catégories et donnons ensuite des exemples d'applications.

– Applications pour 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. Afin d'améliorer la sécurité des déplacements et faire face aux accidents routiers, les IVC offrent la possibilité de prévenir les collisions et les travaux sur les routes, de détecter les obstacles (fixes ou mobiles) et de distribuer les informations météorologiques;

– Applications pour les systèmes d'aide à la conduite et les véhicules coopératifs : pour faciliter la conduite autonome et apporter un support au conducteur dans des situations particulières : aide aux dépassements de véhicules, prévention des sorties de voies en ligne ou en virage, etc. Nous pouvons citer également le cas des compagnies de transports utilisant les IVC dans un but de productivité pour réduire la consommation de carburant;

– Applications de confort du conducteur et des passagers : en particulier les services de communication et d'informations des utilisateurs comme l'accès mobile à l'Internet, la messagerie, le chat inter-véhicules, les jeux en réseaux, etc.

Dans la suite de cette partie nous nous limitons à la description de quelques services et exemples d'application des systèmes de communication véhicule à véhicule.

2.2.1. Alerter en cas d'accidents

Ce service permet, dans le cas d'un accident, d'avertir les véhicules se dirigeant vers le lieu de l'accident que les conditions de circulation se trouvent modifiées et qu'il est nécessaire de redoubler de vigilance. Il est nécessaire, également, en cas de densité réduite de véhicule de pouvoir conserver l'information pour pouvoir la retransmettre si un véhicule entre dans la zone de retransmission. Les messages de sécurité devront être émis à des périodes régulières. Ainsi les nœuds désignés pour la retransmission des messages émettront des alertes à instants réguliers. Les messages devront être de taille réduite pour être transmis le plus rapidement possible. Les messages devront comporter les coordonnées du lieu de l'accident et les paramètres de la zone de retransmission.

2.2.2. *Alerter en cas de ralentissement anormal (bouchon, travaux, intempéries, etc.)*

Ce service permet d'avertir les automobilistes de situations de circulation particulières. L'information quelque soit la nature des difficultés de circulation renseigne l'automobiliste qu'il est nécessaire de ralentir. Le message d'alerte est émis par un véhicule détectant les difficultés de circulation (freinage important par exemple, déclenchement des feux de détresse, pluie). Un véhicule banalisé effectuant des travaux peut également être à l'origine du message d'alerte (cf. Figure 3). Comme pour le message d'alerte informant d'un accident, le message d'alerte informant d'un ralentissement doit être transmis aux autres véhicules de façon efficace et rapide.

2.2.3. *La conduite collaborative*

La conduite collaborative est un concept qui améliore considérablement la sécurité du transport routier, en plus de réduire le nombre de victimes lors d'accidents impliquant des véhicules automobiles. Cette innovation est basée sur un échange de renseignements entre des véhicules munis d'instruments (capteurs par exemple) leur permettant de percevoir ce qui les entoure et de collaborer en groupes formés dynamiquement. Ces groupes de véhicules, ou réseaux ponctuels, peuvent élaborer une stratégie de conduite collective qui exigerait peu ou pas d'interventions de la part des conducteurs. Depuis les dernières années, différentes architectures de véhicules automatisés ont été proposées, mais la plupart d'entre elles n'ont pas, ou presque pas, attaqué le problème de communication inter véhicules.

2.2.4. *Hot spot sur les autoroutes*

Aujourd'hui, les personnes peuvent accéder à des sites web un peu avant qu'ils prennent le train, par exemple pour télécharger des films. En voiture, on peut imaginer d'acheter du contenu, au niveau d'une station essence, d'une gare ou même en pleine autoroute (en passant d'une voiture à une autre jusqu'au point d'accès le plus proche). Les passagers dans la voiture pourront ainsi jouer en réseaux, télécharger des fichiers MP3, envoyer des cartes à des amis, etc.

2.2.5. *Gestion des espaces libres dans les parkings*

Ce service permet de rassembler des informations sur la disponibilité de l'espace de stationnement dans les parkings et de coordonner entre automobilistes afin de les guider aux espaces libres (ex: projet SmartPark [SMA 05]).

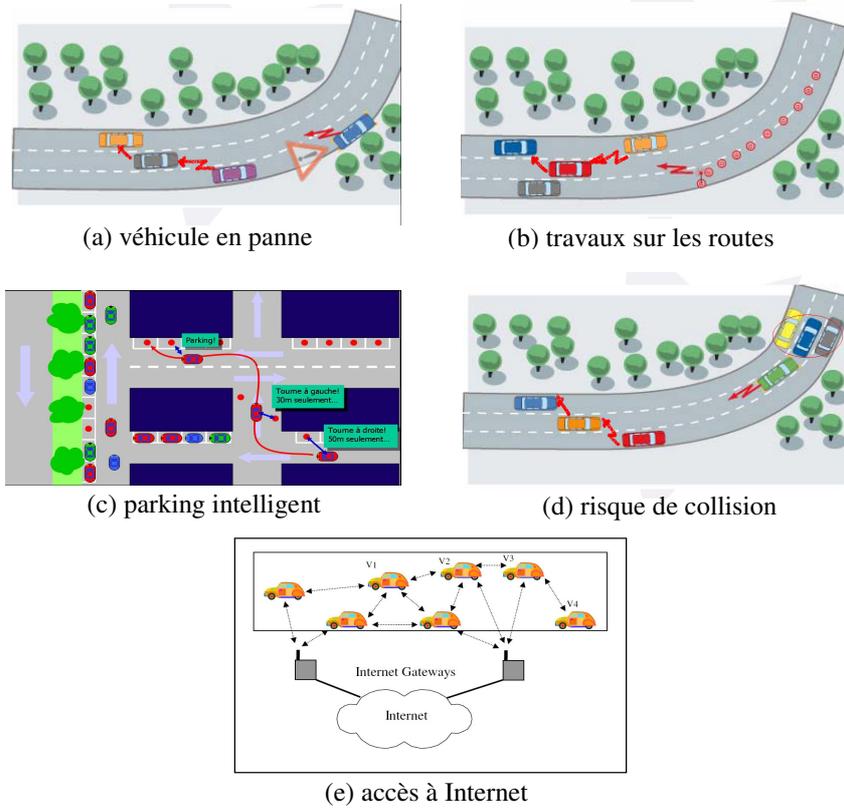


Figure 3. Exemples de scénarii d'applications des réseaux VANET.

3. Etat de l'art et étude de l'existant

3.1. Projets et consortiums

Les premiers travaux sur les IVC sont apparus au début des années 1980 au Japon (ex: Association of Electronic Technology for Automobile Traffic and Driving) avec le développement du problème du déplacement de personnes et de la marchandise, stimulant ainsi l'exploration de nouvelles solutions comme la conduite automatique, la planification intelligente des routes, etc. Plusieurs institutions gouvernementales, à travers le monde, ont mené ensuite une phase exploratoire au moyen de divers projets mondiaux, impliquant un nombre important d'unités de recherche. Ces projets ont abouti à la définition de plusieurs prototypes et solutions possibles, basés sur des approches plutôt différentes. Ainsi, des systèmes de gestion

de la circulation ont été installés dans les grandes villes japonaises et sur la plupart des autoroutes urbaines et interurbaines.

Les Japonais ont fait d'importants investissements dans l'élaboration des systèmes de renseignements aux conducteurs. Dans le cas d'une autoroute, le système surveille électroniquement la vitesse et le volume de la circulation et donne aux conducteurs des avertissements instantanés sur les accidents de la route et les ralentissements. Les avertissements, ainsi que d'autres renseignements pour les conducteurs, sont affichés sur divers signaux routiers variables. Dans le projet Japonais AHS (Automated Highway System - Systèmes d'Autoroutes Automatisées), il était question de concevoir un système d'autoroutes automatisées permettant une conduite autonome: la maîtrise du véhicule est donc prise en charge par un ordinateur à bord. Au États-Unis, il y a l'Intelligent Transportation Society of America (ITS America), qui est un groupement d'industriels, d'organismes publics, d'universitaires et autres. Ce groupe s'occupe de recherche, de promotion, de coordination du développement et du déploiement des applications ITS partout aux États-Unis. Comme au Japon, le gouvernement américain a également mis en place en 1995 le consortium NAHSC (National Automated Highway System Consortium). En Europe, le projet de Prometheus (PROgram European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety) a commencé en 1986 et comportait plus de 13 fabricants de véhicule et plusieurs universités de 19 pays européens. Dans ce cadre, un certain nombre d'approches et solutions concernant les ITS ont été conçues, mises en application, et démontrées.

Les retombées de cette première étape étaient une analyse profonde du problème et le développement d'une étude de faisabilité pour mieux comprendre les conditions et les effets possibles de l'application de la technologie. Plus tard et avec l'avancement technologique des équipements de communication, de calcul et de localisation, d'autres projets ont été réalisés et ont ouvert le champ à un certain nombre d'applications des IVC. Vu l'importance accordée à ce domaine, de nouveaux projets ont été initiés à travers le monde.

En Europe, un certain nombre de projets à grande échelle ont vu le jour ces dernières années autour de problématiques liées aux systèmes IVC. La plupart de ces projets sont initiés dans le cadre des programmes cadre de recherche de la Communauté européenne (5ème et 6ème PCRD). Cependant, une grande majorité de ces projets s'intéressent à l'utilisation exclusive d'infrastructure existante pour la mise en place du système IVC. Ce qui peut être extrêmement coûteux. Les projets Drive [DRI 99] et GST [GST 05] sont d'excellents représentants de ces projets. Ainsi le projet DRiVE (Dynamic Radio for IP Services in Vehicular Environments) vise à travailler sur la convergence entre différentes technologies cellulaires et de réseaux hauts débit (GSM, UMTS, DAB et DVB-T) afin de mettre en place le substrat nécessaire au développement de services IP innovants à destination des

véhicules. Le projet GST (Global Systems for Telematics) [GST 05] vise également des applications liées à la sécurité routière. Cependant, ce projet se concentre sur l'utilisation du réseau GSM. Il s'intéresse ainsi aux problématiques liées à la sécurisation de l'infrastructure réseau et service, la sûreté de fonctionnement et le payement (billing).

Dans ce qui suit nous allons passer en revue quelques consortiums et projets réalisés ces dernières années, traitant des communications V2V.

– Le projet FleetNet (Internet on the road), est un projet allemand initié par un consortium de six industriels et trois universités [FLE 00]. L'objectif de FleetNet est de développer une plate-forme de communication pour les réseaux de véhicules, de mettre en œuvre un démonstrateur, et de standardiser les solutions proposées afin d'assurer une meilleure sécurité et confort au conducteur et ses passagers. L'architecture FleetNet repose sur un mécanisme de routage basé sur un système de localisation et de navigation, et considère par ailleurs les communications véhicule à infrastructure afin de fournir le service d'accès à l'Internet.

– Le consortium de communication Car2Car [CAR 05] a été lancé par six constructeurs automobile européens, et ouvert aux fournisseurs, aux organismes de recherches et d'autres partenaires. Le consortium Car2Car s'est fixé l'objectif d'améliorer la sécurité routière, de gérer efficacement le trafic à travers l'utilisation des IVC. Les principales missions du consortium de communication Car2Car sont les suivantes : (i) la création d'un standard européen ouvert pour les communications V2V basé sur des composants LAN sans fil, (ii) développer des prototypes et des démonstrateurs des systèmes V2V pour les applications de sécurité routière, (iii) promouvoir l'attribution d'une bande de fréquence exclusive libre pour les applications de Car2Car en Europe, et (iv) développer des stratégies de déploiement et des modèles économiques pour la pénétration du marché.

– Le projet européen IST CarTalk2000 [CAR 01] (coordonné par le constructeur Daimler Chrysler entre 2001 et 2004) avait comme but de développer des systèmes coopératifs d'aide à la conduite et de mettre en œuvre un réseau pur ad hoc sans fil auto-organisé. La technologie d'accès radio UMTS a été adoptée au dessous d'un protocole de routage multi-sauts basé sur la position. Outre les aspects technologiques, le projet a étudié des facteurs liés aux stratégies d'introduction dans le marché comprenant des analyses de coûts et des aspects légaux.

– Le projet NOW (Network-on-Wheels) [NOW 04] (2004-2008) est un projet allemand du ministère fédéral de l'éducation et de la recherche, fondé par des constructeurs automobile, des acteurs de télécommunication et des académiques. NOW soutient et coopère fortement avec le consortium Car2Car. Les protocoles de communication développés pour le projet sont aussi bien dédiés aux applications de sécurité qu'aux applications de divertissement et fournissent ainsi une plate-forme de communication ouverte pour un large éventail d'applications. L'un des principaux objectifs du projet NOW est la mise en œuvre de protocoles de communications et

d'algorithme de sécurité des données dans les réseaux de véhicules. En se basant sur la technologie sans fil IEEE 802.11 et un routage basé sur la position dans un contexte de communication V2V ou véhicule à infrastructure, le but est d'implémenter un système de référence et de contribuer à la standardisation d'une telle solution en Europe et ce en collaboration avec le consortium Car2Car. Des aspects concernant les antennes de véhicules sont également traités.

– Le projet intégré européen PReVENT [PRE 04] co-financé par le Commission européen a été initié pour contribuer à la sécurité routière en développant et en démontrant des applications et des technologies préventives de sécurité routière. Il se fixe l'objectif de réduire le nombre d'accidents de 50% d'ici 2010, comme indiqué dans l'action eSafety [ESA 05] pour le transport routier de l'union européenne. PReVENT permet : (i) d'étudier et d'évaluer des applications préventives de sécurité, à l'aide de capteurs, des technologies de communication et de positionnement intégrées dans les systèmes embarqués pour l'aide à la conduite, (ii) d'aider au développement et l'intégration technologique ainsi qu'à la baisse des coûts des composants, et (iii) de contribuer à une introduction rapide dans le marché.

– Au niveau Français, le projet MobiVip [MOB 05] du programme PRÉDIT3 est un des récents dans le domaine. Il s'intéresse aux recherches et expérimentations des briques technologiques clés pour le déploiement intégré de services de mobilité en milieu urbain basés sur un système de transport «les Véhicules Individuels Publics» et un système d'information s'intégrant dans la politique de gestion globale des déplacements à l'échelle d'un centre ville. L'objectif est la création de nouveaux instruments pour la multi-modalité (briques technologiques matériels, logiciels et modèles) en se basant sur l'intégration, à la croisée entre conduite assistée et automatique, télécoms, modélisation transport, évaluation de service. Les travaux réalisés dans MobiVip ne s'intéressent pas prioritairement aux aspects réseaux mais plutôt aux services applicatifs ce qui est limitatif.

3.2. Etude de l'existant

Dans cette section nous allons présenter certaines propositions relatives aux réseaux VANETs. Ils sont néanmoins qu'au stade de proposition et aucun standard n'a encore vu le jour.

3.2.1. Routage

Avant d'aborder la fonctionnalité du routage dans les réseaux de véhicules, nous allons brièvement rappeler quelques principes et travaux autour du routage dans les réseaux ad hoc mobiles (MANET).

3.2.1.1. Protocoles de routage dans MANET

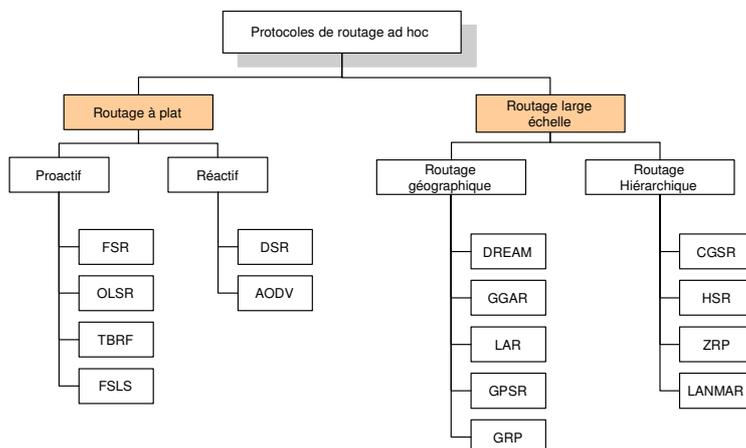


Figure 4. Classification des algorithmes de routage ad hoc.

Comme le montre la Figure 4, nous distinguons plusieurs familles de protocoles de routage pour les réseaux ad hoc dont chacun ayant sa spécificité :

– Tout d'abord la première famille de protocole, le routage plat (Flat routing) peut se diviser en deux sous-ensemble: d'un côté les protocoles proactifs (FSR [GER 01], OLSR [CLA 03], TBRPF [OGI 04]) et de l'autre les protocoles réactifs (DSR [JOH 04], AODV [PER 03]). Un protocole proactif va conserver toutes les routes possibles pour chaque destination dans le réseau. La route sera donc disponible immédiatement. A l'inverse, les protocoles réactifs attendent qu'une route soit demandée pour essayer de la déterminer. Il faut donc un laps de temps nécessaire à la recherche du chemin.

– En parallèle, de nouveaux protocoles appelés protocoles de routage géographiques (geographical routing) ou hiérarchiques (hierarchical routing) sont développés et conçus pour des réseaux à grande échelle :

i. **Routage géographique** : il s'agit d'un routage prenant en compte la situation physique des nœuds. Pour effectuer un routage géographique dans un réseau ad hoc, il est indispensable que : (i) tous les nœuds possèdent un moyen de localisation : via un système natif comme le GPS, Galiléo, ZigBee [ZIG 05] ou grâce à un système logiciel, (ii) un nœud source doit connaître la position du nœud destinataire. Pour se faire, soit tous les nœuds connaissent les positions initiales de tous les nœuds, soit un service de localisation doit être utilisé. Parmi les propositions existantes dans la littérature, on distingue deux catégories de protocoles de routage géographiques :

celle utilisant l'information de localisation afin d'améliorer en précision des protocoles déjà existants ("Aide au routage") et les protocoles de routage géographiques. Dans la première catégorie, le principe est d'ajouter des fonctions supplémentaires aux protocoles existants en vue de les améliorer dans certaines situations. Ces améliorations portent majoritairement sur le nombre de messages de découverte de route envoyés. Ainsi, l'utilisation des algorithmes de découverte des routes devient plus pertinente à certains endroits du réseau qu'à d'autres. La géolocalisation permettra de délimiter un périmètre de recherche dans lequel le protocole de découverte de routes sera plus efficace. Un exemple d'un tel procédé est le protocole 'Location Aided Routing' (LAR) [KOY 98], un protocole basé sur DSR. Le principal avantage de la deuxième catégorie d'algorithmes géographiques tels que GGAR [NAV 97], GPSR [KAR 00] et GRP [JAI 01] réside dans sa capacité à trouver la meilleure route géographique possible pour chaque paquet émis, tout en ayant une vue restreinte du réseau ou n'ayant que des informations partielles de localisation.

ii. **Routage hiérarchique** : Dans un routage hiérarchique il est question de partitionner le réseau en cluster pour une meilleure dissémination des informations de routage. Il s'agit en effet d'un routage où les nœuds ont une autorité plus ou moins importante et certains seront responsables d'une certaine zone afin de faciliter le routage. Le clustering consiste à classer les nœuds du réseau d'une manière hiérarchique suivant certains paramètres : adresse, zone géographique, capacités, etc. Un sous ensemble de nœuds est élu, d'une manière complètement distribuée, pour jouer le rôle d'un coordinateur local. Une telle approche de routage hiérarchique (ex: CBRP [MIN 99]) a comme but de réduire la taille de la table de routage qui est fonction de la structure de clustering utilisée. Un algorithme de clustering est basé sur les étapes suivantes : formation (élection) des cluster-heads, communication entre les cluster-heads, et la maintenance de ces derniers.

Le routage basé sur la localisation est connu pour être très robuste en ce qui concerne le passage à l'échelle pour la taille du réseau. Il représente un bon candidat pour les réseaux VANET. Quelques travaux comme celui de [SEN 05] l'ont bien démontré. Les auteurs ont évalué les performances de trois protocoles de routage ad hoc (AODV, DSR, et LAR). Les résultats de simulation ont montré que le routage géographique (LAR) est plus performant en termes de délai de bout en bout et de surcharge du réseau dans un environnement de type IVC.

3.2.1.2. Protocoles de routage pour VANET

Différentes solutions pour le routage dans les IVC ont été proposées. Nous les décrivons dans ce qui suit :

A-STAR (Anchor-based Street and Traffic Aware Routing) [LIM 05] est un protocole de routage basé sur la position pour un environnement IVC 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 en adoptant une approche de routage basé sur l'ancre (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 poids est assigné à chaque rue en fonction de sa capacité (grande rue ou petite qui est desservie par un nombre de bus différent). Les informations de routes fournies par les bus donnent une idée sur la charge de trafic dans chaque rue. Ce qui donne une image de la ville à des temps différents. Nous trouvons qu'une des perspectives à ce travail consiste à donner un poids dynamique et qui changerait en fonction de ces informations collectées et du trafic à un moment donné, afin de fournir une meilleure qualité de calcul d'ancres. Pour les études de performances, le modèle de mobilité M-Grid a été utilisé pour décrire le déplacement des voitures dans une ville.

Les auteurs de [BLU 03] proposent un algorithme de clustering (Clustering for Open IVC Networks - COIN) adapté aux réseaux IVC et qui améliore la stabilité des clusters. Le clustering utilisé a pour but de supporter le passage à l'échelle. La sélection des clusters est basée sur la mobilité, le comportement et intention des conducteurs et s'adapte aux oscillations de distances entre les voitures. Avec une charge de contrôle additionnelle réduite, ce protocole apporte une durée de vie des clusters environs deux fois meilleure et réduit les changements d'appartenance au cluster d'au moins 46%.

Le protocole de routage réactif proposé dans [LOC 03] est basé sur la position. Il se sert de la carte de la ville pour faciliter la fonction de routage. Les auteurs utilisent le service de localisation réactive (reactive location service) pour connaître la position d'un autre véhicule. C'est l'équivalent d'une procédure de découverte de route pour les protocoles de routage basés sur la topologie. Les auteurs travaillent actuellement sur l'extension de la solution pour minimiser les diffusions de messages de contrôle.

3.2.2. *Dissémination et diffusion de données*

La dissémination d'information consiste à acheminer une information d'une source vers une ou plusieurs destinations, en assurant un délai d'acheminement réduit, une grande fiabilité et une meilleure utilisation des ressources. Les destinations ciblées par l'opération de dissémination peuvent être caractérisées par la position, l'adresse IP, la région géographique ou autre. Dans les réseaux MANET, les protocoles de routage utilisent l'inondation pour la construction et la maintenance des routes. L'inondation est le protocole le plus naïf pour la diffusion dans les réseaux ad hoc. Dans celui-ci chaque nœud rediffuse systématiquement le paquet reçu une seule fois. Le problème (aussi connu dans [TSE 02] comme "the broadcast

storm problem") est que cette rediffusion systématique cause inutilement une consommation excessive de bande passante vu que chaque nœud va recevoir plusieurs fois la même information via le canal sans fil. De plus, dans le cas de réseaux ad hoc denses, le fait que chaque nœud rediffuse systématiquement génère un nombre important de collisions qui ne seront pas corrigés par la couche MAC (absence d'ACK lors de la diffusion). Ce qui réduit donc l'efficacité et la fiabilité de la diffusion. Toutefois, d'autres type de diffusion mieux adapté aux environnements IVC sont désormais possible notamment le multicast et la géodiffusion. Le **multicast** est utilisé par des applications qui souhaitent transmettre des informations vers plus d'une destination. Un nœud voulant recevoir les données, doit d'abord joindre un groupe multicast. Les messages envoyés sont alors reçus par tous les membres du groupe. La **géodiffusion** quant à elle adopte le même principe de fonctionnement, à la différence qu'au lieu de joindre explicitement un groupe multicast, les nœuds sont implicitement membres du même groupe s'ils sont dans la même zone géographique. Le groupe devient dans ce cas groupe géocast. Dans ce type de protocoles, la terminologie suivante est utilisée : (i) Groupe géocast : les membres d'un groupe sont définis par leur localisation géographique, (ii) Zone géocast : est l'espace géographique où l'ensemble des nœuds mobiles membre d'un groupe géocast sont localisés. Entrer dans la zone revient à joindre le groupe et vice versa, et (iii) Zone de relaying (forwarding zone) : représente la zone où les paquets de données sont relayés. Chaque groupe géocast dispose d'une zone de relaying, et seuls les nœuds se trouvant à l'intérieur peuvent relayer les paquets. Une zone géocast est incluse dans une zone de relaying.

Dans ce qui suit, nous allons présenter brièvement quelques solutions de dissémination de données dans les réseaux de véhicules. En effet, vu la nature et les services des applications de sécurité routières, les architectures de communication des réseaux de véhicules doivent intégrer des mécanismes de dissémination des données efficaces et adaptés.

MDDV (Mobility-Centric Data Dissemination Algorithm for Vehicular Networks) [WUH 04] est un algorithme de diffusion qui, contrairement aux autres algorithmes géographiques, considère que les véhicules ne disposent pas des positions des véhicules voisins. Le réseau routier est modélisé comme un graphe orienté où les nœuds représentent les intersections, et les liens les segments routiers. Un poids est associé à chaque lien pour refléter la distance et la densité de trafic correspondante. MDDV utilise une trajectoire de relaying spécifiée comme le chemin ayant la plus petite somme des poids d'une source vers la 'région destination' dans le graphe orienté.

Urban Multi-Hop Broadcast Protocol [KOR 04] est un algorithme de diffusion qui modifie la couche d'accès 802.11 pour l'adapter au contexte des IVC dans le but de réduire les collisions et d'utiliser efficacement la bande passante. Il comprend deux phases : la première appelée diffusion directionnelle où la source sélectionne

un nœud dans la direction de diffusion pour effectuer le relayage des données sans aucune information sur la topologie, et la deuxième diffusion aux intersections, pour disséminer les paquets dans toutes les directions, en installant des répéteurs vers tous les segments de route.

Dans RBM (Role-Based Multicast) [BRI 00], les auteurs proposent un protocole de multicast où chaque nœud maintient deux listes : une liste de voisins et une liste des nœuds émetteurs. En fonction des contenus de ces deux listes, un nœud décide ou pas de rediffuser le message après un certain temps. Dans cette approche, le protocole suppose l'existence d'une couche liaison qui maintient la liste des nœuds voisins.

Dans [SUN 00] les protocoles de diffusion appelés TRADE (TRack DEtection) et DDT (Distance Defer Time) ont été proposés. Pour TRADE l'objectif est de garantir une meilleure fiabilité avec un nombre de rediffusions limité. Un véhicule doit alors désigner parmi ses voisins, en fonction de leurs déplacements, ceux qui assurent la retransmission des messages. DDT quand à lui utilise un temps d'attente (defer time) avant la rediffusion d'un message reçu, et si pendant ce temps il reçoit le même message provenant d'un autre véhicule il ne le rediffuse plus.

IVG (Inter-Vehicle Geocast) [BEN 04] est une nouvelle méthode de diffusion qui généralise les méthodes précédentes (TRADE et DDT) et permet de surmonter les problèmes de fragmentation du réseau, de fiabilité et de calcul de voisins. Des relais dynamiques sont introduits pour rediffuser périodiquement les messages d'alerte. Ces relais sont désignés en fonction de la distance relative au véhicule source. Une comparaison avec les méthodes TRADE et DDT a été réalisée en utilisant un modèle analytique et des simulations, et a montré les améliorations apportées, et ce indépendamment de l'environnement (rural ou urbain).

D'autres solutions de géodiffusion peuvent être également trouvées dans [SUN 05], ou [MAI 05].

3.2.3. *Modèles de mobilité pour les réseaux de véhicules*

Un modèle de mobilité reflète le comportement spatiotemporel des nœuds mobiles dans un réseau, où le but est de représenter au mieux les conditions de déplacements dans un contexte particulier du monde réel. Faisant partie intégrante du modèle de simulation, les performances des solutions (protocoles, modèles, architectures ou autres) proposées dans les réseaux sont fortement dépendantes. Par conséquent, une attention particulière doit être accordée à la conception et la définition d'un modèle de mobilité, considérant les caractéristiques et les contraintes de l'environnement modélisé.

Pour les réseaux ad hoc mobiles, le modèle Random Way Point (RWP) [JOH 96] est l'un des modèles de mobilité les plus répandus et utilisés dans les simulations. Dans ce modèle, chaque nœud choisit individuellement une destination aléatoire

dans la limite géographique du réseau et choisit également une vitesse aléatoire de déplacement (comprise entre une vitesse minimum et maximum). Une fois le noeud atteint la destination, il effectue une pause pendant une période de temps. Après ce temps de pause, le noeud répète le processus, en choisissant une destination et une vitesse aléatoire différentes. Dans ce cas les nœuds mobiles se déplacent aléatoirement et indépendamment les uns des autres. Il existe d'autres modèles de mobilité [CAM 02] appelés "modèles de mobilité de groupe" qui représentent les noeuds mobiles dont les mouvements dépendent les uns des autres qui sont adaptés aux applications impliquant les communications de groupes.

Ces modèles de mobilité pour MANET souffrent de quelques limites telle que la convergence des nœuds vers le centre de la surface du réseau dans le temps, ce qui donne une distribution inadéquate des nœuds [BET 04]. Ces modèles ne peuvent être directement utilisés dans les réseaux de véhicules où les déplacements et les vitesses sont délimités et prédéfinis par les routes et le comportement des conducteurs. Afin de définir un modèle de mobilité adéquat pour les IVC, on distingue les environnements suivants :

- Autoroute : environnement ouvert caractérisé par une grande vitesse de déplacement (avec des limites : vitesse min et vitesse max), avec des dépassements de véhicules, et une densité de nœuds fonction de l'heure de la journée;
- Ville : vitesse modérée avec une probabilité d'intersection plus grande. Il existe des endroits d'arrêt aux feux, une grande densité de voitures, et l'existence de certaines routes plus fréquentées que d'autres (routes principales, endroit commercial ou touristique par exemple);
- Rase campagne : caractérisé par des vitesses moins importantes avec une densité de voitures plus faible.

La modélisation du trafic routier est un sujet de recherche où plusieurs travaux ont été réalisés dans le domaine des systèmes de transport intelligents. Une variété d'outils de simulation tels que PARAMICS [CAM 96], CORSIM [COR 96] et VISSIM [VIS 05] ont été développés pour analyser des scénarios de transport aux niveaux micro et macro. Par exemple CORSIM [COR 96] est un simulateur microscopique de trafic développé par The Federal Highway Administration aux États Unis et largement utilisé dans les ITS. Dans CORSIM la mobilité des véhicules est déterminée par le comportement du conducteur, les caractéristiques du véhicule et les contraintes imposées par la route et les véhicules voisins. Cependant, il y a peu d'effort dans l'intégration des techniques et des scénarios de communication.

Récemment, quelques travaux sur les modèles de mobilité ont été proposés. Par exemple, [SAH 04] propose un modèle de mobilité basé sur les déplacements des véhicules suivant des plans de routes réels et spécifiques. Une comparaison avec le

modèle RWP a été réalisée. Développé pour le simulateur NS-2 [FAL 05], ce modèle est disponible et peut être librement utilisé pour les simulations des réseaux de véhicules. Néanmoins, des aspects comme le temps d'attente dans les intersections ou l'existence de routes plus fréquentées que d'autres, n'ont pas été pris en compte dans le modèle. Dans [LEB 05] un modèle de mobilité générique issu de la famille des modèles Random Trip Mobility a été étudié. Des simulations en utilisant des cartes et des plans de villes ont été réalisées. Dans [KAR 05] un outil appelé MOVE se basant sur SUMO [SUM 05] a été développé pour générer des fichiers de trace de mobilité utilisable pour NS-2 ou Qualnet [QUA 05]. Dans STRAW (STreet Random Waypoint) [CHOF 05], le mouvement des nœuds est contraint aux rues définies par des données de carte de villes réelles et leur mobilité est limitée en fonction de la congestion de la route. Le modèle est divisé en composants : mobilité intra segment, mobilité inter segment, et un composant de gestion de route et d'exécution. Récemment dans [MAN 05], un outil de simulation appelé GrooveSim a été développé. Il intègre un ensemble de modèles de mobilité, de communication, de trafics, et de trajectoires. Il représente en effet un des rares outils à proposer un modèle de mobilité à être testé sur un protocole de diffusion géographique pour réseaux de véhicules. Développé en C++ pour des plateformes Linux, il offre quatre modèles de mobilité basiques : modèle vitesse uniforme avec une vitesse min et max; modèle probabiliste markovien à quatre états; modèle basé sur la charge de la route; et un modèle basé sur le plan de routes à vitesse maximum. GrooveSim génère des plans de rue de n'importe quel endroit aux Etats-Unis en important des fichiers de type TIGER/Line [TIG 04] disponibles gratuitement aux états unis. Néanmoins, avec ce type de format les informations fournies dans les fichiers TIGER n'offrent pas des informations précises sur le nombre de voies par route, les sens uniques, et ne contient aucune signalétique routière. Comme GrooveSim offre des modèles basiques, il devrait être étendu pour supporter des modèles de communications plus réalistes et des modèles de trafics plus appropriés.

Les modèles de mobilité généralement proposés sont assez récents et principalement testés avec des protocoles de routage ad hoc (DSR, AODV ou autres). Il est plus adéquat de les utiliser sous des protocoles (de routage ou autres) spécifiques aux contraintes des IVC. Il est par ailleurs opportun de combiner les approches utilisées dans les simulateurs de trafic routiers avec des simulateurs de communications (CORSIM et NS-2 par exemple).

3.2.4. *Les couches MAC et physiques*

Actuellement, il existe deux approches principales pour la conception de protocoles MAC spécifiques aux réseaux IVC. Elles diffèrent selon le l'interface radio utilisé. La première approche est basée sur des couches physiques de type réseaux locaux sans-fil WLAN, telles que le IEEE 802.11 et Bluetooth. L'approche alternative consiste à prolonger la technologie cellulaire 3G, telle que CDMA pour

un accès décentralisé. D'un côté, l'avantage de la première approche est le support de la coordination distribuée en mode ad hoc, mais la flexibilité de l'allocation des ressources et le débit de transmission sont faibles. D'un autre côté, les extensions 3G ont un débit plus grand et une allocation de ressources plus flexible due à CDMA, mais souffrent en revanche d'une complexité liée à la conception de la fonction de coordination en mode ad hoc. Nous discutons ci-après quelques propositions qui essayent d'améliorer certains aspects dans les normes existantes.

Les auteurs de [KAT 03] proposent un protocole d'accès distribué appelé LCA (Location-based Channel Access). En se basant sur des informations de localisation, le protocole LCA divise une surface géographique en cellules avec un canal par cellule. Dans chaque cellule, n'importe quel protocole d'accès multiple tel que CSMA ou CDMA peut être utilisé. Nous pensons néanmoins qu'un ensemble de simulations dans le contexte véhiculaire est nécessaire pour évaluer la validité d'une telle solution dans un réseau aussi dynamique que les réseaux IVC.

Il existe plusieurs propositions pour utiliser R-ALOHA² (Reservation ALOHA) pour une allocation distribuée des canaux [BOR 02] [BOR 03] [HAL 01] [RUD 03]. Par exemple dans [BOR 02], les auteurs proposent le protocole RR-ALOHA (Reliable R-ALOHA) [BOR 02] basé sur UTRA TDD. Dans ce nouveau protocole, une information supplémentaire concernant le statut de chaque slot est transmise à tous les nœuds, évitant ainsi qu'une même réservation se produise. Il existe également quelques protocoles MAC pour réseaux ad hoc combinant CDMA avec un accès aléatoire au canal. Un exemple est RA-CDMA (random access CDMA) [SOU 88] où les stations émettrices commencent leur transmission immédiatement et indépendamment de l'état du canal. Une des améliorations de RA-CDMA est CA-CDMA (channel-adapted CDMA) [MUQ 03]. Cette dernière utilise un mécanisme de réservation RTS/CTS modifié où le canal est divisé en canaux de contrôle et canaux de données. Les RTS/CTS sont envoyés sur des canaux de contrôle permettant de faire connaître l'état du canal aux nœuds interférents (mais contrairement au protocole IEEE 802.11, les nœuds interférents peuvent transmettre en même temps mais sous certaines conditions). A travers les résultats de simulation (particulièrement la comparaison entre CA-CDMA et IEEE 802.11), il a été montré que ce protocole est prometteur pour les réseaux ad hoc. Cependant, d'autres études dédiées et considérant un environnement IVC sont nécessaires.

² R-ALOHA est un protocole d'accès aléatoire avec réservation et qui est totalement distribué. R-ALOHA est basé sur Slotted ALOHA avec une allocation régulière des slots. Si une station réussit l'émission sur un slot donné, elle va réserver le même slot dans les trames suivantes. Cette réservation de slots réduit la contention.

Bien qu'on ait proposé un certain nombre de protocoles MAC, plus d'efforts sont nécessaires pour les mettre en pratique. Actuellement, IEEE 802.11b est le plus souvent utilisé pour les démonstrations [FUB 03], et IEEE 802.11a est choisi par ASTM (American Society for Testing and Materials) pour servir de base au standard DSRC3 (Dedicated Short Range Communication) [DSR 03].

3.2.5. La sécurité dans les réseaux de véhicules

Les communications transitant dans un réseau de véhicules ainsi que les informations concernant les véhicules et leurs conducteurs doivent être protégées et sécurisées pour assurer le bon fonctionnement d'un système de transport intelligent. La sensibilité des données véhiculées par un réseau VANET démontre un besoin fort en sécurité. En effet, l'importance de la sécurité dans ce contexte est cruciale vue les conséquences critiques qui résultent d'une violation ou d'une attaque. De plus, avec un environnement fortement dynamique caractérisé par des arrivées et des départs de voitures quasi instantanés, et des connexions de courtes durées, le déploiement d'une solution de sécurité doit faire face à des contraintes et configurations spécifiques. Bien que le besoin de solutions sécurisées pour la transmission des données dans VANET a été pressenti dès leur apparition. Ce n'est que récemment que cette problématique a suscité un grand intérêt, et que quelques solutions ont été élaborées. Ci-dessous une description succincte de quelques unes de ces propositions.

Les auteurs de [GOL 04] proposent un modèle qui permet d'évaluer le niveau de validité des données circulant dans le réseau VANET. Dans [RAY 05], les auteurs fournissent une analyse détaillée des différentes attaques dans les réseaux de véhicules et proposent une architecture de sécurité où des protocoles sont décrits et évalués. De plus, ils montrent que la cryptographie à base de clé publique est adaptée aux réseaux VANET. Dans [BLU 04], les auteurs présentent l'architecture SecCar qui s'appuie sur une infrastructure à clé publique pour offrir des solutions de sécurité dans les IVC. L'utilisation des signatures numériques est étudiée et discutée dans [LUT 02], elle est également préconisée par Zarki et al. [ZAR 02] qui discutent les requis de sécurité pour un système utilisant une infrastructure à clé publique dans un environnement VANET.

L'approche mise en œuvre dans le cadre du projet NOW [NOW 04] consiste en la construction d'arbre d'attaques. Grâce à un modèle générique, un arbre d'attaques est construit à base des requis de sécurité du système ainsi que les différentes vulnérabilités liées aux services proposés. Dans un premier temps, l'accent est mis

³ Standard de communication DSRC utilisant la bande 5.850 à 5.925 GHz aux USA. C'est une variante de la technologie IEEE 801.11a permettant des communications véhicule-à-véhicule (V2V) et véhicule à infrastructure (V2I).

sur des attaques générales comme l'insertion de faux messages, les DOS (Denial Of Service), et la violation de l'intimité (privacy). Les auteurs de [DUR 02] se focalisent sur la garantie de l'intimité et l'intégrité des données dans les applications télématiques. Ils présentent en effet une solution pour la protection des données en utilisant des solutions basées sur des standards tels que SSL ou IPSec.

Il existe également d'autres propositions qui se limitent néanmoins à des aspects particuliers et limités des réseaux de véhicules sans pour autant proposer une solution ayant une visibilité globale du contexte des réseaux véhiculaires. Par ailleurs, nous notons que peu de travaux de recherche traitant de la sécurité dans ce domaine ont été réalisés ces dernières années.

4. Conclusion

Depuis quelques années, le développement des nouvelles technologies a favorisé une formidable évolution du système de transports. Cette évolution vise de rendre les réseaux plus sûrs, plus efficaces, plus fiables et plus écologiques sans avoir nécessairement à modifier matériellement l'infrastructure existante. La gamme des technologies en jeu comprend l'informatique et les technologies des capteurs, des systèmes de contrôle et des communications; elle touche des disciplines telles que les transports, l'ingénierie, les télécommunications, l'informatique, les finances, le commerce électronique et la construction automobile. Les principaux objectifs d'un système de transport intelligent concernent : (i) l'amélioration de la sécurité des déplacements, (ii) l'amélioration de l'efficacité globale du système de transports en réduisant les temps de parcours et les congestions, (iii) l'intégration des transports dans une politique de développement durable, notamment en réduisant les émissions de gaz pour les véhicules légers et les poids lourds et en optimisant la maintenance de l'infrastructure, et (iv) 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.

Le but principal de ce chapitre est de mieux comprendre une des principales composantes de ces systèmes ITS qui est la communication inter-véhicules IVC ou ce que nous appelons réseaux ad hoc mobiles inter-véhiculaires (VANETs) qui sont une classe particulière de MANETs. Les spécificités et les applications de ces systèmes ainsi qu'un ensemble de projets et travaux de recherche se rapportant à ce domaine ont été présentés. Bien que proche de l'environnement des réseaux ad hoc mobiles, des problématiques propres aux réseaux de véhicules doivent être étudiées de près, et certaines solutions existantes pour les réseaux ad hoc doivent être révisées et adaptées. Dans ce chapitre nous avons également présenté quelques propositions récentes qui traitent : du routage et de la dissémination de données, des modèles de mobilité, de la couche d'accès au canal, et des aspects liés à la sécurité.

Ces travaux, peus nombreux, tentent de répondre aux particularités et contraintes de l'environnement.

Nous pensons qu'une attention particulière doit être accordée aux modèles de mobilité pour mieux représenter le contexte réel (paramètres tels que les changements de voies, les feux de circulation, les endroits de forte influence, et l'utilisation des informations topographiques fournies par les plans). Ces modèles sont nécessaires pour les tests de simulation de ces systèmes de communication à grande échelle. De plus, les modèles de trafics ainsi que l'interconnexion avec d'autres réseaux doivent être considérés et pris en compte dans les études réalisées dans les réseaux véhiculaires.

5. Bibliographie

- [BEN 04] A. Benslimane, et A. Bachir, « Réseaux Ad Hoc Mobiles : Géodiffusion InterVéhicules », *Chapitre de Livre traité IC2 : L'Internet ambient*, HERMES Science Publisher, p. 215-236, 2004.
- [BET 04] C. Bettstetter., H. Hartenstein, and X. PrezCosta, « Stochastic properties of the random waypoint mobility model », *ACM/Kluwer Wireless Networks: Special Issue on Modeling and Analysis of Mobile Networks*, 10(5), Septembre 2004.
- [BLE 01] Bluetooth SIG: Bluetooth Specification Version 1.1. 2001, <https://www.bluetooth.org/spec>
- [BLU 03] J. Blum, A. Eskandarian, and L. Hoffman, « Mobility Management for IVC Networks », *proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, p. 150-155, Columbus, OH, Juin 2003.
- [BLU 04] J. Blum and A. Eskandarian, « The Threat of Intelligent Collisions », *In IT Professional*, 6(1), p. 24-29, Jan-Fév 2004.
- [BOR 02] F. Borgonovo, A. Capone, M. Cesana and L. Fratta, « RR-ALOHA, a reliable R-ALOHA broadcast channel for ad-hoc inter-vehicle communication networks », *in Proceedings of Med-Hoc-Net 2002*, Baia Chia, Italy (2002).
- [BOR 03] F. Borgonovo, A. Capone, M. Cesana, and L. Fratta, « ADHOC MAC: A new, flexible and reliable MAC architecture for ad-hoc networks », *In Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'03)*, New Orleans, USA, Mars 2003.
- [BRI 00] L. Briesemeister, G. Hommel, « Role-based multicast in highly mobile but sparsely connected ad hoc networks », *Proceedings of the 1st ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, Boston, Massachusetts, 2000.
- [CAM 02] T. Camp , J. Boleng , and V. Davies, « A survey of mobility models for ad hoc network research ». *Wireless Communications & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications*, p. 483–502, 2002.

- [CAM 96] G. Cameron and G. Duncan, « PARAMICS-Distributed Microscopic Simulation of Road Traffic », *the Journal of Supercomputing*, Vol 10, p. 25-53, 1996.
- [CAR 01] Safe and comfortable driving based upon inter-vehicle communication, <http://www.cartalk2000.net>
- [CAR 05] Car2Car Communication Consortium, www.car-to-car.org
- [CHOF 05] D.R. Choffnes and F.E. Bustamante. « An Integrated Mobility and Traffic Model for Vehicular Wireless Networks », *In Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET)*, Cologne, Germany, Septembre 2005.
- [CLA 03] T. Clausen, P. Jacquet, « Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) », *IETF Request for Comments : RFC 3626*, Octobre 2003.
- [COR 96] « CORSIM User Manual, Version 1.01 », *the Federal Highway Administration, US Department of Transportation*, 1996.
- [DRI 99] Le projet DRiVE, <http://www.ist-drive.org/index2.html>.
- [DSR 03] Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems - 5GHz Band Dedicated Short Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, ASTM E2213-03, Septembre 2003.
- [DUR 02] S. Duri, M. Gruteser, X. Liu, P. Moskowitz, R. Perez, M. Singh, and J. Tang, « Framework for Security and Privacy in Automotive Telematics », *In Proceedings of the 2nd International Workshop on Mobile Commerce*, p. 25-32, Atlanta, Georgia, USA, 2002.
- [ERM 04] E. ERMEL, « Localisation et Routage géographique dans les réseaux sans fil hétérogènes », thèse de Doctorat, Laboratoire d'Informatique de Paris 6, Juin 2004.
- [ESA 05] e-Safety, http://europa.eu.int/information_society/activities/esafety/index_en.htm.
- [FAL 05] K. Fall, K. Varadhan, « The ns Manual », <http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/index.html>
- [FLE 00] FleetNet project- Internet on the road, <http://www.et2.tu-harburg.de/fleetnet>
- [FUB 03] H. Fubler, H. Hartenstein, W. Franz, W. Enkelmann, M. Moske, and C. Wagner, « The Fleetnet demonstrator », *In Demos of the 9th ACM/IEEE international conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'03)*, San Diego, California, USA, Septembre 2003.
- [GER 01] M. Gerla, X. Hong, and G. Pei, « Fisheye State Routing Protocol (FSR) for Ad Hoc Networks », *IETF Internet Draft*, draft-ietf-MANET-fsr -02.txt, Décembre 2001.
- [GOL 04] P. Golle, D.H. Greene, J. Staddon, « Detecting and correcting malicious data in VANETs », *Proceedings of the First ACM Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, p. 29-37, Philadelphia, USA, Octobre 2004.
- [GST 05] Le projet GST, <http://www.gstproject.org>.
- [HAA 02] Z. Haas, M. Pearlman, P. Samar, « The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks », *IETF Internet draft*, draft-ietf-manet-zone-zrp-02.txt, Juillet 2002.

- [HAL 01] M. Lott, R. Halfmann, E. Schulz, and M. Radimirsch, « Medium access and radio resource management for ad hoc networks based on UTRA TDD », *In Proc. of the 2nd ACM/SIGMOBILE Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (MobiHoc'01)*, Long Beach, California, USA, Octobre 2001.
- [HUB 05] J-P Hubaux, « Vehicular Networks: How to Secure Them », *MiNeMa Summer School*, Klagenfurt, Juillet 2005.
- [JAI 01] R. Jain, A. Puri, and R. Sengupta, « Geographical routing using partial information for wireless ad hoc networks », *IEEE Personal Communications*, vol. 8, p. 48-57, Fév. 2001.
- [JOH 04] D.B. Johnson, D.A. Maltz, Y-C. Hu, « The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR) », *Internet Draft* : <draft-ietf-manetdsr-10.txt>, 19 Juillet 2004.
- [JOH 96] D.B. Johnson and D.A. Maltz. « Dynamic source routing in ad hoc wireless networks ». *Mobile Computing*, Tomasz Imielinski and Hank Korth editors, Kluwer Academic Publishers, vol 353, p. 153-181, 1996.
- [KAR 00] B. Karp and H. T. Kung, « Gpsr: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks », *in Proceedings of ACM/IEEE MOBICOM'00*, Boston, USA, Août 2000.
- [KAR 05] F.K Karnadi, Z.H Mo, and K.-C. Lany, « Rapid Generation of Realistic Mobility Models for VANET », *in the proceedings of the Eleventh Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2005)*, Cologne, Germany, Août -Septembre 2 2005.
- [KAT 03] S. Katragadda, G. Murthy, R. Rao, M. Kumar, and R. Sachin, « A decentralized location based channel access protocol for inter-vehicle communication », *In Proc. of the 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC'03 Spring)*, Jeju, Korea, Avril 2003.
- [KOR 04] G. Korkmaz, E. Ekici, F. Ozguner, and U. Ozguner , « Urban Multi-Hop Broadcast Protocol for Inter-Vehicle Communication Systems », *Proceedings of First ACM Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2004)*, p. 76-85, Philadelphia, PA, USA, Octobre 2004.
- [KOS 05] T. Kosch, « Ad-hoc Connected Vehicles », *MiNeMa Summer School*, Klagenfurt, Juillet 2005.
- [KOY 98] Y. Ko and N. Vaidya, « Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks », *in Proceedings of ACM/IEEE MOBICOM'98*, p. 66-75, Dallas, USA, Août 1998.
- [LEB 05] J-Y. Le Boudec and M. Vojnovic, « Perfect Simulation and Stationarity of a Class of Mobility Models », *proceedings of IEEE Infocom 2005*, Miami, USA, 2005.
- [LIM 05] T.M. Lim, B.C. Seet, B.S. Lee, C.K. Yeo, A. Kessler, « Pervasive communication for commuters in public buses », *in proceedings of IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW'05)*, p. 75 – 79, Washington, USA, 8-12 Mars 2005.

- [LOC 03] C. Lochert, H. Hartenstein, J. Tian, H. Fler, D. Herrmann, and M. Mauve, « A Routing Strategy for Vehicular Ad Hoc Networks in City Environments », *Proc.IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2003)*, Ohio, USA, Juin. 2003.
- [LUT 02] L. Gollan and C. Meinel. « Digital signatures for automobiles », *In Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI)*, 2002.
- [MAI 05] C. Maihöfer, T. Leinmüller, and E. Schoch, « Abiding Geocast: Time-Stable Geocast for Ad Hoc Networks », *In Proceedings of the Second ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2005)*, p. 30-39, Cologne, Germany, Septembre 2005.
- [MAN 05] IETF Mobile Ad-hoc Networks (MANET) charter, <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>.
- [MAN 05] R. Mangharam, D.S. Weller, D.D. Stancil, R. Rajkumar, J.S. Parikh, « GrooveSim: A Topography-Accurate Simulator for Geographic Routing in Vehicular Networks », *Proceedings of Second ACM International Workshop on Vehicular Ad hoc Networks (Mobicom/VANET 2005)*, Cologne, Germany. Septembre 2005.
- [MIN 99] Y. T. Mingliang Jiang, Jinyang Li, « Cluster based routing protocol », *IETF Internet Draft*, draft-ietf-manet-cbrp-spec-01.txt, Juillet 1999.
- [MOB 05] Le projet MobiVip : <http://www-sop.inria.fr/mobivip>.
- [MUQ 03] A. Muqattash and M. Krunz, « CDMA-based MAC protocol for wireless ad hoc networks », *In Proc. of the 4nd ACM/SIGMOBILE Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (MobiHoc'03)*, Annapolis, Maryland, USA, Juin 2003.
- [NAV 97] J. Navas and T. Imelinski, « Geocast - geographic addressing and routing », *in Proceedings of ACM/IEEE MOBICOM'97*, vol. 3, p. 66-76, Budapest, Hungary, Septembre 1997.
- [NOW 04] NOW (Network-On-Wheels), www.network-on-wheels.de
- [OGI 04] R. Ogier, F. Templin, M. Lewis, « Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF) », *IETF Request For Comments (RFC) 3684*, Février 2004.
- [PER 03] C.E. Perkins, E.M. Belding-Royer, and S. Das, « Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV) Routing », *IETF RFC 3561*, 2003.
- [PRE 04] Projet intégré PReVENT, www.prevent-ip.org
- [QUA 05] Qualnet, « Qualnet user manual », <http://www.scalable-networks.com/products/qualnet.php>
- [RAY 05] M. Raya and J-P. Hubaux, « The Security of Vehicular Ad Hoc Networks », *in the proceeding of The Third ACM Workshop on Security of Ad Hoc and Sensor Networks (SASN'05)*, Alexandria, VA, USA, Novembre 2005.
- [RUD 03] M. Rudack, M. Meincke, K. Jobmann, and M. Lott, « On traffic dynamical aspects intervehicle communication (IVC) », *In Proc. of the 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC'03 Spring)*, Jeju, Korea, Avril 2003.

- [SAH 04] A.K. Saha and D.B. Johnson. « Modeling Mobility for Vehicular Ad Hoc Networks ». *Poster in the First ACM Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET 2004)*, Philadelphia, Pennsylvania, Oct 2004.
- [SEN 05] S-M Senouci, T. Mohamed-Rasheed, « Modified Location-Aided Routing Protocols for Control Overhead Reduction in Mobile Ad Hoc Networks », *Network Control and Engineering for QoS, Security and Mobility (NetCon 2005)*, Lannion, France, Novembre 2005.
- [SMA 05] Projet SmartPark : Parking Made Easy, <http://smartpark.epfl.ch>.
- [SOU 88] E. Sousa and J.A. Silvester « Spreading code protocols for distributed spread-spectrum packet radio networks », *IEEE Transactions on Communications*, 36(3), p. 272–281, 1988.
- [SUM 05] SUMO Simulation of Urban MObility. <http://sumo.sourceforge.net>
- [SUN 00] M.T. Sun, W.C. Feng, Lai T.H., K.Yamada, and H. Okada, « GPS-based Message Broadcast for Adaptive Inter-vehicle Communications », *Proceedings of IEEE VTC Fall 2000*, n° 6, p. 2685-2692, Boston, MA, Septembre 2000.
- [SUN 05] Q. Sun, H. Garcia-Molina, « Using Ad-hoc Inter-Vehicle Network for Regional Alerts », Technical Report, 2005.
- [TIA 02] J. Tian, I. Stepanov, and K. Rothermel, « Spatial Aware Geographic Forwarding for Mobile Ad Hoc Networks », *Proceedings of MobiHoc*, Lausanne, Switzerland, Juin. 2002.
- [TIG 04] TIGER/Line 2004. US Geological Survey (USGS) topographic maps, <http://www.census.gov/geo/www/tiger>.
- [TSE 02] Y.C. Tseng, S.Y. Ni, Y.S. Chen, and J.P. Sheu. « The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network », *Wireless Networks*, 8(2/3), p. 153-67, 2002.
- [VIS 05] PTV simulation VISSIM, http://www.english.ptv.de/cgi-bin/traffic/traf_vissim.pl
- [WUH 04] H. Wu, R. Fujimoto, R. Guensler, M. Hunter, « MDDV: a mobility-centric data dissemination algorithm for vehicular networks », *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, p. 47–56, Philadelphia, PA, USA, 2004.
- [ZAR 02] M. El Zarki, S. Mehrotra, G. Tsudik, and N. Venkatasubramanian, « Security issues in a future vehicular network », *European Wireless*, Florence, Italy, Février 2002.
- [ZIG 05] The ZigBee Alliance, <http://www.zigbee.org>.