

Université de Mostaganem  
Faculté des Sciences Exactes et Informatique

Université Le Havre Normandie  
UFR des Sciences et Techniques

# Prise en compte des contraintes temporelles dans les réseaux véhiculaires

Thèse de Doctorat  
de l'Université de Mostaganem  
Spécialité Web Automatique et Intelligence Artificielle

Présentée par

Saliha BENKERDAGH

Le 09 Décembre 2019

## Devant le jury composé de

Président : M. Amir Abdessamad, Professeur à l'Université de Mostaganem  
Rapporteurs : M. Kechar Bou abdellah, Professeur à l'Université d'Oran  
M. Karim Sehaba, MCA à l'Université de Mostaganem  
Co-Directeurs : M. Claude Duvallat, MCF à l'Université du Havre Normandie  
M. Ahmed Medeghri, Professeur à l'Université de Mostaganem





*Je dédie ce travail à :*  
*Mes parents,*  
*Mes frères,*  
*Mes amis, mes collègues et à toute ma famille.*



# Remerciements

Citer toutes les personnes ayant rendu ce travail possible est sans doute difficile autant que la rédaction de la thèse elle-même. Mais, c'est avec une immense joie que j'affronte cette difficulté et consacre ces quelques lignes pour exprimer mes sincères remerciements à celles et ceux qui m'ont encouragé et soutenu tout au long de ces années. Vous étiez nombreux à m'accompagner tout au long de cette aventure :

Tout d'abord, j'aimerais exprimer ma grande reconnaissance et gratitude à mes directeurs de thèse, monsieur Claude DUVALLET et M. Ahmed MEDEGHRI, pour la confiance qu'ils m'ont accordée en acceptant d'encadrer ce travail de recherche, pour leurs précieux conseils et pour toutes les heures qu'ils ont consacrées à diriger cette recherche. J'ai été extrêmement sensible à leurs qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail doctoral. Leurs encouragements m'ont permis de surmonter les moments difficiles.

Je remercie les Professeurs M. Amir Abdessamad, M. Kechar Bou abdellah et M. Karim Sehaba pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'être les rapporteurs de cette thèse. Je souhaite remercier aussi M. Fouad HENNI de m'avoir également fait l'honneur d'accepter de participer au jury de cette thèse.

J'adresse aussi mes remerciements à tous les thésards de l'université de Mostaganem ainsi que l'université de Normandie pour la bonne ambiance de travail mais également pour les nombreux bons moments passés ensemble.

A titre plus personnel, je tiens à témoigner ma reconnaissance à mes parents et mes proches, qui ont toujours cru en moi et qui m'ont soutenu dans ce projet de thèse et tout au long de ces nombreuses années d'étude.

Ce travail est évidemment dédié à toutes les personnes qui me sont chères.



# Résumé

Au cours des dernières années, les véhicules sont devenus de plus en plus communicants, grâce notamment, aux nouvelles normes de communication sans fils, particulièrement le standard DSRC et C-ITS. C'est à partir de ces capacités dont seront dotés les véhicules, qu'il est possible d'envisager la communication inter-véhiculaire (IVC) et/ou la communication avec des éléments d'infrastructure (I2X). Un nouveau courant de recherche autour des réseaux véhiculaires, plus connu en anglais sous le nom de VANET (Vehicular Ad hoc NETWORK), est apparu. Les principaux travaux concernent des problématiques de routage et de dissémination des données à travers le réseau. Les travaux menés dans le cadre de cette thèse se focalisent sur la prise en compte des contraintes temporelles dans les réseaux véhiculaires (VANET). En effet, de nombreuses applications devront permettre de respecter les contraintes temporelles des traitements effectués à partir des données récoltées par les véhicules ou par les éléments d'infrastructure. Par ailleurs, les données récoltées au sein des véhicules sont des données extrêmement volatiles qui représentent l'état du véhicule ou de son environnement à un instant  $t$ . Après un certain temps, l'environnement ayant changé, ces données ne représentent plus l'état de l'environnement et peuvent donc être considérées comme obsolètes. On parle dans ce cas de données temps réel et on rejoint des problématiques de gestion de ce type de données. Dans cette thèse, après une présentation des principaux concepts de réseaux véhiculaires et de l'état de l'art des approches de dissémination de données, nous proposons une nouvelle approche de dissémination de données, basée sur le Clustering. Cette approche, désignée par le nom *FitnessClustering*, permet de diffuser de manière efficiente les messages d'une ou de plusieurs source(s) vers les nœuds présents dans une zone calculée (appelé zone de couverture) en fonction du type et de la durée de vie de l'événement à disséminer. L'algorithme *FitnessClustering* est basé sur une fonction appelée *Fitness*, qui combine plusieurs paramètres ayant un impact direct sur la stabilité des clusters. C'est une fonction multi-objectif qui permet de garantir un meilleur compromis entre la stabilité, la surcharge du réseau et le taux de livraison pour les clusters produits. Notre contribution a été évaluée via des simulations intensives exécutées en utilisant un simulateur temps réel pour les mesures de performances.

**Mots-clés :** Réseaux véhiculaires; Systèmes temps réel; Données Temps Réel; Qualité de Service; Dissémination d'information, Clustering.

## مُلخَص

خلال السنوات الأخيرة ، أصبحت المركبات تتمتع بإمكانية التواصل أكثر فأكثر ، وذلك بفضل معايير الاتصالات اللاسلكية الجديدة، ولا سيما معايير DSRC و C-ITS. انطلاقاً من هذه القدرات ، سيتم تجهيز المركبات لتتمكن من التواصل فيما بينها (IVC) أو/و تتواصل مع عناصر البنية التحتية (I2X) وقد ظهر حديثاً اتجاه جديد للبحث حول شبكات المركبات المعروف بفانيت (الشبكات المخصصة للمركبات). تتعلق الأبحاث الرئيسية في هذا المجال بمشاكل توجيه البيانات ونشرها عبر الشبكة. في بحثنا هذا، نركز العمل على مراعاة القيود الزمنية في الشبكات المخصصة للمركبات (VANET) ففي الواقع، سيتعين على العديد من التطبيقات السماح باحترام القيود الزمنية للمعالجات التي يتم إجراؤها البيانات التي يتم تجميعها من المركبات أو من عناصر البنية التحتية. علاوة على ذلك، فإن البيانات التي يتم تجميعها داخل المركبات هي بيانات غير دقيقة ومتغيرة باستمرار كونها تمثل حالة السيارة أو بيئتها في لحظة ما. بعد فترة، ما ان تتغير البيئة ، هذه البيانات لن تمثل حالتها ، وبالتالي تصبح بلا قيمة. في هذه الحالة، نحن نتحدث عن بيانات في الوقت الفعلي ومنه سنضيف إشكالية إدارة هذا النوع من البيانات. في هذه الرسالة ، وبعد تقديم المفاهيم الرئيسية لفانيت وأحدث أساليب نشر البيانات ، نقترح نهجاً جديداً لنشر البيانات ، استناداً إلى التجميع ، وهذا النهج ، المشار إليه باسم *FitnessClustering* يسمح ببث الرسائل بطريقة فعالة من مصدر واحد أو أكثر إلى العقد الموجودة في منطقة محسوبة (تسمى منطقة التغطية) بناءً على نوع الحدث المراد نشره ومدته. خوارزمية *FitnessClustering* مبنية على دالة تسمى *Fitness* والتي تجمع العديد من العوامل ذات التأثير المباشر على استقرار التجمعات. وهي دالة متعددة الأهداف تضمن أفضل حل يوافق ما بين الاستقرار، التكاليف العامة للشبكة ، ومعدل التسليم للمجمعات المنتجة. تم تقييم مساهمتنا من خلال عمليات المحاكاة المكثفة التي تم إجراؤها باستخدام محاكي الوقت الفعلي لقياسات الأداء.

**الكلمات المفتاحية:** شبكات المركبات، الوقت الفعلي، البيانات الفعلية، نوعية الخدمة، نشر المعلومات، التجميع.

# Abstract

In recent years, vehicles become more interconnected, thanks in particular to the new wireless communication standards, particularly the DSRC and C-ITS standards. Enabling these capabilities that the vehicles will be equipped, that it is possible to envisage inter-vehicular communication (IVC) and / or communication with infrastructure elements (I2X). A new research trend around vehicular networks, better known in english as VANET (Vehicular Ad hoc NETWORK), has appeared. The main works concern routing and data dissemination problems across the network. The carried works of this thesis focus on taking into account temporal constraints in VANET. Indeed, many applications will have to allow respecting the temporal constraints of the processes carried out from the collected data by the vehicles or by the elements of infrastructure. In our work, we will explore the consideration of temporal constraints in VANET. Indeed, many applications will have to allow respecting the temporal constraints of the treatments carried out from the data collected by the vehicles or by the elements of infrastructure. Moreover, the collected data by vehicles are extremely volatile that represent the vehicle's state or its environment at a time  $t$ . After a while, the environment has changed, these data no longer represent the environment's state and can therefore be considered obsolete. In this case, we are talking about real-time data and we join this type of data management issues. In this thesis, after presenting the main concepts for VANETs and the state of the art of data dissemination approaches, we propose a new approach for real-time data dissemination, based on Clustering. This approach (referred by *FitnessClustering*) deliver efficiently messages from one or more sources to nodes in a calculated area (called covered region) based on type and duration of the event to be disseminated. The *FitnessClustering* algorithm is based on a *Fitness* function, which combines several parameters that have a direct impact on cluster stability. *Fitness* is a multi-objective function that guarantees a better compromise between stability, network overhead and the delivery rate for the clusters produced. Our contribution was evaluated through intensive simulations by using a real-time simulator for performance measurements.

**Keywords :** VANET ; Real-Time systems ; Real-Time data ; Quality of service ; Information dissemination ; Clustering.



# Table des matières

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Remerciements</b>  | <b>V</b>    |
| <b>Table des matières</b>   | <b>XI</b>   |
| <b>Liste des figures</b>  | <b>XVII</b> |
| <b>Introduction générale</b>  | <b>1</b>    |
| <br>  |             |
| <b>I Étude de l'existant et contexte</b>  | <b>7</b>    |
| <br>  |             |
| <b>1 Les réseaux véhiculaires</b>   | <b>9</b>    |
| 1.1 Introduction . . . . .  | 9           |
| 1.2 Composants d'un réseau véhiculaire . . . . .  | 10          |
| 1.3 Caractéristiques des réseaux véhiculaires . . . . .                                     | 15          |
| 1.4 Catégories des applications . . . . .   | 16          |
| 1.5 Modes de communication . . . . .  | 18          |
| 1.6 Technologies d'accès . . . . .  | 22          |
| 1.6.1 Zigbee pour les réseaux véhiculaires . . . . .  | 23          |
| 1.6.2 Bluetooth . . . . .   | 23          |
| 1.6.3 Wi-Fi (802.11) . . . . .  | 24          |
| 1.6.4 WiMax (802.16) . . . . .  | 25          |
| 1.6.5 UMTS . . . . .  | 26          |
| 1.6.6 LTE-Adv (3G/4G) . . . . .   | 27          |
| 1.7 Travaux de standardisation et de normalisation . . . . .                                | 28          |
| 1.7.1 Communication dédiée à courte portée (DSRC) . . . . .                                 | 28          |
| 1.7.2 IEEE 802.11p . . . . .  | 30          |
| 1.7.3 Normes des systèmes de transport intelligents coopératifs en Europe (C-ITS) . . . . . | 31          |
| 1.7.3.1 Technologies d'accès . . . . .  | 34          |
| 1.7.3.2 Réseau et transport . . . . .   | 35          |
| 1.7.3.3 Couche service . . . . .  | 38          |
| 1.7.3.3.1 Messages de sensibilisation coopérative . . . . .                                 | 38          |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 1.7.3.3.2 | Messages de notification environnementale décentralisée . . . . .                                | 43        |
| 1.7.3.4   | Couche application . . . . .   | 45        |
| 1.7.4     | Fréquences C-ITS . . . . .   | 46        |
| 1.7.5     | C-ITS vs DSRC . . . . .  | 49        |
| 1.8       | Applications et simulateurs . . . . .  | 50        |
| 1.8.1     | Simulateurs de réseaux . . . . .   | 51        |
| 1.8.2     | Simulateurs de trafic routier . . . . .  | 53        |
| 1.8.3     | Consortium et projets . . . . .  | 58        |
| 1.8.3.1   | Le consortium Car2Car (C2C-CC) . . . . .   | 58        |
| 1.8.3.2   | Le consortium CAMP-VSC3 . . . . .  | 59        |
| 1.8.3.3   | Projets R&D . . . . .  | 60        |
| 1.9       | Problématiques de recherche . . . . .  | 65        |
| 1.9.1     | Routage de l'information . . . . .   | 65        |
| 1.9.2     | Travaux de standardisation . . . . .   | 65        |
| 1.9.3     | Développement de protocoles liés à la sécurité de données . . . . .                              | 66        |
| 1.9.4     | Utilisation des services de Cloud . . . . .  | 66        |
| 1.9.5     | Développement de systèmes de gestion du trafic pour le traitement de données sensibles . . . . . | 66        |
| 1.9.6     | Gestion et stockage de données . . . . .   | 67        |
| 1.9.7     | Coopération avec d'autres réseaux . . . . .  | 67        |
| 1.9.8     | Dissémination de données . . . . .   | 68        |
| 1.10      | Conclusion . . . . .   | 68        |
| <b>2</b>  | <b>Dissémination de l'information dans les réseaux véhiculaires</b>                              | <b>71</b> |
| 2.1       | Introduction . . . . .   | 71        |
| 2.2       | Paramètres pris en compte dans la dissémination de données . . . . .                             | 71        |
| 2.2.1     | Notion de qualité de service . . . . .   | 72        |
| 2.2.2     | Notion de priorité . . . . .   | 73        |
| 2.2.3     | Notion de temps réel . . . . .   | 73        |
| 2.3       | Techniques de dissémination de l'information dans les réseaux véhiculaires . . . . .             | 73        |
| 2.3.1     | Dissémination opportuniste . . . . .   | 74        |
| 2.3.2     | Dissémination géographique . . . . .   | 74        |
| 2.3.3     | Dissémination pair à pair (P2P) . . . . .  | 74        |
| 2.3.4     | Dissémination par agrégation de données . . . . .  | 75        |
| 2.3.5     | Routage de l'information . . . . .   | 75        |
| 2.3.6     | Dissémination par clusterisation . . . . .   | 76        |
| 2.3.7     | Synthèse sur les techniques de dissémination . . . . .   | 76        |
| 2.4       | Dissémination de l'information dans les réseaux véhiculaires . . . . .                           | 76        |
| 2.4.1     | Approches Opportunistes . . . . .  | 77        |
| 2.4.1.1   | Approche de Zhong et al. . . . .   | 77        |
| 2.4.1.2   | Approche de Goel et al. . . . .  | 79        |
| 2.4.1.3   | Approche de Nair et al. . . . .  | 80        |
| 2.4.1.4   | Approche de Rehman et al. . . . .  | 83        |
| 2.4.1.5   | Approche de Sedjelmaci et al. (oDHVN) . . . . .  | 85        |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 2.4.1.6 | Approche de Kerrache et al. . . . .  | 87  |
| 2.4.1.7 | Synthèse des approches opportunistes . . . . .                                     | 88  |
| 2.4.2   | Méthodes de routage . . . . .  | 88  |
| 2.4.2.1 | Le protocole GPCR (Greedy Perimeter Coordinator Routing)                           | 88  |
| 2.4.2.2 | Le protocole VADD (Vehicle-Assisted Data Delivery Routing)                         | 89  |
| 2.4.2.3 | Le protocole ROMSGP (Receive On Most Stable Group-Path Routing Protocol) . . . . . | 89  |
| 2.4.2.4 | Le protocole AODV (On Demand Distance Vector) . . . . .                            | 89  |
| 2.4.2.5 | Le protocole DSR (Dynamic Source Routing) . . . . .                                | 90  |
| 2.4.2.6 | Le protocole DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector)                          | 91  |
| 2.4.2.7 | Le protocole GSR (Global State Routing) . . . . .                                  | 91  |
| 2.4.2.8 | Le protocole OLSR (Optimized Link State Routing) . . . . .                         | 92  |
| 2.4.3   | Méthodes de clusterisation dans les réseaux véhiculaires . . . . .                 | 92  |
| 2.4.3.1 | Classification des méthodes de clusterisation . . . . .                            | 93  |
| 2.4.3.2 | Méthodes de clusterisation dans les réseaux véhiculaires . . . . .                 | 98  |
| 2.4.3.3 | Synthèse sur les travaux de clusterisation . . . . .                               | 100 |
| 2.4.4   | Défis liés à la dissémination de données . . . . .                                 | 102 |
| 2.5     | Conclusion . . . . .   | 103 |

## **II Contribution 104**

### **3 Une nouvelle approche de clusterisation pour la dissémination de données dans les réseaux véhiculaires 106**

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 3.1  | Introduction . . . . .                         | 106 |
| 3.2  | Contraintes prises en compte . . . . .         | 107 |
| 3.3  | Fonctionnement général de l'approche . . . . . | 109 |
| 3.4  | Optimisation des messages . . . . .            | 110 |
| 3.5  | Calcul de la zone de couverture . . . . .      | 112 |
| 3.6  | Formation des clusters . . . . .               | 114 |
| 3.7  | Découverte des clusters voisins . . . . .      | 121 |
| 3.8  | Maintenance des clusters . . . . .             | 121 |
| 3.9  | Routage de l'information . . . . .             | 122 |
| 3.10 | Conclusion . . . . .                           | 130 |

### **4 Simulations et résultats 132**

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.1   | Introduction . . . . .  | 132 |
| 4.2   | Outils de simulation . . . . .  | 133 |
| 4.3   | Scénario de simulation . . . . .  | 134 |
| 4.4   | Paramètres de simulation . . . . .  | 134 |
| 4.5   | Métriques d'évaluation . . . . .  | 135 |
| 4.6   | Résultats obtenus . . . . .   | 139 |
| 4.6.1 | Évaluation des paramètres de la fonction <i>FitnessClustering</i> . . . . . | 139 |
| 4.6.2 | Analyse des performances des algorithmes et comparaison des résultats       | 141 |
| 4.7   | Conclusion . . . . .  | 154 |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| <b>III Conclusion générale</b> | <b>156</b> |
| Bilan et conclusion            | 157        |
| Perspectives                   | 158        |



# Liste des figures

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 1.1  | Exemple de réseau véhiculaire. . . . .  | 11  |
| 1.2  | Exemple de véhicule intelligent. . . . .  | 13  |
| 1.3  | Conception en blocs logiques pour un appareil OBU entièrement intégrable [Petracca et al., 2012]. . . . .   | 14  |
| 1.4  | Composants du système V2V2I et fonctionnalités [Mojela and Booyesen, 2013].   | 25  |
| 1.5  | Pile protocolaire du standard DSRC. . . . .   | 29  |
| 1.6  | Pile protocolaire et normes de base pour C-ITS (Version européenne n°1) [The European Telecommunications Standards Institute ETSI, 2010; Festag, 2014]. | 33  |
| 1.7  | Les algorithmes de transfert avancés [Festag, 2014]. . . . .  | 37  |
| 1.8  | Structure des messages CAM [The European Telecommunications Standards Institute ETSI, 2010]. . . . .  | 39  |
| 1.9  | Spécification des messages CAM. . . . .   | 40  |
| 1.10 | Structure des messages CAM ETSI EN 302 637-2 [Festag, 2014]. . . . .  | 41  |
| 1.11 | Règles de génération des messages CAM (ETSI EN 302 637-2) [Festag, 2014].   | 42  |
| 1.12 | Format des messages DENM [Festag, 2014; Kerrache et al., 2016]. . . . .   | 44  |
| 1.13 | Fréquences C-ITS. . . . .   | 47  |
| 1.14 | Structure d'un environnement de simulation de réseaux véhiculaires. . . . .   | 51  |
| 1.15 | Schéma de génération d'un modèle de mobilité. . . . .   | 56  |
| 1.16 | Architecture des protocoles de communication du système Car2Car [Baldessari et al., 2007]. . . . .  | 59  |
| 2.1  | Classifications des méthodes de Clustering. . . . .   | 97  |
| 3.1  | Shéma général de l'approche proposée. . . . .   | 107 |
| 3.2  | Composants des systèmes. . . . .  | 108 |
| 3.3  | Processus général de la dissémination de données dans notre approche. . . .   | 111 |
| 3.4  | Processus d'optimisation des messages. . . . .  | 112 |
| 3.5  | zone de couverture. . . . .   | 113 |
| 3.6  | Élection des chefs de clusters ( <i>CH</i> ). . . . .   | 120 |
| 3.7  | Exemple de schéma de l'algorithme <i>FitnessClustering</i> . . . . .  | 129 |
| 4.1  | Architecture en bloc du simulateur VanetSim [Tomandl et al., 2014]. . . . .   | 134 |
| 4.2  | Carte utilisée dans la simulation (Ville de Berlin). . . . .  | 135 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 4.3  | Nombre normalisé de clusters générés. . . . .                                      | 142 |
| 4.4  | Durée de vie normalisée des <i>CH</i> (%). . . . .                                 | 143 |
| 4.5  | Durée de vie normalisée des <i>SCH</i> (%). . . . .                                | 144 |
| 4.6  | Durée de vie normalisée des membres de clusters ( <i>MN</i> ) (%). . . . .         | 145 |
| 4.7  | Durée de vie normalisée des seconds membres de clusters ( <i>SM</i> ) (%). . . . . | 145 |
| 4.8  | Durée de vie normalisée d'un rôle de nœud (%). . . . .                             | 146 |
| 4.9  | Temps normalisé de formation de clusters. . . . .                                  | 147 |
| 4.10 | Temps normalisé de maintenance de clusters. . . . .                                | 148 |
| 4.11 | Temps normalisé de routage. . . . .  | 148 |
| 4.12 | Nombre moyen de nœuds orphelins par rapport à la densité. . . . .                  | 149 |
| 4.13 | Nombre moyen de nœuds orphelins par rapport à la mobilité. . . . .                 | 150 |
| 4.14 | Fréquence moyenne de déconnexion des membres de clusters. . . . .                  | 151 |
| 4.15 | Surcharge moyenne du réseau (Overhead). . . . .                                    | 152 |
| 4.16 | Taux de livraison moyen des messages. . . . .                                      | 153 |
| 4.17 | Taux moyen de livraison versus l' <i>AVI</i> du message d'urgence généré. . . . .  | 154 |

# Liste des tableaux

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 1.1 | Applications de sécurité dans les réseaux véhiculaires. . . . .                                     | 19  |
| 1.2 | Applications de services publiques dans les réseaux véhiculaires. . . . .                           | 20  |
| 1.3 | Applications de conduite assistée dans les réseaux véhiculaires. . . . .                            | 20  |
| 1.4 | Applications liées aux activités commerciales dans les réseaux véhiculaires. .                      | 21  |
| 1.5 | Tableau comparatif entre C-ITS et DSRC. . . . .   | 50  |
| 1.6 | Synthèse sur les différents simulateurs de réseaux. . . . .   | 52  |
| 1.7 | Synthèse sur les différents simulateurs de trafic routier. . . . .                                  | 54  |
| 1.8 | Synthèse sur les différents simulateurs des réseaux véhiculaires. . . . .                           | 57  |
| 1.9 | Synthèse sur les différents projets ITS. . . . .  | 64  |
| 2.1 | Synthèse sur les techniques de dissémination de données dans les réseaux vé-<br>hiculaires. . . . . | 95  |
| 2.2 | Synthèse des travaux existants. . . . .   | 96  |
| 2.3 | Synthèse sur les travaux de clusterisation. . . . .   | 101 |
| 3.1 | Codes des évènements relatifs au trafic routier. . . . .  | 108 |
| 3.2 | Message optimisé. . . . .   | 112 |
| 3.3 | Structure des messages "Hello". . . . .   | 115 |
| 4.1 | Paramètres et valeurs des modèles de simulation. . . . .  | 136 |
| 4.2 | Évaluation des paramètres de la fonction <i>Fitness</i> . . . . .                                   | 141 |

# Introduction générale

---

## 1 Contexte

Plusieurs objets connectés sont apparus ces dernières années dans divers domaines et sont en pleine expansion pour être appliqués dans d'autres domaines. Cet enthousiasme pour les objets connectés connu plus souvent sous le nom d'Internet des objets (en anglais Internet of Things (IoT)) concerne particulièrement le secteur automobile. En s'inspirant de ces initiatives, des véhicules connectés sont apparus.

L'engouement pour le développement de technologies de pointe permettant de créer des voitures quasi-autonomes a augmenté ces dernières années, afin de garantir une conduite plus sûre dans les zones urbaines. De nombreux dispositifs récents ont été intégrés dans le système de pilotage automatique des véhicules, tels que des outils de navigation, des caméras, un système de traitement des informations, etc., pour construire ce que l'on appelle des "véhicules intelligents ou Smart Vehicles". Ces véhicules sont également équipés de dispositifs de communication récents et de télédétection [[Dimitrakopoulos, 2011](#)].

Parallèlement à ces développements, le standard 802.11p a été développé pour faciliter les tâches de communication [[IEEE 802.11 Working Group, 2010](#)]. Ce standard est la nouvelle

norme permettant d'activer l'accès sans fil dans l'environnement des réseaux véhiculaires (en anglais Vehicular Ad Hoc Networks (VANET)). Ces derniers sont considérés comme étant une classe très importante des réseaux mobiles (ou MANET pour Mobile Ad Hoc Networks).

Les services existants dans les réseaux véhiculaires sont proposés pour répondre aux demandes croissantes des systèmes de transport intelligents (STI), afin de garantir la sécurité des personnes, la fluidité du trafic, l'assistance au conducteur ... Ces derniers proposent des services de communication ainsi que des applications d'information et de divertissement. De nombreux travaux récents ont été réalisés durant les dernières années pour les réseaux véhiculaires [Kumar and Verma, 2015], [Cooper et al., 2017]. Ces travaux concernent en grande partie les protocoles de routage, qui sont considérés comme étant le domaine le plus actif. Ces protocoles peuvent être classés en quatre types de protocoles en fonction du mode de communication utilisé (unicast, broadcast, multicast et géocast) [Da Cunha et al., 2014].

D'autres travaux consistent à déployer une infrastructure sécurisée, en développant des protocoles MAC basés sur la sécurité [Mejri et al., 2014], et en fusionnant les applications véhiculaires avec des applications de Cloud de manière sécurisée, tout en respectant la vie privée des utilisateurs qui utilisent ces applications [Whaiduzzaman et al., 2014].

Dans ce manuscrit de thèse, nous concentrons notre étude sur la diffusion de messages d'urgence dans les réseaux véhiculaires (Critical Safety Awareness), en prenant en compte l'aspect temps réel [Benkerdagh and Duvallet, 2019]. La dissémination des informations avec une grande précision dans les réseaux véhiculaires fait partie des domaines de recherche les plus actifs [Chen et al., 2011b]. Plusieurs pistes de recherche pour la dissémination de données sont à explorer, notamment après l'intégration de la technologie LTE dans les réseaux véhiculaires [Ucar et al., 2016], la normalisation du protocole DSRC [Lee et al., 2016] et la possibilité de coopération avec les réseaux SDN [Ku et al., 2014] et TETRA [Umer et al., 2018]. Ce domaine de recherche est très important en raison de la nature des données échangées et de la topologie des réseaux de véhicules.

## 2 Problématique

Malgré les progrès réalisés au cours de ces dernières années dans ces domaines, de nombreux défis peuvent être soulevés en raison de la nature des réseaux véhiculaires. La caractéristique la plus étudiée pour ce genre de réseaux est la forte mobilité, qui cause souvent des troubles de la communication. D'un autre côté, les données collectées sur le véhicule font référence à des événements survenus au bord de la route ou dans l'environnement interne du véhicule. Ce dernier subit des changements fréquents en terme de topologie. Cela signifie que nous parlons d'événements très volatiles. Le processus général d'acquisition, de traitement et de transmission de ces données doit donc se faire dans un délai très court. Par conséquent, tous ces processus doivent être exécutés en fonction de la validité des données concernées et des portées de transmission.

Les mécanismes de clustering font partie des techniques les plus efficaces utilisées dans un réseau dynamique à grande échelle. Ces derniers permettent une organisation hiérarchique du réseau pour faciliter les différents traitements requis, principalement pour la phase de routage, afin de procurer une allocation optimale de la bande passante, une meilleure gestion et partage de ressources [Lee and Jeong, 2011].

Les mécanismes de clustering sont de plus en plus utilisés dans les réseaux à grande échelle pour minimiser la surcharge du réseau et éviter une tempête de diffusion (Broadcast Storm) [Dong et al., 2017]. Ces difficultés limite les performances des protocoles CBRP existants (Cluster Based Routing Protocol) [Kim, 2018].

Les méthodes de clustering existantes dans les réseaux véhiculaires sont basées sur un paramètre clé pour former des clusters, et visent généralement un objectif tel que la réduction de la surcharge réseaux (Overhead), le délai de communication, le taux de livraison, etc. L'utilisation d'un paramètre clé conduit à une perte de la fiabilité des communications au sein d'un cluster, et donc la perte de certaines données critiques, en particulier pour la diffusion des messages d'alerte émis lors d'une situation d'urgence. Des protocoles de clustering ont

été proposés dans les réseaux véhiculaires [Sood and Kanwar, 2014] dans le but d'améliorer la qualité des processus de dissémination.

La majorité des méthodes de Clustering proposées pour les réseaux mobiles (MANET) se concentrent sur l'aspect énergétique, les déplacements de nœuds et la localisation des objets externes [Boonsongsrikul et al., 2013; Drishya and Vijayakumar, 2019] tandis que dans les réseaux véhiculaires, la grande mobilité est l'aspect le plus étudié, car elle influence la topologie du réseau qui est de nature très dynamique. Par conséquent, la découverte de routes stables pour la transmission de données est un concept clé pour les réseaux véhiculaires. Un autre paramètre à prendre en compte est la densité du réseau, qui subit fréquemment des modifications. En plus des points discutés ci-dessus, la fraîcheur des données doit être prise en compte. Chaque information doit être délivrée avant d'atteindre son échéance. Par exemple, lorsqu'un accident se produit, une alerte rapide doit être générée et diffusée au service de secours le plus proche et aux véhicules voisins, afin de réagir à temps et d'éviter des dommages supplémentaires. Dans ce cas, le message d'alerte doit être abrégé et acheminé correctement. Dans ce contexte, nous avons proposé une nouvelle approche de Clustering qui prend en compte toutes ces contraintes.

### 3 Objectifs et contributions

Les principal objectif de nos recherches est de développer des approches de dissémination qui :

- Assurent la livraison de données critiques avant d'atteindre leurs échéances, ces données peuvent être très volatiles,
- Couvrent seulement les zones de pertinence, afin de réduire l'utilisation de la bande passante, et pour pallier au problème des tempêtes de diffusion, et donc minimiser la perte d'informations.

Dans ce contexte, nous avons proposé une nouvelle approche, basée sur différentes contraintes pour le traitement de données critiques en utilisant la communication véhicule à véhicule

(V2V). Pour atteindre ces objectifs, nous avons envisagé l'utilisation de deux mécanismes (ou techniques) d'optimisation et de clustering. Le premier mécanisme permet de réduire le nombre de paquets échangés. Il s'agit d'un protocole d'optimisation dans lequel, au lieu d'échanger des messages entiers, les véhicules échangent des codes agrégés avec d'autres données appropriées. Dans cette phase, un code est diffusé à la place du corps de message (qui est plus souvent un texte) et encapsulé dans un message optimisé.

La seconde étape consiste en une approche de clustering (CBRP), qui prend en compte de nombreux paramètres, tels que le délai de transmission de bout en bout et la fraîcheur des données. Au cours de cette phase, les véhicules se regroupent en utilisant leur propre *Fitness* calculée, qui dépend de quatre paramètres ayant un impact direct sur la stabilité des clusters. En plus de ces mécanismes, l'algorithme RTAA\* (A\* adaptatif au temps réel) [Koenig and Likhachev, 2006] est utilisé pour acheminer des données entre clusters au lieu de l'algorithme classique A\*.

Les performances de cette heuristique temps réel sont supérieures à celles des algorithmes classiques [Koenig and Likhachev, 2006]. La nouveauté de l'approche proposée consiste à trouver un compromis entre le délai de livraison et la perte de données, en utilisant une combinaison de paramètres calculés et prédits, afin d'assurer une stabilité pour les clusters et une livraison rapide des données.

## 4 Organisation de la thèse

D'un point de vue organisationnel, le reste de la thèse s'articule autour de cinq chapitres. Le chapitre 1 présente les principaux concepts des réseaux véhiculaires, les caractéristiques primordiales de ce type de réseaux, les catégories d'applications impliquées pour le bon fonctionnement des systèmes de transport intelligents, et les modes de communication indispensables pour la diffusion de données. Pour relier les segments déconnectés, différentes technologies de réseaux sans fil peuvent être utilisées, comme la technologie LTE. Les travaux de standardisation visent à définir les normes de connexion utilisées pour la dissémination

d'informations. Deux normes principales sont discutées dans ce chapitre (DSRC et C-ITS). Les différents axes de recherche portant sur des thématiques relatives aux réseaux véhiculaires sont explorés.

Le chapitre 2 présente un état de l'art sur les méthodes de dissémination de données dans les réseaux véhiculaires. Dans ce chapitre, les paramètres pris en compte pour la diffusion des informations dans les réseaux véhiculaires sont détaillés. Les techniques de disséminations de données sont répertoriées en six classes. Chaque type de techniques est détaillé dans une section. Les travaux les plus pertinents réalisés dans l'état de l'art sont discutés dans ce chapitre. Une étude synthétique a été faite pour chaque catégorie de techniques, afin de donner un aperçu général sur ces dernières et de pouvoir les comparer. Avant de conclure ce chapitre, les défis majeurs de la dissémination de données ont été adressés.

Dans le chapitre 3, l'approche proposée a été discutée. Au début, le fonctionnement général de cette dernière est expliqué, puis chaque étape est détaillée à part. Dans cette approche, une phase d'optimisation des messages est exécutée avant la diffusion de ces derniers. Ceci a pour but de réduire le nombre de paquets transmis et donc d'améliorer l'utilisations des canaux de transmission. La deuxième partie de cette approche, est une approche de Clustering basée sur l'utilisation d'une fonction multi-objectif appelée *Fitness*. Une phase de routage est également proposée pour relayer les paquets de manière optimisée.

Le chapitre 4 détaille le processus de simulation et présente les résultats obtenus. Les outils de simulation utilisés ont été décrits pour permettre une reproduction des scénarios simulés. Plusieurs valeurs de paramètres pour l'approche *FitnessClustering* ont été évalués. Différentes métriques ont été considérées pour donner des conclusions crédibles.

En fin, nous concluons notre thèse par un bilan général sur notre contribution. Et nous enchaînons par un ensemble de perspectives qui s'offrent à l'issue de l'approche développée.

# Première partie

## Étude de l'existant et contexte



# Les réseaux véhiculaires

## 1.1 Introduction

Les données, concernant le trafic routier, sont essentielles pour le déploiement des systèmes de transport intelligents (STI). L'avènement des nouvelles technologies de communication et de l'information offre un potentiel important pour l'acquisition et la transmission des informations liées à la mobilité. L'évolution rapide de ces technologies est très prometteuse, mais elle comporte également des risques associés à la gestion de grandes quantités de données. Les technologies de télécommunications permettent de récolter un grand nombre d'informations. Dans un réseau véhiculaire, ces dernières doivent être diffusées et acheminées entre les nœuds. Pour ce faire, plusieurs protocoles de routage et approches de dissémination ont été développés. Ces approches sont testées et validées par des simulateurs de réseaux.

La congestion du trafic routier est devenue une partie de notre vie quotidienne pour la plupart d'entre nous. Une manière possible de prévenir les congestions est de développer des systèmes de dissémination de l'information du trafic routier entre les véhicules. Une meilleure connaissance de l'environnement peut en effet aider à trouver la meilleure route. De plus, cela peut aussi contribuer à améliorer la sécurité routière.

La communication entre véhicules peut par exemple être utilisée pour aider à la conduite et proposer des services de sécurité active comme les alertes pour les accidents, le trafic temps réel, etc. Les systèmes de dissémination des messages dans les réseaux véhiculaires (VANET ou Vehicular Ad-Hoc Networks) [Fasbender et al., 2012] ont un potentiel important dans la réduction des accidents de la circulation routière. Les messages échangés dans les réseaux véhiculaires peuvent transporter des informations avertissant d’une situation d’urgence, ou aidant à la prise de décision dans le but d’avoir un trafic plus fluide. La communication de véhicule-à-véhicule (V2V), représentative des réseaux véhiculaires, permet la mise en œuvre de nouveaux services pour les véhicules et crée de nombreuses opportunités pour améliorer la sécurité routière.

Lors de la conception des systèmes basés sur les réseaux véhiculaires, il est nécessaire de prendre en compte les caractéristiques de ce type de réseaux. Plusieurs travaux de recherche ont proposé des protocoles de dissémination des messages, en utilisant différentes techniques de propagation des informations. Cependant, ces nouveaux services pour les réseaux de véhicules posent beaucoup de défis technologiques. Les travaux de recherche dans ce domaine sont donc en pleine expansion.

Les réseaux véhiculaires constituent une nouvelle forme de réseaux Ad-Hoc mobiles (MANET) [Fasbender et al., 2012]. Cette catégorie de réseau permet d’établir des communications entre véhicules ou bien avec une infrastructure située en bord de routes (cf. Figure 1.1). Par rapport à un réseau Ad-Hoc classique, les réseaux véhiculaires sont caractérisés par une forte mobilité des nœuds rendant la topologie du réseau fortement dynamique.

## 1.2 Composants d’un réseau véhiculaire

Pour la mise en place d’un tel réseau, certains équipements électroniques doivent être installés au sein des véhicules (cf. Figure 1.2), tel que les dispositifs de perception de l’environnement (radars, caméras), un système de localisation géographique (GPS), et bien sûr une plateforme de traitement [Hubaux et al., 2004].



FIGURE 1.1 : Exemple de réseau véhiculaire.

Le premier véhicule connecté au réseau routier était proposé en 2009 par l'Institut de recherche Infocomm à Singapour. Cette proposition est basée sur l'intégration d'un ordinateur à carte unique (**SBO** pour Single Board Computer). Cette dernière était équipée d'un processeur monopuce à 233 MHz, sur lequel une carte embarquée développée avec une interface CAN a été installée. La communication sans fil (WLAN) était intégrée par le biais d'une carte sans fil prenant en charge la norme **IEEE 802.11b**.

L'OBU<sup>1</sup> étant considéré comme le dispositif le plus important dans un véhicule intelligent, le développement de ce dernier doit répondre à certains besoins fonctionnels pour les réseaux véhiculaires parmi lesquels, on peut citer :

- La capacité de calcul : le noyau principal du système doit permettre le traitement local des données recueillies à partir de l'infrastructure routière ou par les dispositifs électro-

1. L'unité embarquée (ou l'OBU) est un dispositif installé dans les véhicules. Il autorise les communications DSRC avec d'autres OBU ou RSU.

niques du véhicule, tout en respectant les contraintes de temps afin que les applications temps réel puissent être exécutées par le dispositif embarqué ;

- La capacité de stockage : le système doit permettre de conserver un historique des événements traités, notifiés et communiqués à l’OBU à partir des unités de bord de route (Road Side Unit (RSU)), et les unités de contrôle électroniques (Electronic Control Unit (ECU)) ;
- La géolocalisation : le système embarqué dans un OBU doit être en mesure de communiquer sa propre position fourni par un GPS, pour répondre à des services de géolocalisation ;
- La communication sans fil : le système doit être équipé d’un ou plusieurs émetteurs-récepteurs sans fil pour permettre la communication avec l’infrastructure routière (communications V2I) et avec d’autres véhicules (communications V2V). L’adoption d’un adaptateur radio fréquence (RF (Radio Frequency adapter)) capable de communiquer via un réseau sans fil est obligatoire ;
- L’acquisition de données dans le véhicule : le système doit être capable d’acquérir des données, de manière plug-and-play, à partir de l’ECU du véhicule par le biais d’une communication CAN<sup>2</sup> conforme au protocole OBD-II<sup>3</sup> ;
- Des solutions matérielles à faible coût : l’OBU est destiné aux véhicules de basse / moyenne classe ; à cet égard, une bonne approche est l’intégration de composants matériels prêts à l’emploi (exemple : des unités de calcul programmables et polyvalentes) au lieu de la conception d’un nouvel dispositif.
- Le système d’exploitation : le système doit adopter des solutions logicielles open-source, telles que LinuxEmbedded<sup>4</sup>, en tant que système d’exploitation pour suivre une approche à faible coût, ouverte, flexible et modulaire ;

---

2. Le bus CAN (Control Area Network) est un moyen de communication série qui supporte des systèmes embarqués temps réel avec un haut niveau de fiabilité. Ses domaines d’application s’étendent des réseaux moyens débits aux réseaux de multiplexages faibles coûts. Il est avant tout à classer dans la catégorie des réseaux de terrain utilisée dans l’industrie.

3. L’interface OBD-II permet la lecture des codes d’anomalie (souvent connus sous le nom DTC pour Diagnostic Trouble Codes) standardisés, ou , générés par le système informatique embarqué, ainsi que les informations temps réel en provenance des capteurs connectés aux calculateurs de bord. La norme prévoit aussi l’effacement des DTC enregistrés par les calculateurs lorsque la maintenance est effectuée.

4. <http://www.linuxembedded.fr/> (Consulté en Aout 2018)

- La fiabilité de la communication : l'appareil doit pouvoir gérer les transferts via ses adaptateurs réseau ;

À partir des exigences citées précédemment, le diagramme en bloc de l'OBU, avec ses connexions logiques, peut être facilement représenté (cf. Figure 1.3). Il est principalement composé d'une unité de traitement connectée à des mémoires de stockage, des interfaces de communication sans fil, des interfaces de contrôle de véhicule, et d'un GPS. Ces dispositifs constituent les principaux composants d'un OBU. D'autres interfaces supplémentaires peuvent être installées pour des besoins spécifiques.

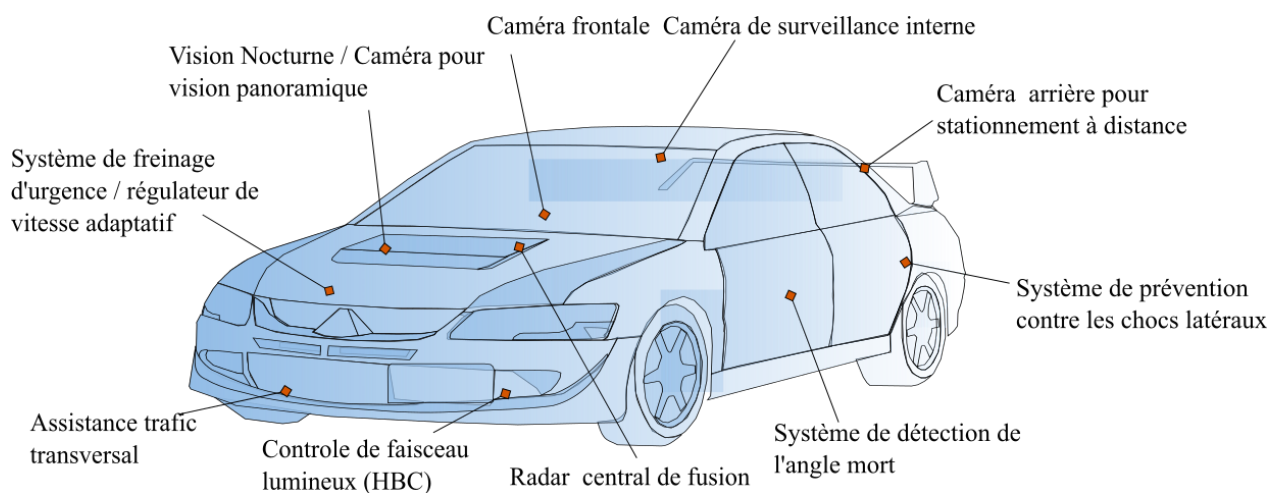


FIGURE 1.2 : Exemple de véhicule intelligent.

Les unités de bord de route (RSU) constituent de leurs côtés des dispositifs très importants pour la dissémination des informations dans les réseaux véhiculaires. Il s'agit d'un ensemble d'unités informatiques situés sur le bord de la route pour fournir un support de connectivité aux véhicules qui passent. La fonction principale de l'unité de bord de route est de faciliter la communication entre les véhicules et l'infrastructure de transport, et d'autres appareils en transférant les données par le biais du standard DSRC conformément aux normes de l'industrie. Les unités de bord de route peuvent également être intégrés à un système de

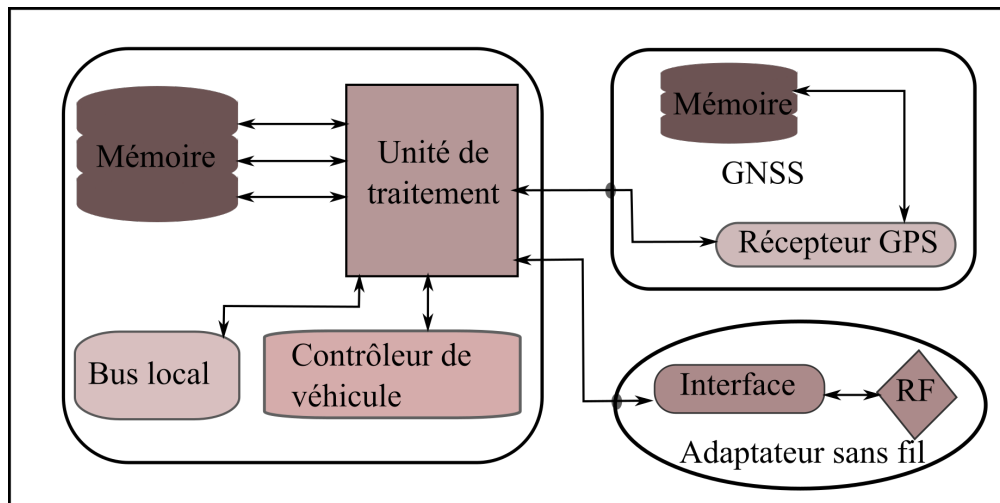


FIGURE 1.3 : Conception en blocs logiques pour un appareil OBU entièrement intégrable [Petracca et al., 2012].

backhaul<sup>5</sup> [Chundury, 2008] pour permettre une gestion à distance. Les unités de bord de route utilisent les informations collectées par les OBU de véhicules à proximité via la technologie DSRC afin d'acquérir les données de trafic nécessaires (par exemple le temps, la vitesse et l'emplacement des véhicules). Ces informations sont utilisées pour prévenir les véhicules de l'état du trafic routier (exemple : une probable congestion). L'information est ensuite diffusée à tous les véhicules qui se trouvent dans sa zone de couverture en utilisant le standard DSRC (cf. Section 1.7.1).

Les feux de circulation intelligents (STL ou Smart Traffic Lights en anglais) sont des systèmes de contrôle de circulation des véhicules qui combinent des informations de trafic avec un ensemble de capteurs dotés d'algorithmes d'intelligence artificielle (IA). Les feux de circulation intelligents ont pour rôle de gérer intelligemment le trafic des véhicules et des piétons. Cette technologie a été développée à l'Université Carnegie Mellon dans le cadre d'un projet pilote à Pittsburgh, pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> par les véhicules circulants dans la ville.

5. En télécommunications, un réseau **backhaul** est un réseau intermédiaire, permettant par exemple, l'émission et la réception de données entre un centre de radiodiffusion et une station terrestre d'un réseau satellitaire ou entre les équipements de raccordement d'abonnés (exemple : station de base) et le cœur des réseaux de télécommunication fixes ou mobiles

Les STL communiquent entre eux et s'adaptent aux conditions de circulation variables afin de réduire le temps que passent les voitures en mode passif. En utilisant des récepteurs vidéo à fibre optique similaires à ceux déjà utilisés dans les systèmes de contrôle dynamique, la nouvelle technologie surveille le nombre de véhicules et effectue des changements des temps de feu en temps réel pour éviter les encombrements dans la mesure du possible. Les premiers résultats de cette étude étaient encourageants : le temps passé par les automobilistes en mode passif a été réduit de 40% et les temps de déplacement à travers la ville ont été réduits de 25%.

### 1.3 Caractéristiques des réseaux véhiculaires

Les réseaux véhiculaires possèdent des caractéristiques spécifiques qui les distinguent des réseaux mobiles comme les réseaux de capteurs sans fil. Ces caractéristiques doivent être prises en compte lors de la conception des protocoles pour les réseaux véhiculaires. Dans cette partie, nous présentons quelques propriétés et contraintes concernant ce type de réseau :

- **La capacité énergétique et de stockage** : contrairement au contexte des réseaux de capteurs, où la contrainte d'énergie représente un défi pour les chercheurs, les éléments du réseau véhiculaire disposent de suffisamment d'énergie [Jerbi, 2008] pour alimenter les différents équipements électroniques d'une voiture intelligente. Par conséquent, les nœuds sont censés avoir une grande capacité de traitement et de stockage de données.
- **La topologie et la connectivité** : comme les réseaux Ad-Hoc mobiles, les réseaux véhiculaires sont caractérisés par une connectivité sporadique, car un véhicule peut rejoindre ou quitter un groupe de véhicules en un temps très court, ce qui nous mène ainsi à avoir une topologie très dynamique constituée de plusieurs îlots séparés [Jerbi, 2008].
- **Le modèle de mobilité** : plusieurs facteurs peuvent affecter la mobilité dans ces réseaux comme les infrastructures routières (par exemple : une route, une autoroute, des panneaux de signalisation...) [Fiore et al., 2007]. Ces réseaux sont extrêmement mobiles, ce qui entraîne une évolution constante de la topologie du réseau. Les approches qui

tentent de conserver des informations de localisation / itinéraires [Perkins and Bhagwat, 1994] [Jacquet et al., 2001] ne peuvent pas être appliquées, car cela entraîne des coûts significatifs. Cependant, les modèles de mobilité sont plus prévisibles que dans d'autres réseaux mobiles, car les véhicules circulent sur les routes. En outre, la mobilité dans les réseaux véhiculaires est liée directement au comportement des conducteurs et à leurs réactions face à des obstacles ou des situations différentes et complexes rencontrées (par exemple : les heures d'embouteillage, les accidents, etc.).

- **La sécurité et l'anonymat** : l'importance des informations échangées via les communications véhiculaires rend l'opération de sécurisation de ces réseaux cruciale, ce qui constitue un pré-requis au déploiement des réseaux véhiculaires [Pathak and Shrawan-kar, 2009].
- **La pertinence de l'information** : les données disséminées ne sont pertinentes que pour certaines zones ou certains véhicules en fonction de la topologie de la route et de la nature de l'information à diffuser. Par exemple, les véhicules circulant sur la voie opposée ou les véhicules qui se trouvent au-delà du lieu d'un accident ne sont pas concernés par le message d'alerte. Le contenu de l'information en conjonction avec les modèles de mobilité des véhicules et la topologie routière peut jouer un rôle essentiel pour déterminer si l'information est requise ou non.
- **La densité variable et la pénétration** : le réseau est tellement dynamique qu'il ne suffit pas de considérer un seul scénario. La densité des véhicules peut varier dans différents endroits (par exemple : ville, zone rurale, scénarios d'autoroute) ou même dans un même endroit mais à une heure / un jour différent (par exemple : dimanche soir versus les heures de pointe du lundi). Pour ces raisons, des protocoles flexibles et capables de gérer à la fois des réseaux denses et épars sont nécessaires.

## 1.4 Catégories des applications

Motivée par la nécessité de réduire le nombre des accidents de la route qui ne cesse de croître, la majorité des applications proposées pour les réseaux véhiculaires sont conçues pour

améliorer la sécurité active en conduite. Cependant, les messages échangés entre véhicules peuvent également servir à d'autres fins, telles que l'amélioration de la conduite et le divertissement. Dans ce paragraphe, nous présentons les types d'applications classés par catégories en nous basant sur les fonctions principales de ces dernières :

1. **Sécurité active** : les applications de sécurité active sont considérées comme étant typiques et les plus souhaitables pour les réseaux véhiculaires. Ce type d'applications a un impact direct sur la sécurité routière. L'objectif principal est d'assurer une conduite plus sûre par la communication inter-véhiculaire, en avertissant les conducteurs d'une situation dangereuse afin d'éviter un accident, ou de réagir de manière appropriée si l'accident ne peut pas être évité. Les applications de sécurité active sont réparties en 5 classes principales selon [Xeros and Ξερός, 2013; Cunha et al., 2016] comme indiqué dans le tableau 1.1. Ce classement est fait en fonction du niveau de danger.
2. **Service public** : les réseaux véhiculaires sont également destinés à soutenir les tâches fournies par les services publics, tels que, la police ou les unités de récupération des urgences. Un exemple très concret de cette catégorie est le soutien des véhicules d'urgence par des sirènes virtuelles. La mise en œuvre de cette catégorie d'applications exige l'implémentation d'un protocole de sécurité fonctionnant en parallèle avec ces dernières. Dans cette catégorie, on trouve deux sous-classes principales : des applications pour répondre aux urgences et d'autres pour apporter des services répondant à certains organismes de la société comme la police (cf. Tableau 1.2).
3. **Conduite assistée** : cette catégorie contient les applications destinées à améliorer ou à simplifier la conduite, en se basant sur la communication inter-véhiculaires. L'idée principale consiste à utiliser des scénarios microscopiques, captés à partir de l'environnement voisin du véhicule, ainsi que l'optimisation des scénarios macroscopiques présentant une meilleure fluidité du trafic routier. Dans le premier cas, les applications d'aide à la conduite sont destinées à assister le conducteur dans des situations de trafic normales ; par exemple, l'entrée sur une autoroute et les travaux routiers dans des zones à proximité. Dans le second cas, la fluidité de la circulation dans une zone plus grande est ciblée. Cela peut signifier qu'un message d'alerte pour signaler un accident est dif-

fusé dans une zone plus grande pour informer les véhicules d'un obstacle potentiel, afin que les conducteurs puissent emprunter un itinéraire différent. Un autre service fourni par cette catégorie d'applications est la diffusion d'informations de stationnement ou même la réservation d'une place de stationnement (cf. Tableau 1.3).

4. **Affaires et divertissements mobiles** : cette catégorie peut regrouper plusieurs services fournis généralement aux conducteurs, vus comme étant des "clients". L'automatisation des tâches liées aux véhicules ou les applications de paiement, comme le téléchargement de la musique, la gestion de flotte, le bavardage, l'e-publicité ou l'entretien des véhicules (cf. Tableau 1.4).

## 1.5 Modes de communication

Dans les réseaux de véhicules, on peut distinguer trois modes de communication pour la diffusion de l'information, les communications Véhicule-à-Véhicule (V2V), les communications Véhicule-à-Infrastructure (V2I/ I2V) [Choi et al., 2009; Burmester et al., 2008] (cf. Figure 1.1) et les communications Infrastructure-à-Infrastructure (I2I). Les véhicules peuvent utiliser un de ces trois modes ou bien les combiner s'ils ne peuvent pas communiquer directement avec le point souhaité. Dans cette section, nous présentons le principe et l'utilité de chaque mode.

1. **Communication Véhicule-à-Véhicule (V2V)** : Ce mode de communication fonctionne suivant une architecture décentralisée, et représente un cas particulier des réseaux Ad-Hoc mobiles. Il est basé sur la simple communication inter-véhicules ne nécessitant pas d'infrastructure. En effet, un véhicule peut communiquer directement avec un autre véhicule s'il se situe dans sa zone radio, ou bien par le biais d'un protocole multi-sauts qui se charge de transmettre les messages de bout en bout en utilisant les nœuds voisins qui les séparent tels des relais. Dans ce mode, les supports de communication utilisés sont caractérisés par une petite latence et un grand débit de transmission. Cette architecture peut être utilisée dans les scénarios de diffusion d'alertes (freinage

| Situation / Objectif                        | Caractéristiques à considérer   | Technologies de communication   | Défis / Limites   | Architecture   |
|---|---|---|---|--|
| Route dangereuse                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temps-Réel</li> </ul>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• DSRC</li> <li>• RFID<sup>6</sup></li> <li>• Bluetooth</li> <li>• Wi-Fi</li> </ul>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction de la latence</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• V2V</li> <li>• V2I</li> </ul>                               |
| Conditions de circulation routière anormale | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temps-Réel</li> </ul>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• DSRC</li> <li>• Wi-Fi</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fiabilité</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• V2I</li> <li>• I2I</li> <li>• I2V</li> <li>• V2V</li> </ul> |
| Collision                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temps-Réel</li> <li>• Fiabilité</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• DSRC</li> <li>• Wi-Fi</li> <li>• Wi-MaX</li> <li>• RFID</li> <li>• Bluetooth</li> </ul>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilité</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• V2I</li> <li>• I2V</li> <li>• V2V</li> </ul>                |
| Crash imminent                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temps-Réel</li> <li>• Fiabilité</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• DSRC</li> <li>• Wi-Fi</li> <li>• Wi-MaX</li> <li>• LTE</li> <li>• RFID</li> <li>• Bluetooth</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction de la latence</li> <li>• Fiabilité</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• V2V</li> </ul>  |
| Accident                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temps-Réel</li> <li>• Fiabilité</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• DSRC</li> <li>• RFID</li> <li>• Bluetooth</li> <li>• Wi-Fi</li> </ul>                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction de la latence</li> <li>• Fiabilité</li> <li>• Disponibilité</li> <li>• Efficacité</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• V2V</li> <li>• V2I</li> <li>• I2V</li> <li>• I2I</li> </ul> |

<sup>6</sup> L'identification par radiofréquence (RFID) est l'utilisation des ondes radio pour lire et capter des informations stockées sur une étiquette attachée à un objet distant.

Tableau 1.1 : Applications de sécurité dans les réseaux véhiculaires.

| Situation / Objectif  | Caractéristiques à considérer   | Technologies de communication   | Défis / Limites  | Architecture   |
|-----------------------|---|---|--|--|
| Appel aux urgences    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temps-Réel</li> <li>• Fiabilité</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wi-Fi</li> <li>• Wi-MaX</li> <li>• LTE</li> <li>• 3G / 4G</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction de la latence</li> <li>• Fiabilité</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• V2V</li> <li>• V2I</li> <li>• I2V</li> <li>• I2I</li> </ul> |
| Support aux autorités | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sécurité</li> </ul>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wi-Fi</li> <li>• Wi-MaX</li> <li>• LTE</li> <li>• 3G / 4G</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sécurité et cryptage de données</li> </ul>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• V2I</li> <li>• I2V</li> <li>• I2I</li> </ul>                |

Tableau 1.2 : Applications de services publics dans les réseaux véhiculaires.

| Situation / Objectif | Caractéristiques à considérer  | Technologies de communication   | Défis / Limites   | Architecture  |
|----------------------|--|---|---|---|
| Conduite assistée    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temps-Réel</li> <li>• Précision</li> </ul>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 802.11p</li> <li>• 802.11a, b, g</li> <li>• 3G / 4G</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Précision et contrôle</li> <li>• Sécurité</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• V2V</li> <li>• V2I</li> <li>• I2V</li> </ul> |
| Efficacité du trafic | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Débit</li> <li>• Fraîcheur des données</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wi-Fi</li> <li>• 3G / 4G</li> </ul>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilité des données</li> </ul>                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• V2I</li> <li>• I2V</li> </ul>                |

Tableau 1.3 : Applications de conduite assistée dans les réseaux véhiculaires.

d'urgence, collision, ralentissement, etc.) ou pour la conduite coopérative [Santa et al., 2008; Xu and Jiang, 2003]. Les communications V2V sont très efficaces pour le trans-

| Situation / Objectif    | Caractéristiques à considérer  | Technologies de communication   | Défis / Limites  | Architecture  |
|-------------------------|--|---|--|---|
| Maintenance du véhicule | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fiabilité du système</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• OBD-II</li> <li>• Wi-Fi</li> <li>• DSRC</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Précision des capteurs</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• I2V</li> <li>• V2I</li> <li>• V2V</li> </ul> |
| Service mobile          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Débit</li> </ul>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wi-Fi</li> <li>• 3G / 4G</li> </ul>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Couverture</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• I2V</li> <li>• V2I</li> </ul>                |
| Solution entreprise     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Accessibilité</li> </ul>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wi-Fi</li> <li>• 3G / 4G</li> </ul>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Contrôle d'accès</li> </ul>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• I2V</li> <li>• V2I</li> <li>• I2I</li> </ul> |
| Paiement électronique   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Identité</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wi-Fi</li> <li>• 3G / 4G</li> </ul>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sécurité</li> </ul>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• V2I</li> <li>• I2I</li> </ul>                |

Tableau 1.4 : Applications liées aux activités commerciales dans les réseaux véhiculaires.

fert des informations concernant les services liés à la sécurité routière, mais elles ne garantissent pas une connectivité permanente entre les véhicules.

2. **Communication Véhicule-à-Infrastructure (V2I)** : Ce mode de communication permet une meilleure utilisation des ressources partagées et démultiplie les services fournis (par exemple : accès à Internet, échange de données de voiture-à-domicile, communications de voiture-à-garage de réparation pour le diagnostic distant, etc.) grâce à des unités de bord de route (RSU-Road Side Units). Ce mode est inadéquat pour les applications liées à la sécurité routière car les réseaux à infrastructure ne sont pas performants quant aux délais d'acheminement [Jerbi, 2008].
3. **Communication Infrastructure-à-Infrastructure (I2I)** : Ce type de communication est utilisé pour améliorer le contrôle du signal entre les RSU. La communication I2I est très utile pour supporter le passage des véhicules d'urgence, car cela permet le contrôle du signal pour donner la priorité aux véhicules d'urgence passant dans la zone

de couverture des RSU. L'échange de messages entre RSU permet aussi un meilleur contrôle du flux de circulation, en se basant sur un certain nombre de calculs pour prévoir le volume de trafic entrant dans une intersection. La communication I2I peut aussi être utilisée dans des cas de désastre pour fournir une alternative de communication quand certaines bornes intermédiaires tombent en panne (cf. Figure 1.1) [Kishimoto et al., 2014].

#### 4. Communication hybride :

La combinaison des architectures de communication précédentes permet d'obtenir une architecture hybride intéressante. En effet, la portée des infrastructures étant limitée, l'utilisation de véhicules comme relais permet d'étendre cette distance. Dans un but économique et en évitant de multiplier les bornes à chaque coin de rue, l'utilisation de sauts par le biais de véhicules intermédiaires prend toute son importance. Néanmoins, les communications inter-véhiculaires souffrent de problèmes de routage lors des transmissions longues distances. Dans de telles situations, l'accès à une infrastructure peut améliorer les performances du réseau. Nous comprenons donc la complémentarité des deux types de communication et l'intérêt d'une architecture hybride.

## 1.6 Technologies d'accès

Pour fournir une détection en temps réel de l'état du trafic routier, le déploiement des unités de bord de route est une solution, qui demande un grand investissement (solution très coûteuse). Pour garantir une meilleure dissémination des informations critiques en temps réel, des réseaux sans fil étendus (tels que les réseaux cellulaires) pourraient être utilisés pour relier des segments déconnectés du réseau véhiculaire. Cette approche peut contribuer à résoudre le problème de connectivité, mais cela ne résout pas l'absence de détection en temps réel des conditions routières.

Vu que les OBU des véhicules peuvent exécuter un ensemble d'applications en même temps, il est nécessaire donc que ces unités embarquées prennent en charge une multitude de technologies sans fil utilisées pour communiquer avec d'autres dispositifs, telles que le Wi-

Fi [Committee et al., 2009], WiMax [Pareit et al., 2012], GSM [Lagrange et al., 2000] et Bluetooth [Ferro and Potorti, 2005]. Cependant, il existe une nouvelle famille de standards, en cours de standardisation par le groupe de travail de l'IEEE 1609.

### 1.6.1 Zigbee pour les réseaux véhiculaires

Le protocole ZigBee (nommé également IEEE 802.15.4) est conçu par l'Organisation Internationale des Standards ZigBee (ZigBee Alliance). Ce protocole convient uniquement aux réseaux véhiculaires à basse vitesse [Chen et al., 2010]. Il peut fournir une communication sans fil à courte portée avec une faible consommation d'énergie. Il est souvent utilisé dans les réseaux de capteurs sans fil (WSN pour "Wireless Sensor Networks"). Pour des raisons purement économiques, les nœuds capteurs peuvent être déployés le long des routes isolées avec une densité plus importante que les RSU, afin de former un réseau connecté avec le réseau véhiculaire, appelé généralement réseau de capteurs véhiculaires (Vehicular wireless Sensor Networks (VSNs)) [Hu et al., 2009]. Ces derniers peuvent être utilisés pour détecter les conditions de trafic routier dans des zones isolées, collecter et traiter ces données afin de les utiliser dans des applications de sécurité active (ADAS pour "Advanced Driver Assistance Systems"), et communiquer ces informations aux véhicules voisins. Les aspects pratiques de la technologie ZigBee ont été évalués dans plusieurs travaux [Ramteke and Krishna, 2012], [Mai et al., 2012], [Bhargav and Singhal, 2013], [Shree et al., 2016], [de Almeida Oliveira and Godoy, 2016], [Bhover et al., 2017].

### 1.6.2 Bluetooth

La norme Bluetooth 4.0 ou Bluetooth Low Energy (BLE), de plus en plus disponible, offre des caractéristiques intéressantes qui en font une alternative intéressante aux technologies existantes, pour mettre en œuvre des applications V2V. La première proposition d'utilisation de la technologie BLE pour les communications inter-véhicules était faite par Frank et

al. [Frank et al., 2014]. Le groupe SIG<sup>7</sup> (Bluetooth Special Interest Group) prédisait que 90% des smartphones compatibles Bluetooth supporteront la norme BLE en 2018. Le BLE est considéré comme étant une technologie de communication à un seul saut pour une multitude d'applications (soin de santé, sport et fitness, maisons intelligentes, sécurité, etc.). Ce protocole peut être utilisé pour relayer des informations critiques sur les conditions du trafic routier via les smartphones des conducteurs dans des zones isolées. Les travaux portant sur l'intégration du BLE dans les réseaux véhiculaires montrent que ce protocole est une solution avantageuse en terme de coût de déploiement, mais qui demande beaucoup d'améliorations, principalement pour la dissémination des données temps réel [Bronzi et al., 2016].

### 1.6.3 Wi-Fi (802.11)

Les protocoles 802.11 peuvent être utilisés pour des applications non liées à la sécurité active [Mojela and Booyesen, 2013]. L'utilisation de ces protocoles permet d'améliorer les performances globales des communications V2X, et d'utiliser les ressources plus efficacement [Wang et al., 2009]. Une connexion Wi-Fi permet l'accès à des entités situés à une courte portée ( $\pm 200$  m). Les réseaux locaux sans fils (WLAN pour Wireless Local Area Networks) basés sur le standard IEEE 802.11, opèrent généralement sur une fréquence radio sans licence d'une valeur de 2.4 GHz, offrant des débits pouvant atteindre 600 Mbit/s (norme IEEE 802.11n) [Mojela and Booyesen, 2013]. Dans la plupart des travaux portant sur l'intégration du Wi-Fi dans les réseaux véhiculaires, la configuration IBSS<sup>8</sup> (Independent Basic Service Set) est utilisée [Arshad et al., 2012]. Les protocoles Wi-Fi sont aussi utilisés dans un nouveau paradigme connu sous le nom Cloud Computing Véhiculaire (VC ou Vehicular Computing en anglais)[Mekki et al., 2017]. Ce dernier intègre les services fournis par les réseaux véhiculaires et le Cloud Computing, afin d'améliorer les capacités de calcul, de stockage et de traitement de données pour les STI.

---

7. Le Bluetooth Special Interest Group plus souvent abrégé en SIG est l'organisme qui supervise l'élaboration de normes Bluetooth et octroie les licences de la marque et de la technologie Bluetooth aux fabricants. Le SIG est fondé en 1998 par Ericsson, Intel, IBM, Nokia et Toshiba.

8. Le mode d'opération IBSS n'utilise pas de point d'accès et n'est constitué que d'équipements clients qui communiquent entre eux sans aucune fonction de contrôle, de gestion de la sécurité ou de statistiques centralisées.

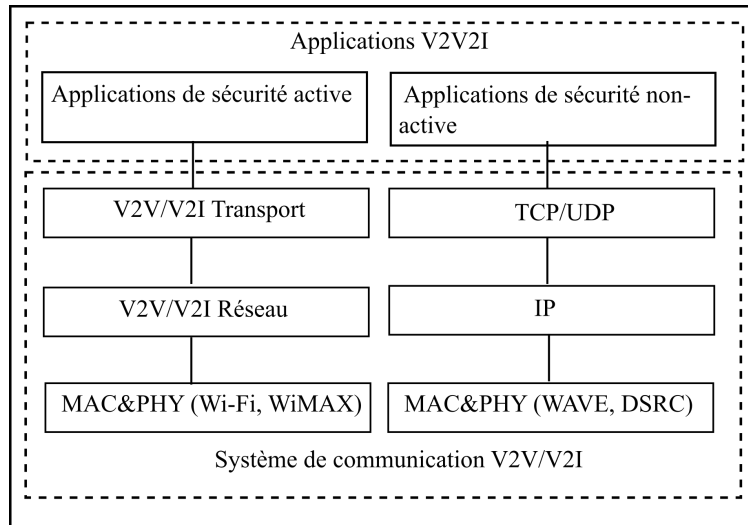


FIGURE 1.4 : Composants du système V2V2I et fonctionnalités [Mojela and Booyesen, 2013].

#### 1.6.4 WiMax (802.16)

Le standard WiMax (Worldwide Interoperability of Microwave Access) est une technologie sans-fil basée sur la norme IEEE 802.16 (également appelée Broadband Wireless Access) [Andrews et al., 2007]. Le WiMax 802.16 est considéré comme étant un standard de haut débit auquel est associé une plage de 10-66 GHz. Cette technologie est très performante pour remédier aux problèmes de connexion causés par des obstacles. Les protocoles de cryptage implémentés pour WiMax sont moins sensibles aux interférences, contrairement au Wi-Fi, ce qui les rend moins sensibles aux attaques [Ghosh et al., 2005]. La norme WiMaX offre un débit très élevé pouvant atteindre 35 Mbps en utilisant les technologies MIMO<sup>9</sup> et OFDM<sup>10</sup> (multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence), et couvre une plage de transmission allant jusqu'à 15 Kms [Vaughan-Nichols, 2008; Bhakthavathsalam and Nayak, 2011].

9. Le terme MIMO (Multiple Input, Multiple Output) désigne une technologie d'antenne destinée aux communications sans fil, qui consiste à utiliser plusieurs antennes tant au niveau de la source (émetteur) qu'à celui de la destination (récepteur). Source : <https://www.lemagit.fr/definition/MIMO> (Consulté en Avril 2018).

10. L'OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) est un procédé de codage de signaux numériques par répartition en fréquences orthogonales sous forme de multiples sous-porteuses. Cette technique est le meilleur moyen actuellement pour lutter contre les canaux sélectifs en fréquence. Source : <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Orthogonal%20Frequency%20Division%20Multiplexing/fr-fr/> (Consulté en Avril 2018).

Les réseaux véhiculaires basés sur WiMaX ( WiMaX based Vehicular Adhoc Network) associe deux avantages majeurs qui sont le haut débit de la norme IEEE 802.11p, et une large couverture des réseaux WiMaX [Devarajan et al., 2013]. Le WiMaX est généralement utilisé pour une connexion V2I [Aguado et al., 2008]. Actuellement, le standard WAVE (norme IEEE 802.11p) et WiMaX (norme IEEE 802.16e) sont les technologies les plus adaptées aux exigences des réseaux véhiculaires et qui procurent les meilleures performances en terme de QoS [Dorge et al., 2012]. Des travaux récents portent sur l'hybridation des communications véhiculaires en utilisant les deux standards WiMaX et 802.11p pour pallier les problèmes de communication à courte portée [Guchhait et al., 2017], [Gugulothu et al., 2017], [Kumar et al., 2018]. Les principales propositions portent sur l'établissement de communications entre différentes sous-porteuses pour adresser le problème de sous-canalisation [Kumar et al., 2018].

### 1.6.5 UMTS

Le standard UMTS (pour Universal Mobile Telecommunication System) est la norme de télécommunications de troisième génération utilisée en Europe. Cette norme de communication a été développée en 2004. Elle est basée sur la technologie W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access). L'UMTS utilise la bande de fréquence de 1900MHz-2000MHz [Holma and Toskala, 2005]. Les spécifications techniques de cette norme sont développées au sein de l'organisme 3GPP. L'avantage principale de ce standard, est qu'il est compatible avec tous les réseaux disponibles. L'UMTS procure un haut débit pouvant atteindre théoriquement jusqu'à 2 Mbps dans la version 3GPP R'99, et au-delà de 10 Mbps dans la version 3GPP R'5 [Holma and Toskala, 2005]. Il existe de nombreuses applications véhiculaires qui utilisent des communications multicast (par exemple : diffusion des messages d'alerte d'un embouteillage, des conditions météorologiques et de mauvaises conditions routières). Dans ce type de communication, l'information doit être diffusée à un groupe de véhicules dans une zone géographique spécifique. Ce genre d'applications peut être réalisé en utilisant les réseaux UMTS d'aujourd'hui; cependant, le coût d'utilisation de l'UMTS est très élevé [Ul Amin,

2015]. Le service de diffusion cellulaire (CBS)<sup>11</sup> [The European Telecommunications Standards Institute ETSI, 1999] et MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service)<sup>12</sup> [Yi et al., 2012] sont les deux services de diffusion normalisés dans l'UMTS. Comparé à CBS, MBMS offre des services de broadcast et de multicast plus sophistiqués avec des délais de transmission nettement inférieurs [Xylomenos et al., 2008]. Par conséquent, le MBMS est préféré pour les applications de sécurité non critiques [Xylomenos et al., 2008].

### 1.6.6 LTE-Adv (3G/4G)

La technologie LTE (Long Term Evolution) définie par le consortium 3GPP<sup>13</sup>, est une évolution de plusieurs normes de téléphonie mobile. Plusieurs travaux qui portent sur l'utilisation des cellules LTE pour les communications V2I ont été proposés dans les dernières années [Perdana et al., 2017; Chhatani et al., 2017; Chekkouri et al., 2018; Arora et al., 2018]. Le défi majeur de l'utilisation de la LTE pour les réseaux véhiculaires est la faible couverture qui conduit à des transferts fréquents, et à une surcharge importante des canaux de transmission [Chekkouri et al., 2018]. Dans ce contexte, le protocole LTE4V2X a été proposé. Il s'agit d'un nouveau cadre (ou Framework en anglais) pour une organisation centralisée des réseaux véhiculaires utilisant la norme LTE [Remy et al., 2011]. Ce dernier permet la gestion des communications entre clusters et l'optimisation des échanges entre les groupes, afin de fournir de meilleures performances. L'utilisation de la technologie LTE présente plusieurs limites pour un environnement très mobile. Dans ce contexte, plusieurs propositions qui portent sur l'hybridation de cette norme avec la technologie WAVE (cf. Section 1.7.1) ont été évaluées durant les dernières années [Chopade et al., 2017; Lin and Liu, 2017; Ayoob et al., 2017; Jyrwa et al., 2018].

---

11. La diffusion cellulaire (Cell Broadcast en anglais), est une technique qui permet d'envoyer via un réseau de téléphonie mobile le même message à tous les abonnés inscrits à ce service, à l'intérieur d'une zone géographique donnée connue sous le nom de zone de diffusion cellulaire.

12. Le service de broadcast / multicast multimédia (MBMS) est un service point à multipoint fourni par des systèmes 3GPP. Il fournit des données utilisateur à partir d'une seule entité de réseau à plusieurs UEs. Les MBMS sont transmis sur les mêmes fréquences porteuses utilisées par les opérateurs mobiles pour transmettre des services tels que les appels vocaux et Internet.

13. 3rd Generation Partnership Project (3GPP) est une coopération entre plusieurs organismes de standardisation en télécommunications

## 1.7 Travaux de standardisation et de normalisation

Parmi les technologies utilisables pour les communications V2V et V2I, les communications dédiées à courte portée (DSRC pour Dedicated Short Range Communications) se positionnent comme un média susceptible d'offrir un potentiel intéressant [Kenney, 2011]. Cette section met l'accent sur cette technologie, qui est conçue pour supporter une variété d'applications basées sur la communication véhiculaire. La section suivante sera consacrée à la partie la plus importante de DSRC qui concerne la couche physique (802.11p) [Kenney, 2011]. La fin de cette section sera dédiée à deux types de messages standardisés qui sont utilisés dans plusieurs applications de réseaux véhiculaires : CAM et DENM [The European Telecommunications Standards Institute ETSI, 2010; The European Telecommunications Standards Institute ETSI, 2010].

### 1.7.1 Communication dédiée à courte portée (DSRC)

Il s'agit des communications sans fil, à sens unique ou à double sens, et à courte (ou moyenne) portée, spécialement conçues pour les systèmes de transport intelligents (STI), autrement dit pour les communications V2V et V2I. Le sigle DSRC désigne aussi l'ensemble des protocoles et de normes mis en jeu dans ce type de communications [Kenney, 2011].

La figure 1.5 illustre la pile protocolaire des communications DSRC, les couches physique et MAC (Medium Access Control) utilisent la norme IEEE 802.11p souvent connue sous le nom WAVE (Wireless Access for Vehicular Environments), qui est une version modifiée de la norme IEEE 802.11a (Wi-Fi). Cette technologie sera détaillée dans la section 1.7.2. Au milieu de la pile DSRC, une série de normes définie par le groupe de travail IEEE 1609 sont utilisées. La famille des standards IEEE 1609 pour WAVE, se décompose en quatre standards :

1. IEEE 1609.1 - WAVE Resource Manager pour la gestion des ressources ;
2. IEEE 1609.2 - WAVE Security Services for Applications and Management Messages pour la sécurisation des messages ;

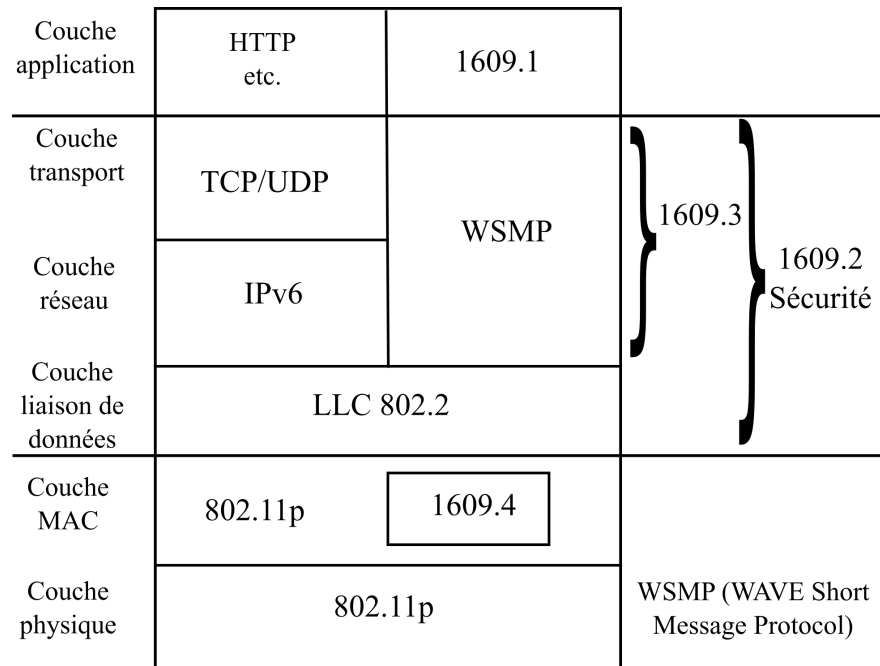


FIGURE 1.5 : Pile protocolaire du standard DSRC.

3. IEEE 1609.3 - WAVE Networking Services pour les services de niveau réseau et transport incluant l'adressage et le routage ;
4. IEEE 1609.4 - WAVE Multi-Channel Operation pour la coordination et la gestion des sept canaux DSRC.

Le standard DSRC prend également en charge l'utilisation de protocoles Internet pour les couches réseau et transport, à savoir, IPv6 (Internet Protocol version 6), UDP (User Datagram Protocol) et TCP (Transmission Control Protocol). Ces protocoles sont définis par l'IETF<sup>14</sup> (Internet Engineering Task Force). Le choix de l'utilisation de WSMP (Wave Short Message Protocol) ou d'IPv6 associé à UDP/TCP dépend des exigences de l'application visée. Les communications à un seul saut, comme celle sur lesquels les applications de prévention de collision sont basées, utilisent généralement la bande passante WSMP, tandis que les communications multi-sauts utilisent IPv6 pour ses capacités de routage [Kenney, 2011].

14. <http://www.ietf.org>. (Consulté en Septembre 2018)

### 1.7.2 IEEE 802.11p

La technologie 802.11p [Kenney, 2011] est une sorte de Wi-Fi mobile offrant une portée de l'ordre d'un kilomètre et un débit théorique de plusieurs Mbit/s. Ce standard est divisé en deux sous-couches :

- La couche dépendante du support physique (en anglais : Physical Medium-dependent (PMD)) : Les interfaces PMD communiquent directement avec le support sans fil. La technique de répartition en fréquences orthogonales (OFDM pour Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est utilisée pour former des sous-porteuses orthogonales à travers lesquelles l'information sera transportée. Ceci a été récemment ajouté à 802.11 dans l'amendement 802.11a. Le système PMD définit les caractéristiques et les méthodes de transmission et de réception des données à travers le support sans fil entre deux stations ou plus.
- La couche physique de convergence (en anglais : Physical Layer Convergence Procedure (PLCP)) : La fonction de convergence adapte les capacités dépendantes du support physique (PMD) pour le service MAC. PLCP définit la méthode de mappage des unités de données du protocole MPDU<sup>15</sup> (MAC Protocol Data Units) de la sous-couche MAC à l'intérieur du format des trames, pour l'émission et la réception de ces dernières entre deux stations ou plus, utilisant le système associé PMD. PLCP délivre aussi des trames entrantes en provenance du support sans fil vers la sous-couche MAC.

En Europe, le 802.11p constitue la base de la norme ITS-G5, supportant le protocole GeoNetworking pour la communication V2V et V2I [The European Telecommunications Standards Institute ETSI-TCITS, 2013]. ITS-G5 et GeoNetworking sont normalisés par l'institut européen des communications standards (ETSI) pour les systèmes de transport intelligents [The European Telecommunications Standards Institute ETSI-TCITS, 2013].

---

15. <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/cc239933.aspx>. (Consulté en Septembre 2018.)

### 1.7.3 Normes des systèmes de transport intelligents coopératifs en Europe (C-ITS)

Les normes C-ITS établies par le CEN (Comité européen de normalisation) suivent une architecture générale, spécifiée dans les normes ETSI EN 302 665 et ISO 21217, avec une station ITS comme élément central, représentant les véhicules, les appareils mobiles, les stations de bord de la route (RSU ou bien l'infrastructure routière) et les systèmes centraux (systèmes d'arrière plan ou serveur (back-end systems en anglais) et centres de gestion du trafic) [Festag, 2014].

Dans le système C-ITS, le modèle de référence ISO OSI<sup>16</sup> a été adapté pour couvrir les couches horizontales (la couche technologies d'accès, réseau et transport, services, et applications), ainsi que les entités verticales de gestion et de sécurité (cf. Figure 1.6).

La figure 1.6 illustre la pile protocolaire pour les stations ITS routières et mobiles, et répertorie les normes principales de la version européenne avec leurs noms abrégés. La couche technologies d'accès utilise principalement un ensemble spécifique d'options de la norme IEEE 802.11, connu sous le nom ITS-G5, où G5 correspond à la bande de fréquence 5 GHz. La variante européenne ITS-G5 est inspirée de la norme DSRC (ou bien du standard IEEE 802.11p, Section 1.7.2), et adaptée aux exigences européennes.

La couche réseau et transport comporte deux colonnes : GeoNetworking et BTP<sup>17</sup>. La deuxième colonne utilise les protocoles Internet, en particulier IPv6 avec UDP, TCP ou

---

16. Le modèle OSI (Open Systems Interconnection) est une norme (ou un standard) définie par l'ISO (International Organization for Standardization) pour permettre l'interconnexion des systèmes hétérogènes.

17. Le protocole BTP ou Basic Transport Protocol fournit des services aux entités des protocoles de la couche services, telles que CAM et DENM. Les services sont fournis via BTP-SAP en utilisant des services de différents types qui portent les paramètres et la PDU des entités du protocole supérieur. Il permet également aux entités de protocole de la couche service d'accéder directement aux services fournis par les protocoles de la couche GeoNetworking.

potentiellement d'autres protocoles de transport tels que SCTP<sup>18</sup> et les extensions de mobilité IP (IPv6 mobile et ses extensions pour la mobilité réseau, NEMO<sup>19</sup>).

Le choix du profil de communication (GeoNetworking ou IPv6), est strictement lié aux applications. La pile de géolocalisation réseau (GeoNetworking) est généralement utilisée pour les communications Ad-Hoc ITS-G5 à l'aide du géo-adressage, et IPv6 pour la communication avec une infrastructure IP pour des réseaux cellulaires. Les paquets IPv6 peuvent également être transmis en utilisant la couche GeoNetworking, pour lequel la sous-couche d'adaptation GN6 a été conçue (cf. Figure 1.6).

Au-dessus de la couche réseau et transport, les normes relatives aux protocoles de la couche service permettent aux applications de fonctionner correctement. Le protocole CAM transmet des informations critiques sur l'état du véhicule à l'appui des applications de sécurité et d'efficacité du trafic, grâce auxquelles les véhicules récepteurs peuvent suivre la position et le déplacement des véhicules voisins (Section 1.7.3.3.1).

Le protocole DENM diffuse des informations liées aux événements de sécurité dans une région géographique (Section 1.7.3.3.2). D'autres types de messages sont en cours de standardisation pour les communications véhicule à infrastructure (V2I).

Les applications ne sont pas entièrement standardisées. Cependant, les normes spécifient les exigences minimales pour trois groupes d'applications. Le premier groupe concerne la signalisation de danger sur la route (RHS pour Road Hazard Signaling ou bien RHW), et comprend dix cas d'utilisations différents pour le déploiement initial, y compris l'approche des véhicules d'urgence, les zones dangereuses et les feux de freinage d'urgence automatique. Les deux autres groupes, signalisation de risque de collision à une intersection (ICRW pour Intersection Collision Risk Warning) et signalisation de risque de collision longitudinale (LCRW

---

18. SCTP ou Stream Control Transmission Protocol est un protocole permettant de transmettre simultanément plusieurs flux de données entre deux points d'extrémité ayant établi une connexion dans un réseau. Parfois appelé TCP nouvelle génération ou TCPng, le protocole SCTP est conçu pour faciliter la prise en charge d'une connexion téléphonique sur Internet (et en particulier pour prendre en charge le système de signalisation 7 du système téléphonique - SS7 - sur Internet).

19. Le protocole NEMO (NEtwork MObility) est une extension du protocole IPv6 mobile. Ce dernier permet la continuité de la session pour chaque nœud du réseau mobile pendant que le réseau se déplace. Ceci permet également à chaque nœud du réseau mobile d'être accessible tout en se déplaçant.

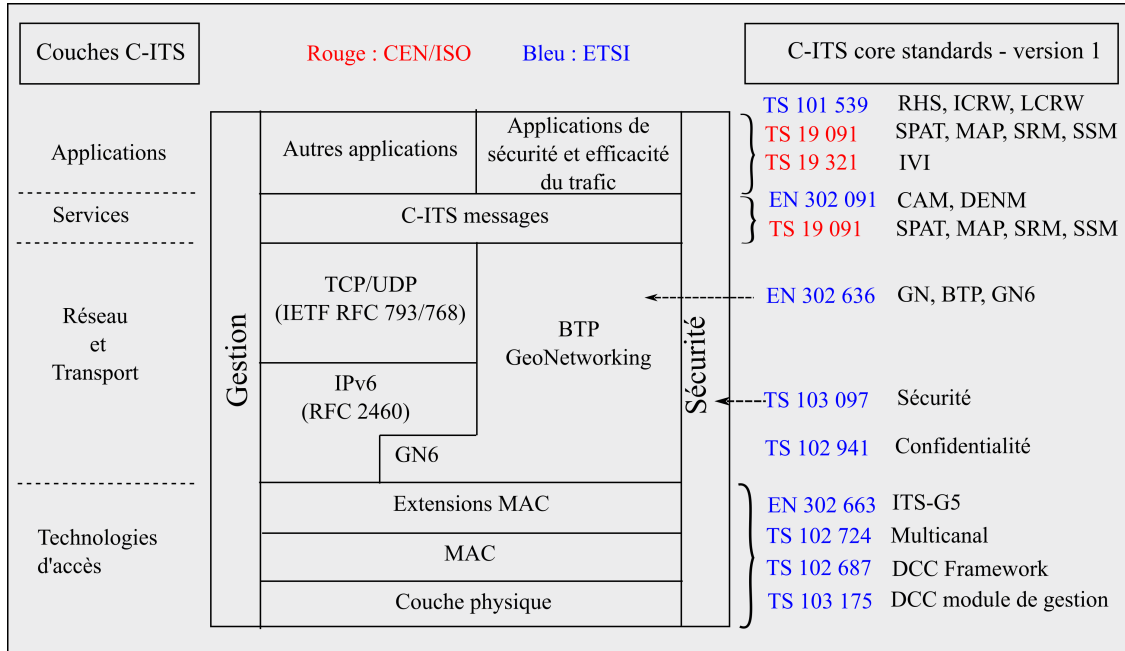


FIGURE 1.6 : Pile protocolaire et normes de base pour C-ITS (Version européenne n°1) [The European Telecommunications Standards Institute ETSI, 2010; Festag, 2014].

pour Longitudinal Collision Risk Warning), font référence à des collisions potentielles de véhicules aux intersections, et à des collisions latérales ou frontales.

Les normes relatives à la sécurité et à la confidentialité permettent la cryptographie asymétrique et la modification des pseudonymes. Les normes de gestion couvrent principalement le soutien au contrôle décentralisé de la congestion et à la gestion du profil de communication. Les normes relatives à la sécurité et à la confidentialité permettent la cryptographie asymétrique et la modification des pseudonymes. Les normes de gestion couvrent principalement le support au contrôle décentralisé de la congestion, et à la gestion du profil de communication. Une série de normes de test fournit des spécifications permettant de vérifier la conformité d'une implémentation aux normes de base et permet des tests de connexion (Plug-tests) pour tester l'interopérabilité entre des implémentations de différents fournisseurs.

### 1.7.3.1 Technologies d'accès

ITS-G5 applique un mode Ad-Hoc basique, auquel il fait référence au mode OCB<sup>20</sup> en dehors du contexte d'un BSS<sup>21</sup>. Le mode OCB simplifie les opérations par rapport à un réseau sans fil qui utilise un ensemble de services de base (BSS), désactive les procédures de gestion, telles que le balayage, l'authentification et l'association de canaux, et utilise un identifiant BSS générique. Les stations ITS-G5 compatibles OCB peuvent transmettre des messages directement et immédiatement sans délais d'échange de trames de contrôle [Festag, 2014].

Pour l'accès au support, ITS-G5 introduit le même schéma que celui spécifié dans IEEE 802.11, c'est-à-dire accès multiple avec détection de porteuse et prévention des collisions (CSMA/CA)<sup>22</sup>, avec une entité de contrôle d'accès au support (MAC) par canal.

Le schéma est étendu pour la prise en charge de la qualité de service (QoS) de la norme IEEE 802.11, connue sous le nom d'accès amélioré au canal distribué (EDCA<sup>23</sup>), qui fournit différentes priorités pour l'accès à un autre canal avec des paramètres spécifiques pour la taille de la fenêtre de contention et le temps d'inactivité (espaces inter-trames) par classe de priorité. Les trames ITS-G5 sont affectées aux files d'attente EDCA en fonction du paramètre de classe de trafic (TC) choisi par la couche service avec les valeurs de TC pour les messages CAM, DENM à priorité élevée et faible, etc.

En plus de l'entité d'accès au média avec les files d'attente EDCA, les extensions de couche MAC pour ITS-G5 fournissent deux fonctions principales : le contrôleur d'accès et

---

20. OCB ou Offset Codebook Mode est un mode de fonctionnement basé sur les blocs de chiffrement. Ce mode fournit simultanément la confidentialité et l'authenticité d'un texte fourni par l'utilisateur. Ce processus est connu sous le nom « Schéma de chiffrement authentifié ».

21. Le mode d'opération BSS (ou Basic Service Set en anglais) est la base du réseau sans fil. Il est constitué d'un point d'accès connecté à l'infrastructure réseau appelée « Distribution System » (DS) et des clients sans fil qui lui sont associés.

22. CSMA/CA ou Carrier Sense Multiple Access (en français : accès multiple avec écoute de la porteuse) est une méthode de base qui contrôle la communication de plusieurs participants sur un support de transmission partagé et décentralisé.

23. Le mode EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) définit quatre catégories d'accès aux canaux ou priorités. Cette méthode est une évolution de la méthode DCF (Distributed Coordination Function). Elle instaure la différenciation des flux réseaux, par la classification en 4 types de trafics (Voix, Vidéo, Best Effort pour les applications standard et BackOff lorsque le trafic est faible).

le gestionnaire multicanal (MCO). Le contrôleur d'accès assure que les entités de la couche supérieure transmettent des paquets dans les limites d'un débit maximal lié à un TC ; il s'agit essentiellement d'un ensemble de files d'attente activées/désactivées qui s'ajoutent aux files d'attente EDCA. Le MCO contrôle un émetteur-récepteur ITS-G5 (Transceiver ITS-G5 en anglais) pour accorder un canal de service spécifique dans une configuration ITS-G5 à double émetteur-récepteur, où le premier émetteur-récepteur est fixé au CCH et l'autre émetteur-récepteur peut basculer de manière dynamique entre les canaux de service. Les normes pour les deux fonctions, contrôleur d'accès (ETSI TS 102 687) et MCO (ETSI TS 102 724), sont en cours de révision [Festag, 2014].

### 1.7.3.2 Réseau et transport

Les normes de la couche réseau et transport appartiennent à la série de normes EN 302 636 et couvrent les besoins fonctionnels (partie 1), les scénarios (partie 2) et l'architecture générale de réseau (partie 3). La partie 4 spécifie les protocoles de réseau. Cette partie est divisée en opérations indépendantes du support (sous-partie 4-1), et opérations dépendantes du support pour ITS-G5 (sous-partie 4-2). Bien que la partie 4 est divisée en deux parties, les deux construisent une seule entité de protocole. La séparation permet de futures extensions spécifiques aux supports sur d'autres supports sans fil autres que ITS-G5. Les normes de la couche de transport pour BTP et GN6 sont spécifiées dans les parties 5 et 6 de la série, respectivement [Festag, 2014].

GeoNetworking est un ensemble de protocoles de routage permettant la livraison de paquets dans un réseau Ad-Hoc sans infrastructure de coordination. Ils utilisent des positions géographiques pour l'adressage et la transmission. Les capacités d'adressage facilitent l'envoi d'un paquet à une station ITS individuelle avec sa position géographique ou à une zone géographique cible décrite par des formes géométriques (cercle, rectangle, ellipse ; voir ETSI EN 302 931) [Festag, 2014]. Ce dernier implique à la fois la diffusion en mode Broadcast et Anycast vers des nœuds situés à l'intérieur de la zone cible (mode de transmission pour une

zone), ainsi que la prise en charge du transport de paquets vers la zone si la source est située à l'extérieur (mode de transmission en ligne) [Festag, 2014].

Globalement, les protocoles GeoNetworking prennent en charge cinq modes pour la transmission des paquets : géo-unicast, géo-broadcast, géo-anycast, diffusion à un seul saut et diffusion à couverture topologique. Les deux derniers n'utilisent pas l'adressage géographique. Les paquets de géo-broadcast sont utilisés pour diffuser des messages de type DENM déclenchés par des événements, et les messages CAM déclenchés périodiquement sont acheminés via des paquets diffusés à un seul saut [Festag, 2014]. Ce protocole permet le transfert direct sans avoir besoin d'établir ou de maintenir des routes. Le standard EN 302 636-4-1 pour les protocoles GeoNetworking spécifie plusieurs algorithmes de transmission avec des fonctionnalités de protocole avancées afin de garantir une meilleure efficacité [Festag, 2014].

Trois algorithmes sont spécifiés pour le géo-broadcast : une diffusion simple qui applique **un schéma d'inondation (Flooding)** et qui limite la rediffusion en vérifiant les bornes géographiques de la zone cible, une diffusion basée sur la contention (**contention-based forwarding (CBF)**), dans laquelle chaque nœud expéditeur candidat déclenche un timer inversement proportionnel à sa progression. Le nœud avec le temps le plus court gagne la contention et rediffuse le paquet [Festag, 2014]. La troisième catégorie regroupe les **algorithmes de transfert avancés** qui combinent les CBF avec des algorithmes de sélection du prochain nœud relais à un saut ayant la plus grande couverture (Greedy Forwarding). Un exemple d'algorithme de transfert avancé est illustré dans la figure 1.7.

Un paquet GeoNetworking est composé de trois entêtes : basique, commun et complémentaire. Les deux entêtes basique et commun contiennent des champs nécessaires à tous les types de paquets. L'entête complémentaire contient des informations spécifiques à la géo-diffusion, et couvre par exemple les champs nécessaires pour la définition de la zone de couverture [Festag, 2014].

Les deux premiers entêtes basique et commun sont séparées pour des raisons de sécurité. Une signature numérique et un certificat sont générés par la source du paquet pour les entêtes commun et étendu, de sorte que les champs de l'entête basique puissent être modifiés par

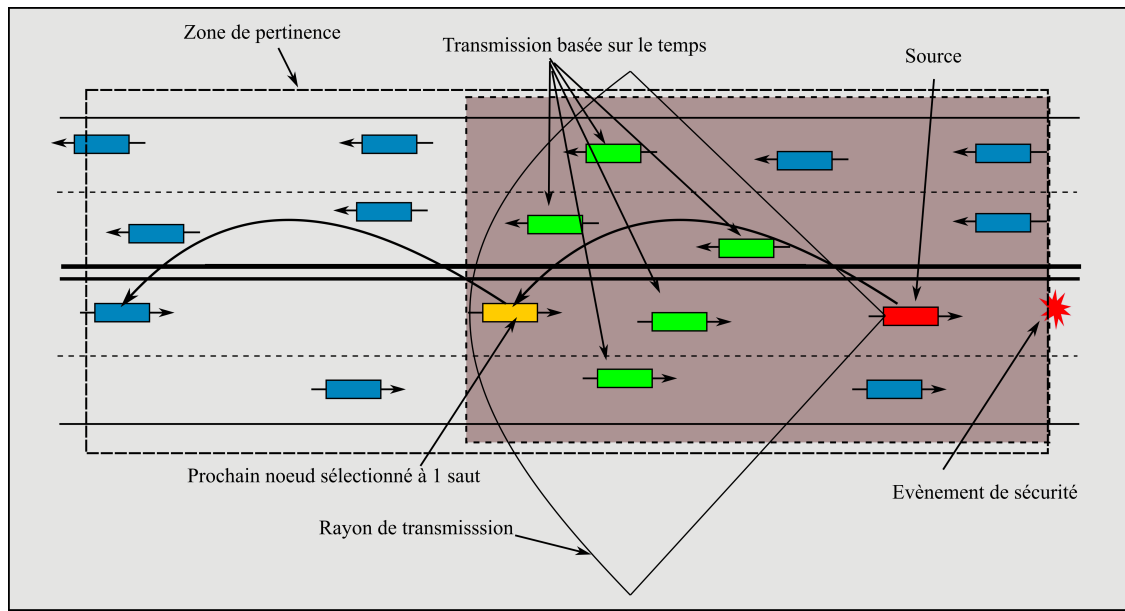


FIGURE 1.7 : Les algorithmes de transfert avancés [Festag, 2014].

les nœuds relais. Par exemple, la valeur du nombre de sauts peut être diminuée par chaque nœud relais sans avoir besoin de régénérer la signature [Festag, 2014].

Au dessus du protocole GeoNetworking, le protocole BTP (EN302 636-5-1) multiplexe / démultiplexe les messages de la couche services et fournit un transport de paquets de bout en bout similaire au protocole UDP. BTP adopte le concept de ports de la suite IP et attribue des ports bien connus aux messages pertinents de la couche services [Ibrahim et al., 2018]. En alternative à BTP, GN6 (EN 302 636-6-1) permet la livraison multi-sauts en utilisant l'adressage sub-IP des paquets IPv6 sans modifier ce dernier. GN6 adapte la configuration automatique des adresses et étend le concept de liaison IPv6 aux zones géographiques associées à un point de rattachement IPv6. GN6<sup>24</sup> introduit une sous-couche d'adaptation, référencée par GN6ASL, qui présente une topologie de réseau à plat avec un adressage IP [Festag, 2014].

24. GN6 spécifie la transmission des paquets IPv6 pour le protocole ETSI GeoNetworking [ETSI-TS-102-636-4-1-GN] via une couche d'adaptation de protocole référencée sous le nom GN6ASL (ou GeoNetworking IPv6 Adaptation Sub-layer en anglais).

### 1.7.3.3 Couche service

Les normes de la couche service spécifient les exigences et les fonctions prenant en compte les applications, la communication et la maintenance des informations. Les normes de cette couche couvrent les protocoles de messagerie, la gestion de la position et de l'heure, la localisation, la fusion de données de capteurs dans une carte dynamique locale (LDM), etc. Les normes les plus pertinentes relatives à la messagerie C-ITS, sont discutées dans les sections suivantes [Ibrahim et al., 2018].

En plus des standards CAM et DENM, d'autres messages sont en cours de normalisation dans le CEN TC 278 / ISO TC 204 pour les données de topologie (MAP), les données de feux de circulation dynamiques (phase de signalisation et de synchronisation (SPaT<sup>25</sup>) [Ibrahim et al., 2018]), les accès prioritaires et les accès interdits des véhicules spéciaux (SRM<sup>26</sup>, SSM<sup>27</sup>) [Seredynski et al., 2015], données du trafic recueillies (PVD<sup>28</sup>, PDM<sup>29</sup>) et les données embarquées des véhicules (IVI<sup>30</sup>).

#### 1.7.3.3.1 Messages de sensibilisation coopérative

Les messages de sensibilisation coopérative (Cooperative Awareness Messages en anglais (CAM)) [The European Telecommunications Standards Institute ETSI, 2010] sont des messages périodiques échangés dans un réseau ITS-G5 (802.11p). Ils fournissent des informations de présence et de position des véhicules, ainsi que l'état de communications des nœuds voisins. Ces nœuds doivent être en mesure de générer, envoyer et de recevoir des messages CAM, lorsqu'ils participent à un réseau véhiculaire. Lors de la réception de messages CAM, le véhicule est informé de la position des nœuds voisins, ainsi que de leurs mouvements, de leurs

---

25. Un message SPaT (Signal Phase and Timing) décrit pour chaque voie la phase en cours à une intersection signalée ainsi qu'une estimation du temps restant de cette phase.

26. Signal Request Message (SRM) est un protocole pour demander des services de préemption ou de priorité pour un groupe d'utilisateurs sélectionnés.

27. Signal Status Messages (SSM) est un protocole qui décrit l'état interne du contrôleur de signal. Ce dernier fournit un résumé général de tout événement de priorité ou de préemption en attente.

28. PVD (Probe Vehicle Data) est un message V2I, diffusé en mode unicast à partir des OBU vers un RSU, en utilisant le protocole WSMP sur un canal de service déterminé par le RSU.

29. PDM (Probe Data Management Message) est un message I2V diffusé des RSU aux OBU.

30. IVI ou In-Vehicle Infotainment fait référence à des systèmes de véhicules combinant divertissement et diffusion d'informations aux conducteurs et aux passagers.

attributs fondamentaux et des informations de base provenant de différentes acquisitions. Du côté du récepteur, des efforts raisonnables peuvent être fournies pour évaluer la pertinence des messages et des informations reçues. Cela permet à l'ensemble des stations d'obtenir des informations sur leur état et d'agir en conséquence.

Les informations, diffusées par le gestionnaire de messages CAM, sont couramment utilisées dans des cas liés au type d'évènement détecté. La structure générale des messages CAM est illustrée par la figure 1.8. Les cases indiquées en couleur grise sur la figure 1.8 sont des données essentielles pour les messages CAM. L'identifiant de station indique l'entité émettrice. La version du protocole est relative au protocole des messages associés. L'identifiant de message est utilisé avec des significations différentes.

**CAM (TS 102 637-2)**

| Version du protocole<br>=0 | Identifiant du message<br>=0 (CAM) | Temps de génération | Identifiant de la station | Référence de la position | Caractéristiques de la station | Liste taguée |
|----------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------|
| 1 octet                    | 1 octet                            | 6 octets            | 4 octets                  | non définie              | variable                       | variable     |

FIGURE 1.8 : Structure des messages CAM [The European Telecommunications Standards Institute ETSI, 2010].

La spécification des messages CAM est détaillée dans la figure 1.9. L'encodage et le décodage des paquets doivent être effectués conformément aux règles de codage des paquets non alignés ASN.1.

ASN.1 (Abstract Syntax Notation One) est un standard international spécifiant une notation destinée à décrire des structures de données dans les secteurs des télécommunications et des réseaux informatiques. La description d'une structure de données a pour but d'obtenir une spécification de la structure qui est indépendante d'un encodage lié à un matériel particulier et sans ambiguïté. ASN.1 est un standard défini conjointement par l'organisation internationale de normalisation, la commission électrotechnique internationale et l'union internationale des télécommunications.

Une nouvelle spécification a été donnée dans [Festag, 2014] pour les messages CAM. Ces derniers sont composés d'un en-tête ITS PDU et de plusieurs conteneurs (cf. Figure 1.10) qui

```

-- The root data frame for cooperative awareness messages

CoopAwareness ::= SEQUENCE {

-- protocolVersion fixed to 0
protocolVersion INTEGER(0..255),

-- message type ID associated to CAM = 0
messageID INTEGER(0..255),

-- milliseconds elapsed since midnight January 1st, 1970 UTC
generationTime INTEGER (0..281474976710655),

stationId INTEGER(0..4294967295),

referencePosition ReferencePosition,

-- Basic characterization of a station.
-- A more detailed classification can be given by VehicleType.

stationCharacteristics SEQUENCE {
mobile BOOLEAN, -- will ITS station change position ?
private BOOLEAN, -- not public authority
physicalRelevant BOOLEAN,
-- can another mobile ITS station crash into this station ?
...
},

-- tagged list has optional and mandatory entries depending on
-- the profile of the station, this is defined in a
-- separate document
taggedList SET SIZE(0..32) OF TaggedValue,
...
}

```

FIGURE 1.9 : Spécification des messages CAM.

regroupent plusieurs champs de données en fonction du rôle de l'expéditeur et de sa fréquence d'apparition dans le message. L'en-tête ITS PDU contient la version du protocole, le type de message et l'adresse de l'expéditeur. Le conteneur de base contient le type de la station émettrice et sa position.

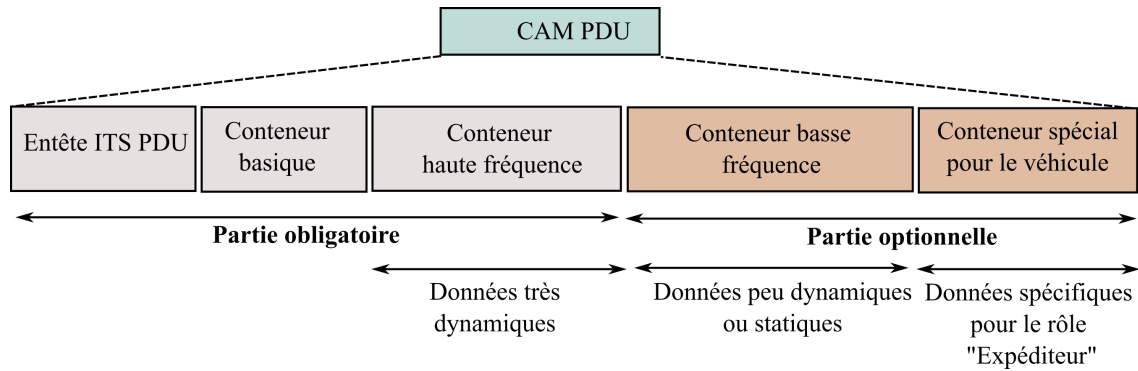


FIGURE 1.10 : Structure des messages CAM ETSI EN 302 637-2 [Festag, 2014].

Afin de réduire la taille des messages CAM, le conteneur haute fréquence contient principalement des données très dynamiques (par exemple : le cap, la vitesse et l'accélération du véhicule) qui sont envoyés dans chaque message CAM. Le conteneur basse fréquence contient des données moins pertinentes pour la sécurité (par exemple : le rôle du véhicule) qui peuvent avoir une taille importante (historique du trajet, par exemple) et n'est donc pas toujours ajouté au CAM, mais envoyé.

Les conteneurs de véhicules spéciaux sont éventuellement ajoutés au besoin pour le rôle expéditeur (par exemple : transports publics, marchandises dangereuses, travaux routiers ou sauvetage). L'utilisation du concept de conteneur garantit un format de message flexible qui peut être adapté aux besoins des véhicules émetteurs et récepteurs, tout en minimisant la charge sur les canaux sans fil.

Le taux de génération des messages CAM est déterminé par des règles et peut varier entre les bornes inférieure et supérieure de la période CAM :  $T_{Min} = 100ms$  et  $T_{Max} = 1s$  (correspond à un taux CAM de 1 à 10 en 1s). Ce taux est contrôlé par la dynamique du véhicule, les applications et le taux de congestion du canal sans fil.

Comme illustré dans la figure 1.11, les conditions sont échantillonnées à de petits intervalles (minimum 10 Hz). Si la dynamique du véhicule dépasse les seuils prédéfinis pour le cap, le mouvement et l'accélération, un message CAM est généré. La période minimale et

maximale entre deux messages CAM peut ensuite être limitée par les besoins DCC<sup>31</sup> ( $T_{DCC}$ ) [Lyamin et al., 2018] et les applications ( $T_{APP}$ ).

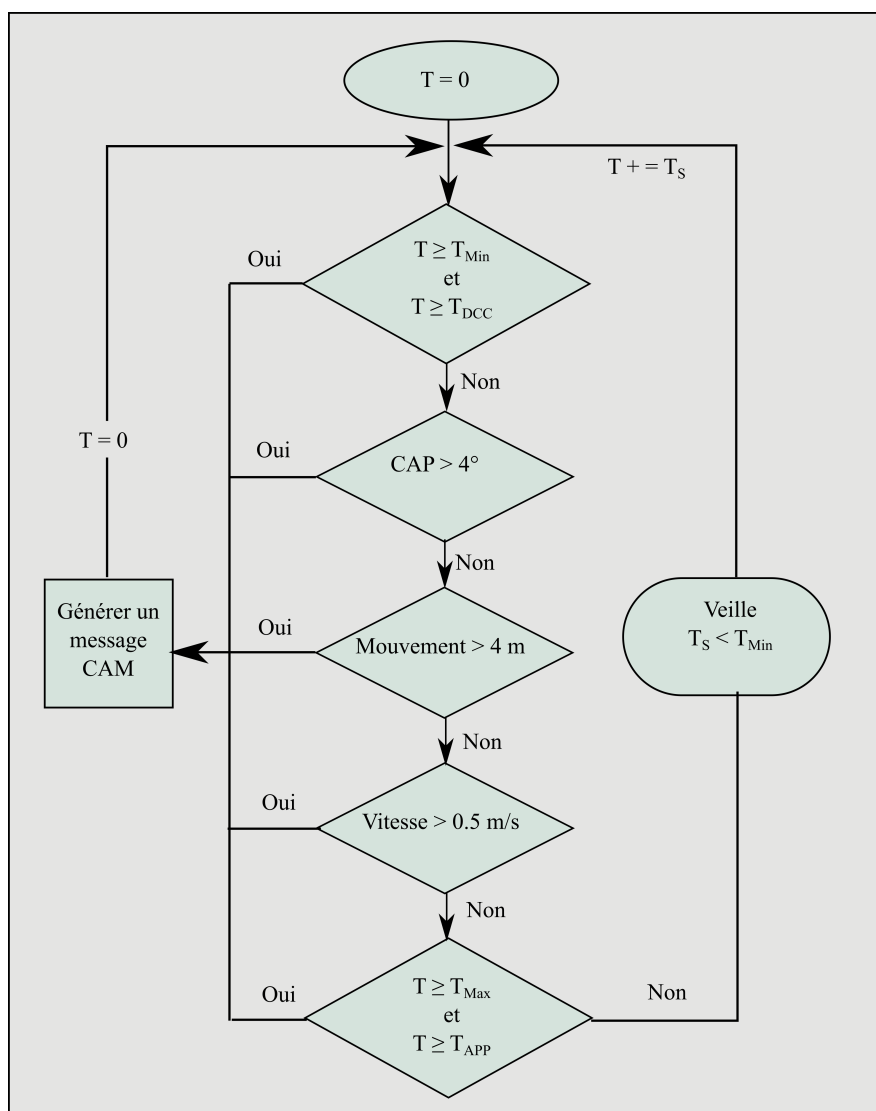


FIGURE 1.11 : Règles de génération des messages CAM (ETSI EN 302 637-2) [Festag, 2014].

Si le canal sans fil est surchargé, la période minimale est augmentée, tandis que l'application peut réduire la période maximale si la situation est critique en terme de sécurité. Un

31. Le module de contrôle de congestion décentralisé (DCC ou Decentralized Congestion Control) dans la pile protocolaire C-ITS est un composant obligatoire de ITS-G5 à 5,9 GHz, qui réduit la surcharge des canaux, la dégradation de la portée et l'auto-interférence.

conteneur basse fréquence et un conteneur de véhicules spécial sont inclus si au moins 500 ms se sont écoulées depuis la dernière génération d'un message CAM.

### 1.7.3.3.2 Messages de notification environnementale décentralisée

Les messages de notification environnementale décentralisée (DENM – Decentralized Environmental Notification Messages) sont principalement utilisés par les applications d'avertissement de risques routiers (Road Hazard Warning (RHW)) afin d'alerter les usagers de la route des événements critiques détectés. Il peut s'agir de la mise en place d'une déviation routière ou encore l'occurrence d'un accident. Ils sont envoyés en fonction des besoins. Chaque véhicule participant à un réseau véhiculaire, crée sa propre "image de l'environnement" en agrégeant des informations. Cette image est alors la base d'une reconnaissance correcte des risques [The European Telecommunications Standards Institute ETSI, 2010].

Les applications d'avertissement de risques routiers sont basées sur des événements composés de plusieurs cas d'utilisation. La procédure générale de traitement d'un cas d'utilisation est aussi suivie par une signalisation du danger :

1. Lors de la détection d'un événement qui correspond à un cas d'utilisation, la station diffuse immédiatement un message DENM aux autres stations situées à l'intérieur d'une même zone géographique et qui sont concernées par l'événement.
2. La transmission d'un message DENM est répétée de façon périodique.
3. Cette diffusion subsiste tant que l'événement est présent.

**Note** : Selon le type de l'événement détecté, la diffusion peut être réalisée par la même station, temporairement réalisée ou relayée par une ou plusieurs station(s).

4. La fin de la diffusion des messages DENM est soit réalisée automatiquement une fois l'événement disparu après un temps d'expiration prédéfini, ou par une station qui génère un message DENM spécial pour informer que l'événement a disparu.

5. Les stations qui reçoivent les messages DENM, traitent les informations et décident de présenter des avertissements appropriés aux utilisateurs, tant que les informations contenues dans le message sont fiables (en cours de validité) pour les stations.

En général, un événement est caractérisé par un type, une position ou une zone géographique, un temps de détection et une durée de vie. Ces attributs peuvent être différents par rapport à l'espace et le temps. Un message DENM qui concerne le même événement, peut-être émis par plusieurs stations, dans des positions différentes. L'événement détecté peut être indépendant des stations d'origine. En outre, la fiabilité des informations fournies peut varier d'une station à l'autre, selon leurs capacités de détection.

Selon [Festag, 2014], le DENM est un message déclenché par un événement de sécurité et contrôlé par la couche application. Lorsqu'un véhicule détecte une situation de sécurité, le protocole DENM attribue un identifiant d'action unique pour la station ITS de détection. Contrairement aux messages CAM qui sont diffusés par une seule station ITS-G5, une zone de pertinence est attribuée pour la diffusion des messages DENM, qui peuvent être transporté à plusieurs sauts par différentes stations ITS-G5, généralement via le mode de géo-diffusion du protocole GeoNetworking. Les messages DENM sont organisés en conteneurs avec un en-tête ITS PDU ajouté à chaque message DENM (cf. Figure 1.12).

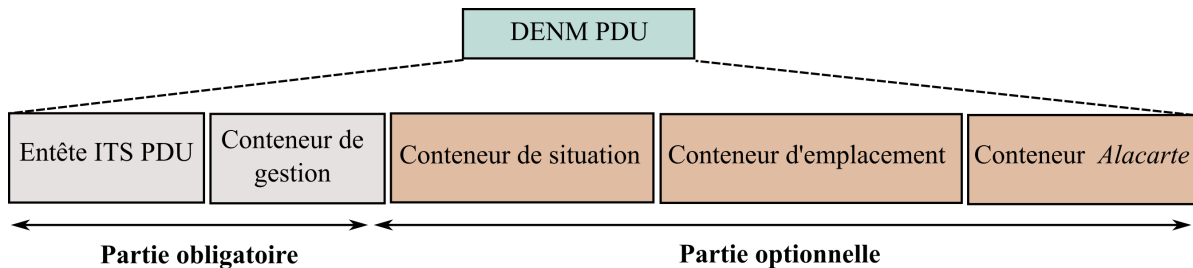


FIGURE 1.12 : Format des messages DENM [Festag, 2014; Kerrache et al., 2016].

Le conteneur de gestion est obligatoire. Ce dernier contient plusieurs champs comme l'identificateur d'action, le temps de détection, la position de l'évènement, etc. Tous les autres conteneurs sont éventuellement ajoutés pour des besoins fonctionnels de la couche application. Le conteneur de situation comporte des champs permettant de décrire l'évènement à

l'aide d'un code prédéfini, qui fait référence à l'évènement principal ainsi qu'aux évènements connexes (par exemple des évènements liés ou un historique des évènements). Le conteneur d'emplacement contient des champs pour la vitesse, le cap et les traces de l'évènement. Un conteneur *Alacarte* peut être ajouté pour transmettre des contenus liés à la couche application, tels que les coordonnées de la voie où l'évènement est produit, les travaux routiers à proximité, etc.

Le protocole DENM peut gérer un cycle de vie d'un évènement : un évènement avec un identifiant d'action spécifique peut être déclenché puis mis à jour par le générateur du message DENM; les mises à jour d'évènements se distinguent par une valeur croissante du champ "version de données". Un évènement peut également être annulé par le nœud générateur ou par une autre station ITS.

Le protocole DENM dispose de plusieurs mécanismes de diffusion pour conserver les informations de sécurité dans la zone concernée pendant la durée de l'évènement. La station source peut redéclencher le processus de génération d'un message DENM, généralement à une fréquence inférieure à celle d'un message CAM, afin de garantir que les véhicules entrant ultérieurement dans la zone concernée puissent recevoir les informations. Éventuellement, une station ITS intermédiaire peut prendre le relais au cas où la station source est endommagée ou si elle a quitté la zone concernée.

#### 1.7.3.4 Couche application

Pour le déploiement initial de C-ITS, un ensemble d'applications de base (ETSI TR 101 638) a été identifié et classé en quatre groupes d'applications : sécurité routière active, efficacité du trafic coopératif, services locaux coopératifs et services Internet. Les applications ne sont pas complètement standardisées mais les normes spécifient les exigences minimales pour trois groupes d'applications : RHS, ICRW et LCRW.

Les applications de signalisation de danger sur les routes (RHS) regroupent 10 cas d'utilisation différents (par exemple : approche des véhicules d'urgence, zones dangereuses et feux de freinage d'urgence) qui sont pertinents pour le déploiement initial.

Les deux autres groupes, Avertissement de risque de collision à une intersection (ICRW pour Intersection Collision Risk Warning) et Avertissement de risque de collision longitudinale (LCRW pour Longitudinal Collision Risk Warning), font référence à des collisions potentielles de véhicules aux intersections et à des collisions fronto-arrière, respectivement.

Le C2C-CC a défini les conditions de déclenchement pour ses applications en spécifiant le comportement pour plusieurs cas d'utilisation, notamment les conditions préalables, le flux de processus, les paramètres de message et les exigences de qualité des informations (QoD).

Les normes C-ITS spécifient des mécanismes de sécurité et de protection de la vie privée. La norme principale de sécurité est la norme ETSI TS 103 097. La norme ETSI TS 102 097 spécifie l'infrastructure de clé privée (PKI) et les protocoles de gestion des autorisations. La norme ETSI TS 102 941 pour la confidentialité et ETSI TS 102 942 pour l'intégrité des données, tout en se basant sur l'architecture de sécurité de la norme ETSI TS 102 940.

#### 1.7.4 Fréquences C-ITS

Trois bandes de fréquences dans la bande des 5 GHz ont été attribuées aux systèmes de transport intelligents en Europe en 2008 (cf. Figure 1.13), alignées en parallèle avec les plages de fréquences des ondes radio DSRC en Amérique du Nord et au Japon. ITS-G5A occupe une plage de 30 MHz un espacement de canal de 10 MHz. Le canal supérieur dans ITS-G5A est appelé canal de contrôle (CCH), il est utilisé comme canal de sécurité principal (cf. Figure 1.13). Les autres canaux sont des canaux de service supplémentaires. ITS-G5B s'étend sur une plage de 20 MHz avec deux canaux de service de 10 MHz chacun. Ce dernier est dédié aux applications C-ITS non liées à la sécurité [Festag, 2014].

Une large bande de 255 MHz est dédiée à l'ITS-G5C. Cette plage de fréquence est partagée avec la bande du réseau local (RLAN), qui est utilisée par les périphériques Wi-Fi et peut

comporter des canaux de 10 ou 20 MHz (cf. Figure 1.13). Dans ITS-G5C, les appareils doivent appliquer la méthode de sélection dynamique de fréquences (DFS<sup>32</sup>), très connue pour les appareils Wi-Fi, et qui protège les systèmes radar fonctionnant dans la même bande. Comme cette méthode requiert un maître DFS, l'utilisation de l'ITS-G5C est pratiquement limitée à la communication véhicule-à-infrastructure (V2I) avec une unité de bord de route (RSU\_C-ITS) en tant que maître DFS. Cependant, jusqu'à présent, l'efficacité de la méthode DFS pour des appareils très mobiles n'est pas approuvée. Deux autres canaux (ITS-G5D) (cf. Figure 1.13) sont prévus pour les futurs systèmes C-ITS [Festag, 2014].

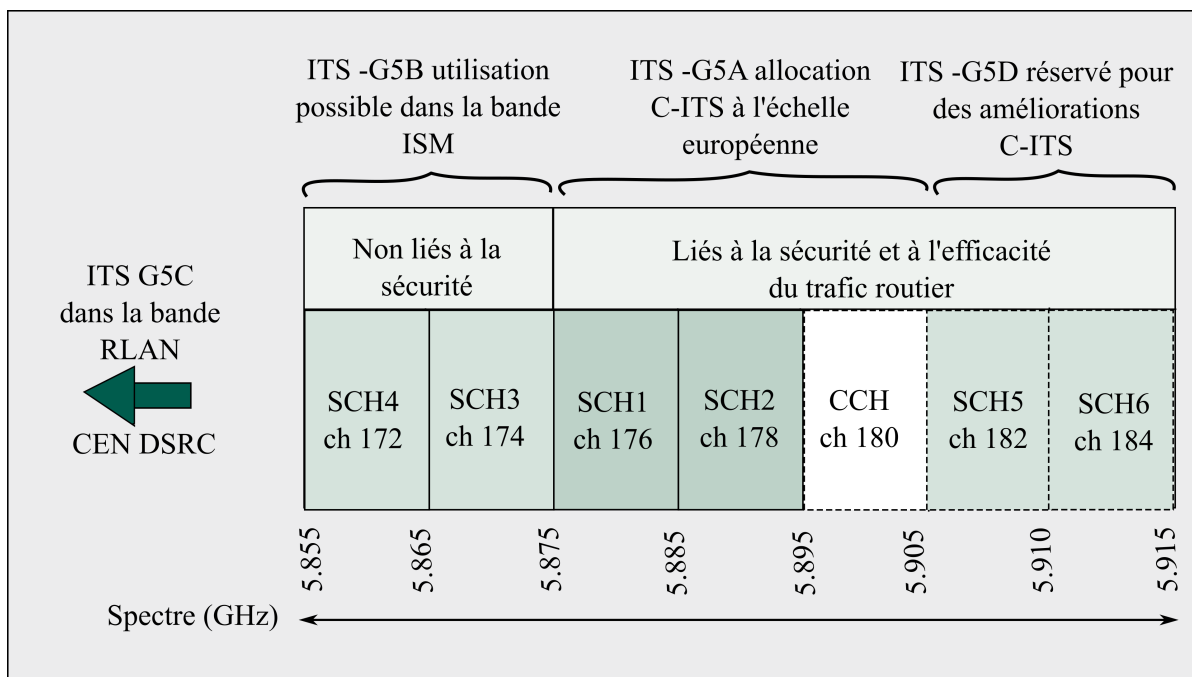


FIGURE 1.13 : Fréquences C-ITS.

En Europe, l'utilisation des bandes attribuées est régie par des normes harmonisées, une forme spécifique de normes européennes, qui garantissent la conformité des équipements radio avec les directives législatives. La norme harmonisée pour ITS-G5A EN 302 571 autorise une

32. La sélection dynamique des fréquences (DFS) est une fonctionnalité requise par la loi pour tous les appareils Wi-Fi qui partagent la bande 5 GHz avec un radar. DFS permet à un routeur ou un point d'accès (PA) de détecter les signaux radar et de changer leur fréquence de fonctionnement pour éviter les interférences. Cette procédure garantit que les systèmes radar envoient et reçoivent des informations correctes.

puissance de transmission pouvant atteindre 23 dBm/MHz et limite en conséquence l'émission aux bandes adjacentes [Ström, 2011].

Le masque de spectre est limité à 65 dBm dans la bande 5,795-5,805 GHz, dans lequel le système européen de péage, est opérationnel. La puissance de transmission maximale est en outre limitée par canal de service afin de protéger le canal CCH et de limiter les fuites hors bande vers la bande CEN DSRC. Pour les canaux CCH et SCH1, une puissance d'émission de 23 dBm/MHz est autorisée, et seulement 13 dBm/MHz pour SCH2 et SCH3.

Les demandes adressées aux régulateurs du spectre pour l'extension du fonctionnement du Wi-Fi à la bande des 5 GHz pour des communications de haut débit ont déclenché des discussions sur la coexistence des systèmes C-ITS et Wi-Fi dans la même bande. Bien que des études sont toujours en cours, la protection efficace des bandes ITS-G5 avec des exigences de faible latence est techniquement difficile [Riess et al., 2018].

La transmission physique dans ITS-G5 est inspirée de la norme IEEE 802.11a. Le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) est utilisé, avec 52 sous-porteuses, dont 48 réservées pour les données et 4 pour les pilotes. Par rapport aux canaux typiques de 20 MHz de la norme IEEE 802.11, l'espacement des sous-porteuses est divisé par deux pour les canaux de 10 MHz et les paramètres de synchronisation sont doublés, ce qui donne une durée symbole OFDM de 8 ms, avec un préfixe cyclique de 1,6 ms aligné sur un délai prévu et réparti sur une plage de communication inférieure à 1 km [Festag, 2014].

La durée du symbole dans la configuration des canaux à 10 MHz est également très courte pour supporter les interférences entre porteuses causées par l'effet Doppler<sup>33</sup>, c'est-à-dire que le temps de cohérence  $TC \approx 0.0134 \ll 1$  pour une vitesse relative de 260 km/h entre deux véhicules. Avec un débit de données de 6 Mb/s (débit par défaut), le temps de cohérence correspond à environ 400 octets, ce qui peut entraîner des variations de l'estimation du canal lors de la réception d'une grande trame dans des scénarios à grande vitesse [Chakkour et al., 2018].

---

33. L'effet Doppler, ou effet Doppler-Fizeau, est le décalage de fréquence d'une onde électromagnétique observé entre les mesures à l'émission et à la réception, lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps.

### 1.7.5 C-ITS vs DSRC

Une comparaison du C-ITS européen avec les normes de communication dédiées à courte portée (DSRC) des États-Unis dans IEEE 1609 [Festag, 2015] et SAE J2735 [Özyilmaz and Parker, 2018] révèle de nombreuses similitudes [Ansari et al., 2017]. Les deux approches fonctionnent dans la bande de fréquence 5,9 GHz avec plusieurs canaux de 10 MHz, et reposent sur le mode OCB de la norme IEEE 802.11, tandis que la variante européenne ITS-G5 prend en compte les besoins spécifiques de l'Europe et intègre également des canaux de service au niveau du réseau RLAN<sup>34</sup> (5.4–5.7 GHz) pour les applications ITS.

En outre, l'approche américaine repose largement sur des messages de sécurité basique (BSM<sup>35</sup>) pour les applications anti-collisions. En revanche, les systèmes C-ITS utilisent plusieurs types de messages de sécurité, notamment les messages CAM comme étant des messages périodiques (Section 1.7.3.3.1), et DENM pour recueillir des informations de sécurité déclenchées par des événements (Section 1.7.3.3.2).

Les deux approches (C-ITS et DSRC) font l'objet d'harmonisation au niveau gouvernemental entre les États-Unis, l'Europe, et le Japon, et au niveau industriel entre C2C-CC et CAMP<sup>36</sup> du côté américain.

Globalement, les similitudes entre les normes européennes C-ITS et les normes américaines DSRC prévalent, ce qui permet des implémentations multimodales ou doubles pile à des coûts raisonnables, bien que des différences conceptuelles majeures pour la dissémination de données subsistent.

---

34. RLAN ou Réseaux Locaux Radioélectriques désigne communément les réseaux Wi-Fi désigné souvent par le terme WLAN.

35. Un message BSM (Basic Safety Message) contient deux parties. La première partie est constituée de données basiques (taille du véhicule, position, vitesse, accélération et état du système de freinage). La deuxième partie contient des données variables en fonction des événements (par exemple : système ABS activé).

36. Le CAMP (Crash Avoidance Metrics Partnership) a été formé entre Ford et General Motors afin d'accélérer la mise en œuvre des mesures de prévention des collisions dans les véhicules, pour améliorer la sécurité routière.

| Technique                  | DSRC  | C-ITS  |
|----------------------------|---|--|
| Fréquence                  | 5.850-5.925 GHz                                 | 5.875-5.905 GHz  |
| Couche MAC/PHY             | IEEE 802.11p                                    | ETSI ITS-G5  |
| Couche Réseau et transport | WSMP (wave short message protocol) de IEEE 1609 | (BTP) au dessus de la couche des services GeoNetworking défini par ETSI EN 302 636 |
| Portée de transmission     | 300 - 1000 m                                    | 150 - 1000 m   |
| Protocole de sécurité      | BSM de IEEE 1609.2                              | CAM & DENM   |
| Débit de données           | 6 Mbps - 27 Mbps                                | 6 Mbps - 12 Mbps   |
| Potentiel d'interférence   | Faible  | Moyen  |
| Nombre de canaux dédiés    | 7 canaux opérationnels                          | 7 dont 2 sont en cours de standardisation  |

Tableau 1.5 : Tableau comparatif entre C-ITS et DSRC.

## 1.8 Applications et simulateurs

Plusieurs simulateurs et applications de réseaux sans fil ont été proposés dans la littérature. Dans cette section, nous allons introduire les simulateurs les plus utilisés pour les réseaux, et ceux utilisés pour simuler le trafic routier. La fin de cette section sera consacrée à la présentation de plusieurs projets dans le domaine. La structure d'un environnement de simulation de réseaux véhiculaires est détaillé dans la figure 1.14.

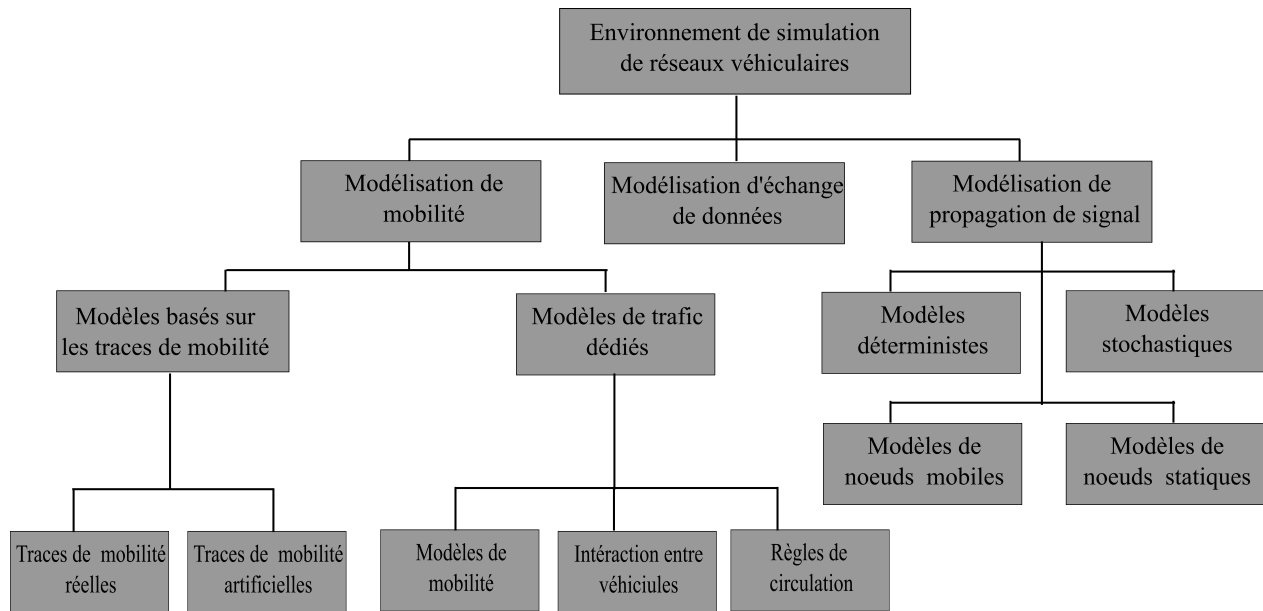


FIGURE 1.14 : Structure d'un environnement de simulation de réseaux véhiculaires.

### 1.8.1 Simulateurs de réseaux

Les outils de simulation de réseaux sont utilisés pour la construction d'un réseau virtuel, afin de permettre une simulation détaillée des paquets envoyés, et avoir des informations sur le débit de transmission de données. La plupart des simulateurs de réseau existants sont conçus pour les réseaux mobiles. Certaines extensions sont requises pour simuler des réseaux véhiculaires. Les outils de simulation les plus utilisés pour les réseaux véhiculaires sont récapitulés dans le tableau 1.6.

| Simulateur                           | Compatible avec le générateur de Mobilité | Consommation de mémoire | Temps d'exécution | IHM | Simulation distribuée | Prise en charge 802.11p | Langage de simulation |
|--------------------------------------|---|-------------------------|-------------------|-----|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| NS2 [Pathan, 2016]                   | Sumo & MOVE                               | Réduite                 | Moyen             | Non | Oui                   | Version NS2.33          | C++ & OTCL            |
| NS3 [Jha and Kharga, 2015]           | Sumo                                      | Réduite                 | Moyen             | Non | Oui                   | Oui                     | C++ & Python          |
| SimPy [Pinho et al., 2018]           | Simpy                                     | Haute                   | Élevé             | Non | Non                   | Non                     | Python                |
| QualNet [Kumar et al., 2016]         | QualNet                                   | Moyenne                 | Optimisé          | Oui | Oui                   | Oui                     | Parsec C++            |
| OmNet++ [Inzillo and De Rango, 2016] | Sumo                                      | Moyenne                 | Moyenne           | Oui | Oui                   | Oui                     | C++                   |
| OPNET [Li et al., 2016]              | Sumo                                      | Moyenne                 | Réduit            | Oui | Oui                   | Oui                     | C++ & OTCL            |
| NetSim [Khurana et al., 2018]        | MatlLab/SUMO                              | Haute                   | Moyen             | Oui | Oui                   | Oui                     | Java                  |
| GroovNet [Mussa et al., 2015]        | GrooveNet                                 | Moyenne                 | Moyen             | Oui | Oui                   | Oui                     | C++                   |
| MobiReal [Chaubey, 2016]             | MobiReal                                  | Haute                   | Élevé             | Oui | Oui                   | Non                     | C++                   |
| NCTuns [Benkirane et al., 2015]      | NCTuns                                    | Moyenne                 | Réduit            | Oui | Non                   | Non                     | Perl & C              |
| J-Sim [Tarapiah et al., 2017]        | /   | Réduite                 | Moyen             | Oui | Oui                   | Non                     | Java                  |
| JiST/SWANS [Sheikh et al., 2018]     | SWANS & TIGER                             | Moyenne                 | Important         | Oui | Non                   | Non                     | Java                  |
| Mininet [Fontes et al., 2015]        | Sumo                                      | Moyenne                 | Moyen             | Oui | Oui                   | Oui                     | Python                |

Tableau 1.6 : Synthèse sur les différents simulateurs de réseaux.

### 1.8.2 Simulateurs de trafic routier

Il existe aujourd'hui plusieurs simulateurs de trafic routier permettant de modéliser la mobilité des véhicules au niveau macroscopique et / ou microscopique. Chaque simulateur présente des avantages et des inconvénients. Ces derniers doivent répondre à plusieurs critères liés au simulateur, tels que les formats de carte supportés, les algorithmes d'intersection et de routage implémentés, visualisation des résultats, etc. Dans le tableau 1.7, une synthèse sur les simulateurs de trafic routier les plus performants est présentée.

| Simulateur                              | Modèle de réseau             | Consommation de mémoire | Temps d'exécution | GUI | Simulation distribuée | Prise en charge 802.11p | Langage de simulation |
|---|------------------------------|-------------------------|-------------------|-----|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| VanetMobiSim [Phouthone and Dong, 2015] | NS2                          | Moyenne                 | Important         | Oui | Oui                   | Non                     | Java                  |
| GlomoSim [Nayyar and Singh, 2015]       | GlomoSim                     | Réduite                 | Moyen             | Oui | Oui                   | Non                     | C++ & Java            |
| CityMob [Yusuf and Altılar, 2017]       | NS2                          | Moyenne                 | Moyen             | Oui | Oui                   | Non                     | C                     |
| MOVE [Salman et al., 2016]              | NS2                          | Moyenne                 | Important         | Oui | Non                   | Non                     | Java                  |
| Sumo [Codeca et al., 2017]              | NS2, NS3, OMNet++, OPNET,... | Moyenne                 | Moyen             | Oui | Oui                   | Oui                     | C++                   |
| VACaMobil [Zaidi et al., 2016]          | OMNet++                      | Haute                   | Important         | Oui | Oui                   | Oui                     | C++ & NED             |
| VERGILIUS [Silva et al., 2015]          | QualNet                      | Réduite                 | Moyen             | Oui | Non                   | Non                     | /                     |
| CORSIM [Lim et al., 2016]               | QualNet                      | Réduite                 | Réduit            | Non | Non                   | Non                     | VBScript              |
| PARAMICS [Lim et al., 2016]             | NS2                          | Moyenne                 | Moyen             | Oui | Oui                   | Oui                     | C/C++                 |

Tableau 1.7 : Synthèse sur les différents simulateurs de trafic routier.

Les simulateurs de trafic routier permettent de générer un modèle de mobilité, qui regroupe un ensemble de règles. Ces règles définissent la manière dont les nœuds (participants au trafic) seront générés et leur schéma de déplacement.

L'utilisation d'un modèle de mobilité simple, généré aléatoirement est une pratique courante pour la communauté de recherche V2X au cours des années précédentes, mais il est évident que ces modèles ne sont pas assez précis, car de nombreux facteurs de trafic microscopiques (tels que l'accélération / le freinage de la voiture, la file d'attente à l'intersection, etc.) ont un impact direct sur les performances du réseau sont ignorés dans ces modèles. Les principaux concepts nécessaires pour générer un modèle de mobilité sont récapitulés dans la figure 1.15.

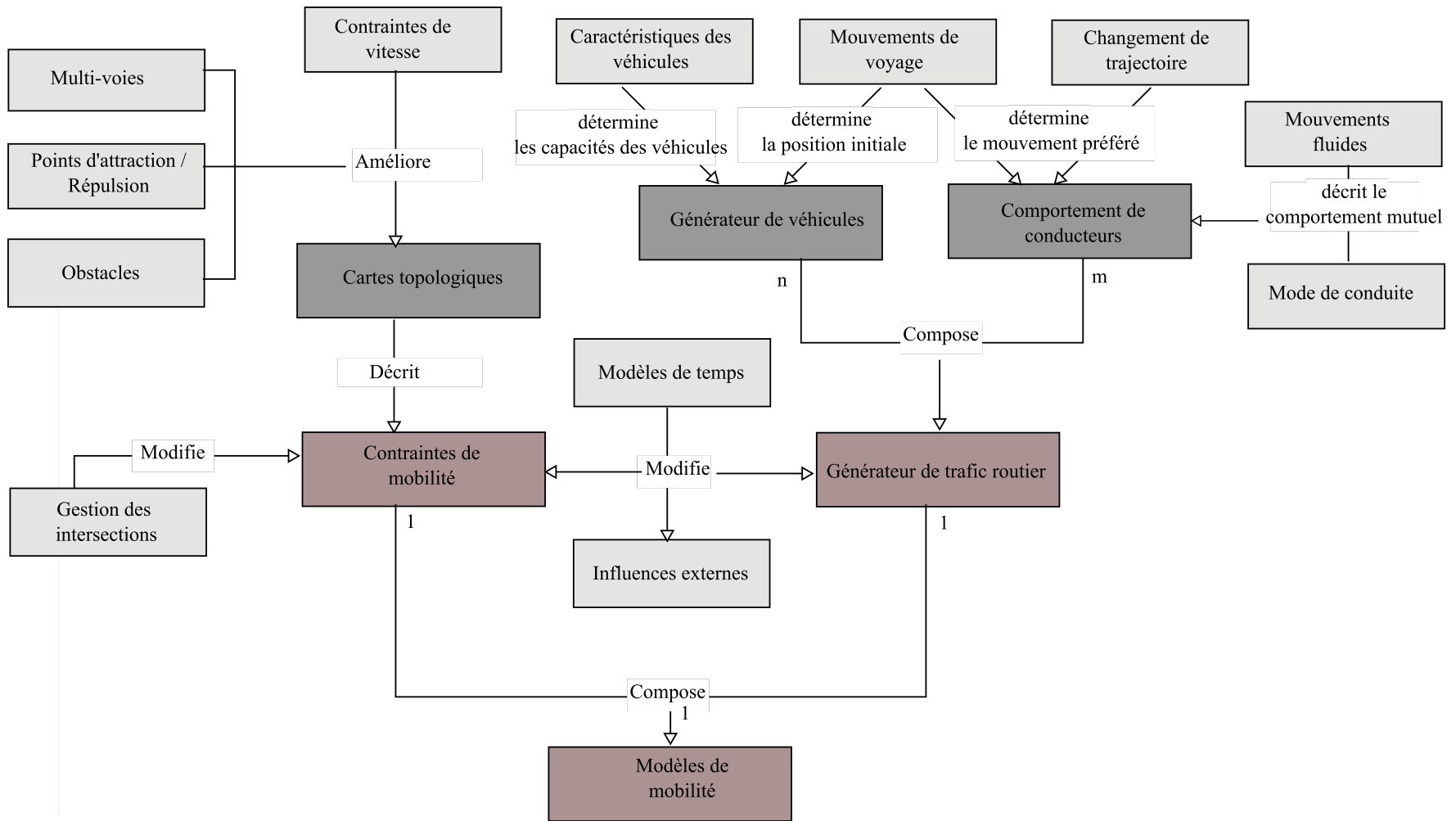


FIGURE 1.15 : Schéma de génération d'un modèle de mobilité.

| Simulateur  | Modèle de Mobilité | Modèle de réseau | Consommation de mémoire | Temps d'exécution | GUI | Simulation distribuée | Prise en charge 802.11p | Langage de simulation    |
|---|--------------------|------------------|-------------------------|-------------------|-----|-----------------------|-------------------------|--------------------------|
| Ventos<br>[Amoozadeh et al., 2015]                    | Sumo               | OmNet++          | Haute                   | Important         | Non | Non                   | Oui                     | C++                      |
| Itetris [Soua et al., 2018]                           | Sumo               | NS3              | Moyenne                 | Moyen             | Non | Oui                   | Oui                     | XML, Java, Python et C++ |
| VanetSim [Tomar et al., 2019]                         | VanetSim           | VanetSim         | Réduite                 | Réduit            | Oui | Oui                   | Oui                     | Java                     |
| TraNs [Fujii et al., 2017]                            | Sumo               | NS2              | Moyenne                 | Important         | Oui | Oui                   | Non                     | C++ & OTCL               |
| OVNIS [Pigné et al., 2010]                            | Sumo               | NS3              | Haute                   | Moyen             | Non | Oui                   | Non                     | C++ & Python             |
| ASH [Elbery et al., 2015]                             | IDM/MOBIL, IVG     | SWANS            | Haute                   | Important         | Non | Non                   | Non                     | Haskell                  |
| Veins [Emara, 2016]                                   | Sumo, IVC          | OMNET++          | Moyenne                 | Moyen             | Oui | Oui                   | Oui                     | C++ &                    |
| EstiNet<br>[Urquiza-Aguiar et al., 2016]              | EstiNet            | NCTUns           | Réduite                 | Moyen             | Oui | Oui                   | Oui                     | Python & C/C++           |
| CanuMobiSim<br>[Poonia and Bhargava, 2016]            | GloMoSim           | NS2, QualNet     | Moyenne                 | Moyen             | Oui | Non                   | Non                     | Java                     |
| VSimRTI [Goebel et al., 2016; Protzmann et al., 2017] | Sumo & PHABMACS    | NS3 & OMNeT++    | Réduite                 | Moyen             | Oui | Oui                   | Oui                     | Java                     |

Tableau 1.8 : Synthèse sur les différents simulateurs des réseaux véhiculaires.

### 1.8.3 Consortium et projets

Beaucoup d'activités de recherche, de développement et de standardisation de la communication automobile sont actuellement en cours. En Europe et dans le monde entier, des projets majeurs ont été amorcés pour constituer la base d'un système de transport intelligent européen.

La normalisation des communications entre véhicules est appuyée par les groupes de travail suivants : IEEE, IETF, ETSI, ISO, SAE<sup>37</sup>, ASTM<sup>38</sup> et les consortiums suivants : C2C-CC et VSC.

#### 1.8.3.1 Le consortium Car2Car (C2C-CC)

Ce consortium s'est fixé comme objectif d'améliorer la sécurité routière, et de gérer efficacement le trafic à travers l'utilisation des communications inter-véhicules (IVC). Les principales missions du consortium de communication Car2Car sont les suivantes :

1. La création d'un standard européen ouvert pour les communications V2V et basé sur des communications sans fil.
2. Le développement de prototypes et de démonstrateurs des systèmes V2V pour les applications de sécurité routière.
3. La promotion de l'attribution d'une bande de fréquence exclusive libre pour les applications de type « Car2Car » en Europe.
4. Le développement des stratégies de déploiement et des modèles économiques pour la pénétration du marché.

En 2007, un processus de développement des normes pour les STI coopératifs avec des systèmes de communication inter-véhiculaires est lancé [Baldessari et al., 2007]. Ce consortium travaille en collaboration avec les organisations de normalisation européennes et internationales, en particulier l'**ETSI TC ITS** [Ström, 2011], afin de parvenir à des normes

---

37. SAE pour Society of Automotive Engineers.

38. ASTM pour American Society for Testing and Materials.

européennes communes pour les STI. Les technologies adoptées dans différents segments sont principalement basées sur les normes Wi-Fi (**WLAN** ou **IEEE 802.11**), bien que d'autres technologies radio (**GPRS**, **EDGE**, **UMTS**, **WIMAX**) sont considérées dans l'architecture du protocole de communication du système Car2Car (cf. Figure 1.16).

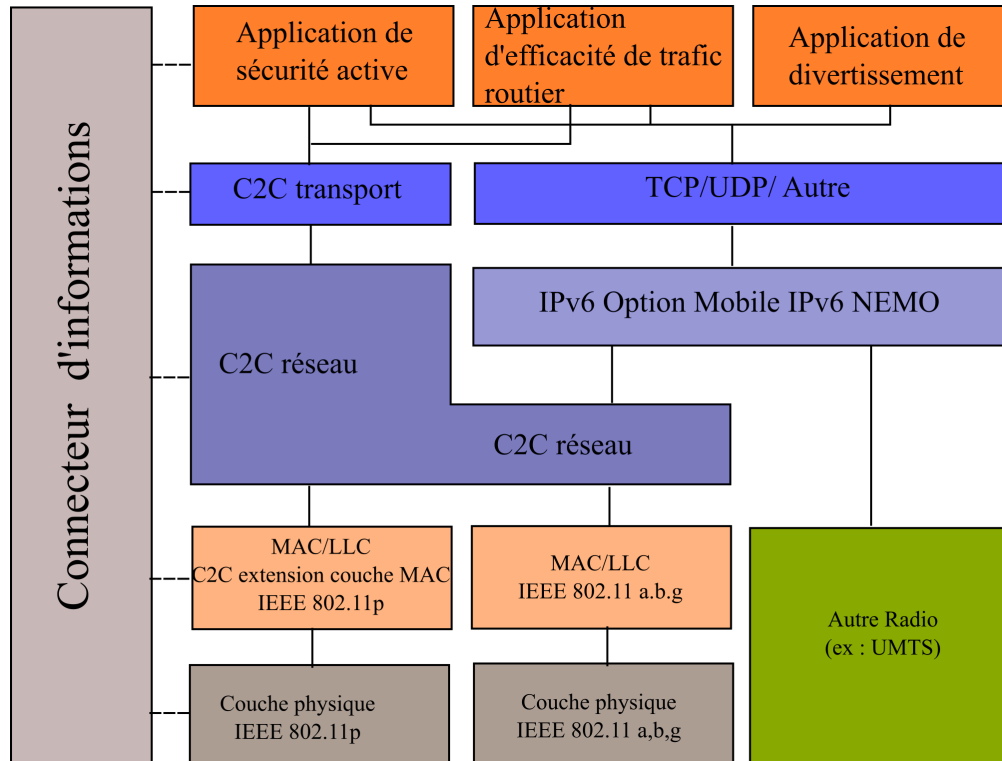


FIGURE 1.16 : Architecture des protocoles de communication du système Car2Car [Baldessari et al., 2007].

### 1.8.3.2 Le consortium CAMP-VSC3

Le consortium CAMP<sup>39</sup>-VSC3<sup>40</sup> regroupe plusieurs compagnies d'industrie mobile (comme Ford Motor Company, General Motors LLC., Honda R&D Americas,...). Ce consortium visait à développer et à tester des systèmes de sécurité pour les véhicules basés sur la communication afin de déterminer si les communications dédiées à courte portée (DSRC) à 5,9 GHz,

39. CAMP pour Crash Avoidance Metrics Partnership.

40. VSC pour Vehicle Safety Communications.

associées au positionnement du véhicule, peuvent améliorer les systèmes de sécurité autonomes basés sur le véhicule et /ou les applications de sécurité basées sur les communications [Ahmed-Zaid et al., 2011].

Ce consortium a lancé un projet connu sous le nom VSC-A dans le domaine des applications de sécurité sans fil [Khaliq et al., 2017]. Ce programme a pour objectif de :

- Évaluez comment les systèmes de positionnement DSRC+ permettent de traiter et d'améliorer les scénarios de sécurité imminents en cas de collisions dans des systèmes autonomes.
- Définir un ensemble d'applications de sécurité des véhicules basées sur le positionnement DSRC + et leurs spécifications, y compris les exigences de performances système minimales.
- Développer une architecture de communication, des protocoles et un cadre de messagerie (interfaces) communs et évolutifs, nécessaires pour assurer l'interopérabilité et la cohésion entre les différents constructeurs de véhicules, et standardiser cette infrastructure de messagerie et les protocoles de communication (y compris les ensembles de messages) pour faciliter le déploiement futur.
- Développer une technologie de positionnement précise pour les véhicules, et qui est conforme avec le standard DSRC 5,9 GHz, pour prendre en charge un maximum d'applications de sécurité qui ont des avantages potentiels importants.
- Développer et vérifier un ensemble de procédures de test objectif (OTP pour Objective Test Procedures) pour les applications de communication relatives à la sécurité des véhicules.

### 1.8.3.3 Projets R&D

Plusieurs projets ont été élaborés pour les systèmes de transport intelligents. Dans le Tableau 1.9, les projets les plus importants sont récapitulés.

| Projet                                       | Pays      | Durée      | Système de communication adopté | Protocoles de routage        | Objectifs   |
|--|-----------|------------|---------------------------------|------------------------------|---|
| FleetNet [Festag et al., 2004]               | Europe    | 2000-2004  | UMTS                            | Routage géographique         | Développer une plate-forme de communication pour les réseaux véhiculaires, et standardiser les solutions.           |
| NoW [Festag et al., 2008]                    | Allemagne | 2004-2008  | Wi-Fi                           | Geocast                      | Développer un système de communication intégrant les applications de sécurité et de confort, successeur de FleeNet. |
| IST CarTalk 2000 [Dinesh and Deshmukh, 2014] | Europe    | 2001-2004  | UMTS et Wi-Fi                   | Géographique (GSR)           | Développer des systèmes coopératifs d'aide à la conduite, et mettre en œuvre un réseau sans fil auto-organisé.      |
| Prevent [Schulze et al., 2008]               | Europe    | 2004- 2008 | Wi-Fi                           | Géographique                 | Développer des applications et des technologies préventives de sécurité routière.                                   |
| Sevecom [Wiedersheim et al., 2009]           | Europe    | 2006-2008  | Wi-Fi                           | Routage basé sur la sécurité | Sécuriser les communications.   |
| SAFESPOT [Schubert et al., 2007]             | Europe    | 2006-2010  | IEEE 802.11p                    | Routage basé sur la sécurité | Développer des applications liées à la sécurité.  |
| CVIS [Yang et al., 2012]                     | Europe    | 2006-2010  | DSRC                            | Géographique                 | Permettre à un ensemble de services coopératifs de s'exécuter dans un cadre d'application ouvert.                   |

|                                    |        |           |   |                              |   |
|------------------------------------|--------|-----------|---|------------------------------|---|
| Watch-Over [Andreone et al., 2007] | Europe | 2006-2008 | IEEE 802.15.4, IEEE 802.11, WiMaX et DSRC | Géographique                 | Concevoir un système coopératif pour la prévention des accidents dans les zones particulièrement accidentogènes.      |
| GST [Chen et al., 2011a]           | Europe | 2004-2007 | Wi-Fi et ATM <sup>41</sup>                | Routage basé sur la sécurité | Développer une architecture ouverte et standardisée pour des services télématiques automobiles.                       |
| COOPERS [Piao et al., 2012]        | Europe | 2006-2010 | GSM, GPRS, UMTS, Wi-Fi et DSRC            | Routage basé sur la sécurité | Créer des applications basées sur l'infrastructure pour la gestion coopérative du trafic.                             |
| Itetris [Rondinone et al., 2013]   | Europe | 2008-2011 | WAVE (802.11p), WiMaX, DVB-H et UMTS      | Routage dynamique            | Créer une plateforme de simulation de la circulation et des communications V2X à la fois globale, durable et ouverte. |
| GeoNet [Sarakis et al., 2016]      | Europe | 2008-2010 | DSRC                                      | Géographique                 | Échange d'informations sur la congestion avec des véhicules dans une zone géographique donnée (Geo-Networking).       |

41. ATM ou Asynchronous Transfer Mode est un protocole de communication qui permet de transporter les données de façon uniforme dans un réseau à haut débit

|   |        |            |                           |                                      |  |
|---|--------|------------|---------------------------|--------------------------------------|--|
| Pre-Drive [Sehgal et al., 2018]         | Europe | 2008-2010  | /                         | /                                    | Développement d'un prototype de communication véhiculaire, pour l'utiliser dans des tests opérationnels sur le terrain.                                |
| VII [Zulkeffi et al., 2014]             | USA    | 2003-2009  | Wi-Fi et DSRC             | Géographique et basé sur la sécurité | Développer un programme coopératif de recherche en ingénierie de véhicules, basé sur DSRC.   |
| Intelli-Drive [Adebiaye, 2017]          | USA    | 2009- 2013 | DSRC                      | Basé sur la sécurité                 | Projet américain principal sur les véhicules coopératifs, basé sur les nouvelles technologies ; suite de VII.  |
| AHS [González et al., 2016]             | Japan  | 1970-2008  | Wi-Fi                     | Basé sur la priorité et la demande   | Conservation de l'énergie ou la prévention du réchauffement climatique.  |
| InterSafe [Westhoff and Roessler, 2010] | Europe | 2008-2011  | Wi-Fi                     | Basé sur la sécurité                 | Développer un système de sécurité d'intersection (CISS) coopératif capable de réduire le nombre d'accidents mortels et de blessures aux intersections. |
| PRESERVE [Lagana et al., 2012]          | Europe | 2011-2012  | GSM, GPRS, UMTS et ITS G5 | Géographique                         | Sécuriser les communications V2X.  |
| CarTel [Hull et al., 2006]              | USA    | 2004-2010  | CafNet <sup>42</sup>      | CNL <sup>43</sup>                    | Efficacité et sécurité du transport routier en se basant sur les services de Cloud.  |

42. CafNet pour Carry-and-forward DTN(réseaux tolérant aux délais)

43. CNL pour CafNet NetworkLayer(

|                                  |        |           |        |   |  |
|----------------------------------|--------|-----------|--------|---|--|
| E-Frame [Jesty and Bossom, 2011] | Europe | 2008-2011 | ITS-G5 | Dynamique, géographique et basé sur la sécurité | Extension de l'architecture européenne des STI pour les véhicules coopératifs.         |
| ASV-4 [Eze et al., 2014]         | Japan  | 2005-2010 | DSRC   | Géographique                                    | Développer des véhicules coopératifs conformes aux normes de communication japonaises. |
| COMeSafety [Eloranta, 2013]      | Europe | 2006-2009 | DSRC   | Géographique                                    | Développer une architecture européenne des communications STI.                         |

Tableau 1.9 : Synthèse sur les différents projets ITS.

## 1.9 Problématiques de recherche

Plusieurs pistes de recherche, qui concernent les réseaux véhiculaires sont encore peu explorées. Les axes de recherche les plus importants sont discutés dans les sections qui suivent.

### 1.9.1 Routage de l'information

Les entités principales sont mobiles et présentent généralement une topologie dynamique. Il est donc nécessaire de mettre en place des liens de communications multi-sauts pour acheminer les informations. Cependant, à l'inverse des réseaux fixes, les éléments réalisant le routage dans le réseau véhiculaire sont les véhicules eux-mêmes, donc le routage est une tâche primordiale pour l'acheminement de l'information. Plusieurs travaux sont en cours de développement dans ce domaine [Dutta and Thalore, 2017] (cf. Chapitre 2, Section 2.4.2).

### 1.9.2 Travaux de standardisation

Différents travaux de standardisation sont en cours de réalisation [Nguyen et al., 2018]. Ces derniers concernent principalement les couches de communication et sont dirigés par les équipes IEEE [Da Cunha et al., 2014]. Les réseaux véhiculaires peuvent être composés de différents types de véhicules tels que les camions, les voitures, les tramways, les autobus, les taxis, les motos et les vélos. Dans les différents scénarios de réseaux véhiculaires, il est important que tous ces éléments soient capables de communiquer entre eux en utilisant le même protocole. Ceci peut être atteint seulement dans le cas, où il y aurait des efforts de normalisation impliquant l'industrie, le gouvernement et le milieu académique [Karagiannis et al., 2011].

### 1.9.3 Développement de protocoles liés à la sécurité de données

Vu l'importance des informations échangées entre les véhicules et l'ouverture de l'environnement véhiculaire, un « attaquant » peut émettre des messages d'alerte dont le contenu est falsifié, ou empêcher l'acheminement d'un message légitime afin de perturber les informations disséminées avec des conséquences qui peuvent être plus ou moins graves. Plusieurs travaux de sécurisation sont au cours de développement parmi lesquels la sécurisation des routes d'acheminement des messages [Sharma and Kaul, 2018].

### 1.9.4 Utilisation des services de Cloud

Les solutions actuelles apportées par les systèmes de transport intelligents visent principalement à améliorer la sécurité routière et à assurer le confort des passagers. Les technologies de cloud computing ont le potentiel d'améliorer la sécurité routière et les retours de voyage dans les STI en offrant des solutions souples (Par exemple : proposition de routes alternatives, synchronisation des feux de circulation, etc.). L'ensemble des solutions de Cloud proposées pour les réseaux véhiculaires (VCC ou Vehicular Cloud Computing) vise à traiter les phénomènes complexes impliqués dans les réseaux véhiculaires (grande mobilité, grand nombre de nœuds et conditions environnementales difficiles), les protocoles et les applications doivent être testés en profondeur afin de garantir des solutions fiables [Singh et al., 2018; Liu et al., 2017].

### 1.9.5 Développement de systèmes de gestion du trafic pour le traitement de données sensibles

La croissance urbaine et la grande mobilité des populations ont impacté l'augmentation du nombre de véhicules sur les routes, ce qui a posé de nombreux problèmes aux autorités de gestion du trafic routier concernant les embouteillages, les accidents et la pollution atmosphérique. Au cours des dernières années, des chercheurs de l'industrie et du milieu uni-

versitaire ont concentré leurs efforts sur l'exploitation des nouvelles techniques et atouts en matière de détection, de communication et de technologies mobiles pour rendre les routes plus intelligentes. Les systèmes de gestion de trafic routier (plus souvent connu sous le terme TMS (Traffic Management Systems)) sont devenus plus efficaces pour faire face aux problèmes cités ci-dessus dans les villes intelligentes (ou Smart Cities en anglais) [Punjani and Dixith, 2017]. Cependant, ces efforts sont encore insuffisants pour mettre en place un système de gestion de trafic routier fiable, sécurisé et capable de gérer l'augmentation imprévisible de la population et des véhicules dans les villes intelligentes. Les principaux travaux de recherche qui s'inscrivent dans ce domaine, portent essentiellement sur le développement des systèmes autopilotés pour les véhicules intelligents [Sun and Liang, 2018; Klinger et al., 2017], et le développement d'une infrastructure routière intelligente et coopérative [Ota et al., 2017; Bellaouar et al., 2018].

### 1.9.6 Gestion et stockage de données

Comme indiqué ci-dessus, les réseaux véhiculaires peuvent avoir une densité variable pouvant atteindre des millions de véhicules (réseaux véhiculaires à grande échelle). Donc, une quantité importante de données est échangée et doit être stockée et distribuée à travers les véhicules. En raison de cette caractéristique, et comme indiqué dans la section 1.3, des communications à grande échelle avec des quantités massives de données produites, ainsi que les propriétés dynamiques inhérentes des réseaux véhiculaires, posent de nouveaux défis uniques à la gestion des données dans les réseaux véhiculaires [Wolfson et al., 2009; Jiang et al., 2017].

### 1.9.7 Coopération avec d'autres réseaux

Les conducteurs et les passagers d'un réseau véhiculaire interagissent avec d'autres personnes, des applications externes et des services fournis par d'autres réseaux [Hua et al., 2017; Li et al., 2018; Santamaria et al., 2018]. Cette coopération peut être utile pour fournir un bon service à l'utilisateur (comme l'état du trafic routier, les conditions climatiques, inter-

net, etc.). Ces informations sont obtenues par interaction avec d'autres réseaux, comme les réseaux de capteurs, internet et d'autres services. Pour une meilleure coopération, les protocoles et les services développés pour les réseaux véhiculaires doivent s'adapter aux meilleures stratégies fournies par un plan optimal qui combine plusieurs types de réseaux [Santamaria et al., 2018].

### 1.9.8 Dissémination de données

Cet axe concerne les méthodologies de diffusion de l'information, qui prennent en compte certains paramètres relatifs aux types de problèmes traités [Chaqfeh et al., 2014]. Plusieurs techniques peuvent être exploitées telles que l'agrégation [Xu et al., 2017], le clustering [Cooper et al., 2017], les techniques d'ordonnancement [Ramesh and Kamalavathi, 2017], etc. Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans cet axe de recherche, qui sera détaillé dans le chapitre 2.

## 1.10 Conclusion

Les réseaux véhiculaires constituent un nouveau type de réseaux issu des réseaux mobiles (MANET). Leur particularité provient des communications qui sont mises en œuvre soit entre des véhicules soit entre un véhicule et une infrastructure. La mobilité est également largement plus contrainte que dans les réseaux Ad-Hoc traditionnels. Cette technologie émergente suscite un intérêt certain dans le but d'améliorer la sécurité et l'efficacité des transports routiers ainsi que l'amélioration du confort de l'utilisateur en lui fournissant une multitude de services d'information, d'aide à la décision, de guidage et d'accès à internet.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales entités qui influencent les différentes applications dans les réseaux véhiculaires, ainsi que les caractéristiques de ces derniers. Les applications fournies par les réseaux véhiculaires sont essentielles pour garantir une meilleure sécurité et un bon confort aux conducteurs. La plupart des applications développées pour

les réseaux véhiculaires reposent sur la communication V2X. Vu que la communication intervéhiculaire est généralement instable, diverses technologies de communication peuvent être impliquées afin d'améliorer la fiabilité et la disponibilité des données. Nous nous sommes intéressés à la présentation de différentes technologies d'accès, disponibles, qui peuvent être utilisées pour garantir un meilleur rendu en terme d'échanges d'informations avec des entités hétérogènes.

Nous avons également donné dans ce chapitre un aperçu sur les différents travaux de standardisation et de normalisation. Ces derniers sont principalement dirigés par le groupe IEEE 1609 et l'institut européen des communications standards (ETSI). Plusieurs projets en relation avec le secteur industriel ont été développés au cours de ces dernières années afin d'améliorer la sécurité active en temps réel. Ces derniers sont dirigés par des communautés de recherche scientifique et des consortiums qui regroupe plusieurs secteurs. Différents outils de simulation ont été développés en parallèle avec les progrès des travaux de standardisation et de normalisation. Les différents simulateurs de réseaux véhiculaires regroupent généralement deux parties qui communiquent : une partie qui définit les principaux éléments du trafic routier, et une deuxième qui intègre les différents paramètres et protocoles réseau.

L'évolution des véhicules intelligents a suscité l'intérêt des chercheurs et des industriels, et a contribué à l'apparition de plusieurs axes de recherche dans les réseaux véhiculaires. Les problématiques de recherche les plus importantes ont été soulignées dans ce chapitre. La dissémination d'informations dans les réseaux véhiculaires est un axe de recherche très important, vu la nature des communications intermittentes causées par la mobilité des nœuds. Pour pallier à ces problèmes, il paraît nécessaire d'avoir des méthodes et des protocoles de dissémination de données en respectant les contraintes temporelles. Le chapitre suivant présente les travaux qui portent sur la dissémination de données basée sur plusieurs techniques (clustering, agrégation de données, etc.).



# Dissémination de l'information dans les réseaux véhiculaires

## **2.1 Introduction**

La dissémination de l'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 encore d'autres caractéristiques.

## **2.2 Paramètres pris en compte dans la dissémination de données**

La grande mobilité des réseaux véhiculaires implique le changement de topologie et de l'état du réseau. Pour une meilleure diffusion de l'information entre les nœuds, la prise en compte de plusieurs paramètres est nécessaire.

### 2.2.1 Notion de qualité de service

Le terme QdS (acronyme de Quality of Service, en français, Qualité de Service) désigne la capacité à fournir un service (notamment un support de communication) conforme à des exigences en matière de temps de réponse et de bande passante.

Appliquée aux réseaux à commutation de paquets, la QdS désigne l'aptitude à pouvoir garantir un niveau acceptable de perte de paquets, défini contractuellement, pour un usage donné (voix sur IP, vidéo-conférence, etc.).

Le terme **niveaux de service** (en anglais, service level) définit le niveau d'exigence pour la capacité d'un réseau à fournir un service point à point ou de bout en bout avec un trafic donné. On définit généralement trois niveaux de QdS :

- Meilleur effort (en anglais, best effort) : il ne fournit aucune différenciation entre plusieurs flux réseaux ne permettant aucune garantie. Ce niveau de service est ainsi parfois appelé manque de QdS.
- Service différencié (en anglais, differentiated service ou soft QoS) : il permet de définir des niveaux de priorité pour les différents flux réseau sans toutefois fournir une garantie stricte.
- Service garanti (en anglais, guaranteed service ou hard QoS) : il consiste à réserver des ressources réseaux pour certains types de flux.

Les principaux **critères de qualité de service** sont les suivants :

- Débit (en anglais, bandwidth) : parfois appelé bande passante par abus de langage, il définit le volume maximal d'information (bits) par unité de temps.
- Gigue (en anglais, jitter) : elle représente la fluctuation du signal numérique, dans le temps ou en phase, c'est-à-dire les défauts (glissement de phase ou dispersion temporelle) sur l'amplitude ou la fréquence d'un signal autour des valeurs normalisées.
- Latence, délai ou temps de réponse (en anglais, delay) : elle caractérise le retard entre l'émission et la réception d'un paquet.

- Perte de paquets (en anglais, packet loss) : elle correspond à la non-délivrance d'un paquet de données, la plupart du temps due à un encombrement du réseau.
- Déséquencement (en anglais, desequencing) : il s'agit d'une modification de l'ordre d'arrivée des paquets.

### 2.2.2 Notion de priorité

La priorité est la caractéristique d'une tâche permettant de déterminer son accès à une ressource. Une tâche correspond à un traitement à réaliser. La ressource constitue le moyen qui permet de réaliser la tâche. Dans notre cas, la tâche consiste à disséminer l'information dans un réseau véhiculaire. Les ressources peuvent être récapitulées en deux groupes :

- ressources de collection et de traitement de l'information,
- ressources de transmission (principalement : les canaux de transmission).

### 2.2.3 Notion de temps réel

Toutes les données doivent être enregistrées, analysées, affichées (ou éditées), transmises ou bien diffusées en temps réel. Ce point est absolument essentiel pour une bonne prise de décisions. Pour garantir cet aspect, il est nécessaire d'utiliser des protocoles de transport temps réel (Real-Time Transport Protocol (RTP)) : il s'agit d'un ensemble de protocoles de communication informatique permettant le transport de données soumises à des contraintes de temps.

## 2.3 Techniques de dissémination de l'information dans les réseaux véhiculaires

Les approches de dissémination de données sont considérées comme un outil efficace pour améliorer la sécurité routière. La diffusion de messages d'avertissement entre les véhicules

d'un réseau pour signaler les obstacles potentiels sur la route permet d'éviter des situations dangereuses. Diverses méthodes de diffusion de données dans un réseau véhiculaires peuvent être utilisées pour informer les véhicules des conditions de circulation dynamiques afin de créer un système de transport sûr et efficace. Dans les sections suivantes, les techniques de dissémination de données sont discutées.

### 2.3.1 Dissémination opportuniste

C'est une architecture centrée sur les données, dans laquelle les applications permettent le transfert des données d'une manière aléatoire. Cette technique utilise la politique de stockage et de transfert (Carry and forward). De cette manière, les routes sont construites dynamiquement. Ces approches de diffusion de données sont proposées lorsque la connectivité réseau continue n'est pas garantie à cause de la fragmentation du réseau, qui peut se produire en raison de la faible densité du trafic ou de l'absence de couverture du réseau.

### 2.3.2 Dissémination géographique

La topologie des réseaux véhiculaires change fréquemment. Les routes doivent être maintenues chaque laps de temps en fonction de la position et la vitesse des nœuds. La diffusion géographique est utilisée en envoyant le message à diffuser au nœud le plus proche de la destination, qui à son tour, fera de même jusqu'à ce que la destination soit atteinte. La géo-diffusion est également utilisée pour envoyer un message à plusieurs nœuds dans une zone géographique [Mor, 2012].

### 2.3.3 Dissémination pair à pair (P2P)

Dans la diffusion P2P, le nœud source stocke les données dans son dispositif de stockage et ne les envoie que si un autre nœud les demande. Ceci est proposé pour une application tolérante au retard. Les systèmes de partage basés sur les communications P2P utilisent

le transcodage pour allouer de manière optimale les débits de partage pour tous les pairs participants. Les solutions présentées dans la littérature sont généralement adaptées aux transferts de fichiers multimédia (taille importante) [Lakas and Shaqfa, 2011; Chen and Cai, 2005]. Dans les techniques de dissémination P2P, le nœud source stocke les données dans son périphérique de stockage et envoie les données sur le réseau uniquement à la demande [Kaur and Kang, 2016].

### 2.3.4 Dissémination par agrégation de données

L'agrégation est une technique proposée dans certains travaux de recherche pour éviter les problèmes de tempêtes de diffusion (généralement connu sous le nom Broadcast Storm en anglais). Le volume de données et l'évolutivité sont les défis majeurs qui peuvent être rencontrés dans les applications basées sur les communications V2V. En outre, l'évolutivité devient un problème majeur quand les communications se font par le biais de plusieurs protocoles (hétérogénéité). Afin d'éviter les conditions de surcharge, la quantité de données transférées doit être optimisée [Sutariya and Pradhan, 2010]. Les informations corrélées provenant de différents véhicules peuvent être agrégées avant d'être livrées à la destination ou à d'autres véhicules. Par conséquent, les coûts de communication et les coûts peuvent être considérablement réduits grâce à ce processus [Pourghebleh and Jafari Navimipour, 2019].

### 2.3.5 Routage de l'information

Dans un réseau véhiculaire, les nœuds du réseau sont des véhicules roulant sur une route ou une autoroute. Il s'agit d'un réseau Ad-Hoc à forte mobilité. En effet, la différence entre la vitesse des véhicules influence la topologie du réseau qui évolue en permanence et rapidement. Il faut donc adapter les mécanismes de routage à ce contexte particulier. Plusieurs protocoles de routage proposés pour les réseaux mobiles (MANET) peuvent être exploités pour les réseaux véhiculaires, tout en considérant la nature très dynamique de ces réseaux.

### 2.3.6 Dissémination par clusterisation

Pour un meilleur taux de livraison de messages et pour réduire les tempêtes de diffusion, un message doit être relayé par un minimum de nœuds intermédiaires vers la destination. Pour cela, les nœuds sont organisés en clusters, dans lesquels un nœud ou plus gère l'envoi des données dans son cluster. Ce type de solution possède l'avantage de fournir un meilleur délai de propagation et un taux de livraison élevé.

### 2.3.7 Synthèse sur les techniques de dissémination

Les techniques présentées précédemment sont adaptées pour des densités et des scénarios de trafic routier bien précis. La mobilité est un facteur très important qui influence l'efficacité des méthodes de dissémination. Cette métrique doit être prise en compte dans les approches de dissémination de données afin d'éviter l'échange de données obsolètes. Chaque type de méthodes de dissémination d'information dans les réseaux véhiculaires présente des avantages et des inconvénients, qui sont essentiellement liés à la densité et à la mobilité des nœuds. Une étude synthétique sur les méthodes de dissémination est présentée dans le tableau 2.1.

## 2.4 Dissémination de l'information dans les réseaux véhiculaires

Dans cette section, les trois principaux types de protocoles de dissémination de données sont discutés. Les travaux de dissémination de données en mode P2P, géographique et par agrégation sont souvent associés à des travaux de routage, ou dans des approches opportunistes ou de clustering. Pour cela, ils ne sont pas détaillés dans des sections séparées.

## 2.4.1 Approches Opportunistes

Hormis les travaux sur l'acheminement d'informations dans les réseaux MANET, plusieurs contributions ont spécifiquement considéré le problème de dissémination des informations dans les réseaux véhiculaires. De nombreuses solutions de dissémination ont été proposées ces dernières années pour acheminer des informations à un ensemble de destinataires via un réseau véhiculaire.

### 2.4.1.1 Approche de Zhong et al.

Dans l'approche de [Zhong et al., 2008], les auteurs ont proposé un algorithme de dissémination de données en temps réel. Dans la méthode proposée, chaque véhicule prend sa décision en local (l'instant de diffusion, le nombre et les rapports qui seront diffusés). En utilisant un récepteur GPS pour localiser les véhicules, l'état du trafic routier est capté par partage d'informations en mode point-à-point (P2P). Dans les réseaux véhiculaires, chaque véhicule appartenant à ce réseau produit périodiquement un rapport sur le trafic routier, et le transfert à un véhicule éloigné par communication multi-sauts. L'algorithme proposé dans cet article, appelé « TrafficInfo », utilise la technique du « Rank Based Store And Forward ». Cette dernière fonctionne de la manière suivante :

1. Un véhicule (O) sélectionne les rapports les plus pertinents.
2. Il les diffuse à ses voisins.
3. Chaque véhicule du voisinage intègre les rapports reçus dans sa propre base de données.
4. Il fait un réarrangement de rapports et diffuse ensuite les k rapports les plus pertinents ; ainsi, ces derniers se propagent.

Seuls les rapports les plus pertinents sont sauvegardés quand la base de données devient trop volumineuse. Les principaux aspects de cette technique sont :

- La demande : Elle indique la pertinence du rapport avec la décision du véhicule (exemple : planification d'une route).

- L'offre : Elle indique le nombre de véhicules possédant le rapport. Un algorithme d'apprentissage automatique est utilisé pour estimer l'offre.

L'algorithme « TrafficInfo » classe les rapports en se basant sur la demande et l'offre des données recherchées, une nouvelle métrique appelée DIK (Difference In Knowledge) est utilisée comme mesure de performance. Cette métrique combine deux paramètres, le débit et le temps de réponse. Le modèle utilisé pour la mise en œuvre de cet algorithme contient :

- Une carte numérique : pour chaque segment  $S$  de la route, cette carte stocke l'identifiant de ce dernier, les coordonnées des extrémités de  $S$  et le temps estimé de déplacement d'un véhicule sur le segment, en considérant la vitesse maximale autorisée.
- Des rapports : ils comprennent les rapports de temps de déplacement et les rapports de la base de données.
- Un module de mise à jour de la carte numérique après réception des rapports.

Le nombre de rapports à diffuser est calculé par la formule GC (Good Citizen) [Wolfson et al., 2006]. L'offre est calculée par l'algorithme MALENA (MAchine LEarning based Novelty rAnking) [Zhong et al., 2008].

Le principe de l'algorithme « TrafficInfo » peut être résumé comme suit :

- En entrée, l'ensemble  $W$  des temps de déplacement produits ou reçus par un véhicule  $O$ , la carte numérique notée  $DM_o$ , la base des rapports du véhicule notée  $DB_o$ , et sa taille limite notée  $F_o$  sont fournis.
- Pour chaque rapport  $W$ , une mise à jour de  $DM_o$  se fait.
- Un processus de fusion de  $W$  avec  $DB_o$  et de sauvegarde des  $F_o$  premiers rapports dans cette dernière se lance.
- L'étape suivante consiste à calculer  $K$  (nombre des rapports à diffuser) en utilisant la formule GC.
- Et finalement, la diffusion des  $K$  premiers rapports présents dans  $DB_o$  est effectuée.

Le simulateur STRAW/SWANS [Barr and Haas, 2004; Choffnes and Bustamante, 2005] est utilisé pour simuler la mobilité des véhicules dans ce système. Ce dernier fournit un modèle microscopique de trafic routier.

### 2.4.1.2 Approche de Goel et al.

Dans le travail de **Goel et al.** [Goel et al., 2004], les auteurs considèrent que seulement une petite fraction des véhicules va participer. Tout véhicule participant est équipé d'un dispositif appelé « TrafficRep » [Goel et al., 2003]. Ce dispositif est responsable de la collection et de la dissémination des informations de trafic.

TrafficRep se connecte au système de navigation du véhicule, en lui fournissant les conditions actuelles du trafic routier. Ce dispositif apparaît comme une boîte noire pour le conducteur, il interagit seulement avec le système de navigation du véhicule en lui envoyant des requêtes (par exemple : « quel est l'itinéraire le plus rapide d'un emplacement  $x$  vers un emplacement  $y$  ? » ). Le système de navigation du véhicule envoie à son tour la requête à TrafficRep pour obtenir les informations actuelles du trafic sur différents tronçons de routes, puis il calcule l'itinéraire le plus rapide et l'affiche à l'utilisateur.

TrafficRep est relié à trois composants : le GPS, une carte numérique statique du réseau routier et une liaison Wi-Fi. La carte est organisée par segments, où chaque segment est un tronçon de route entre deux points successifs (points de sortie, jonctions, etc.). Au niveau de la base de données sont stockés deux attributs : les coordonnées GPS des points définissant un segment donné et le temps de déplacement libre sur ce segment.

TrafficRep utilise ces deux attributs pour calculer le temps de déplacement sur un segment donné. À chaque fois qu'un véhicule traverse un segment, le dispositif TrafficRep enregistre le temps de déplacement sous un rapport du journal de parcours (Travel Log Report-TLR) et le temps exact de production de ce dernier. TrafficRep dispose d'un mécanisme de mise à jour pour supprimer les anciens rapports. Ce dispositif est également responsable de la diffusion de ces rapports aux autres véhicules. En absence d'informations de trafic, le temps de déplacement libre est pris en compte. Les dispositifs TrafficRep ne communiquent pas entre eux.

Les auteurs ont utilisé un algorithme distribué pour déterminer à quel instant les rapports sont générés. La méthodologie suivie dans cette démarche consiste à :

- Déterminer le rayon de dissémination : la région étudiée est divisée en cellules, tout en considérant que chaque TLR est diffusé dans un rayon de dissémination. Le rayon de transmission est défini en fonction des cellules des grilles générées (TTL<sup>1</sup>). Ce paramètre est utilisé pour la simulation.
- Augmenter la bande passante : pour garantir une bonne dissémination des informations, le véhicule a besoin de prendre deux décisions : la date d'envoi du TLR et les informations incluses dans le TLR.

Pour mieux répondre à ces exigences, les auteurs ont utilisé deux projets :

- *Projet Naive* : dans ce projet, les véhicules ont un temps de dissémination maximum prédéfini. Chaque laps de temps, le véhicule diffuse un TLR [Goel et al., 2003].
- *Projet Smart* : contrairement au projet Naive, les véhicules diffusent les TLR seulement quand la différence entre le temps prévu de déplacement et le temps réel dépasse un certain seuil [Goel et al., 2003].

En ce qui concerne le traitement des mises à jour, après la réception d'un TLR, les véhicules mettent à jour les temps de déplacement estimés en utilisant une équation. Des métriques de performances ont été définies pour améliorer les résultats de l'algorithme au niveau :

- du temps de déplacement,
- de la bande passante consommée : c'est-à-dire le nombre moyen de rapports transmis par une cellule.

### 2.4.1.3 Approche de Nair et al.

Le protocole appelé « SMART » [Nair et al., 2013] utilise à la fois des techniques d'agrégation et de fragmentation des messages pour diminuer la redondance des transmissions. Dans ce travail, la classification des messages est basée sur l'approche de Schoch [Schoch et al., 2008]. En premier lieu, les messages sont classés comme suit :

---

1. TTL (Time To Live) est analogue à la notion de temps de vie ou de durée de vie dans les réseaux. Il indique le temps pendant lequel une information doit être conservée en cache.

1. Messages de sensibilisation coopérative (CAM) : ce sont des balises de messages envoyées par tous les véhicules (Voir section 1.7.3.3.1). Elles contiennent des informations générales telles que la position, la vitesse, l'accélération, etc.
2. Messages de notification environnementale décentralisée (DENM) : ce sont des messages qui concerne la détection d'un évènement (Voir section 1.7.3.3.2). Cette seconde catégorie de messages est divisée en quatre sous classes :
  - (a) messages d'informations,
  - (b) conduite assistée,
  - (c) service publique,
  - (d) sécurité active.

En ce qui concerne la fragmentation des données dans ce protocole, chaque donnée doit passer par deux processus. Le premier processus consiste à préciser à quelle catégorie le message appartient, cette catégorie est désignée par le paramètre MCN (Message Category Number). Le deuxième processus consiste à compléter le message par des paramètres spécifiques. La structure de données proposée pour le stockage des messages au niveau des nœuds est une table de hachage qui adopte l'algorithme de « Chainage Séparé » comme fonction de hachage, afin de prévenir les collisions. La valeur de MCN est utilisée comme une clé de hachage. La taille de la table dépend des catégories et sous catégories de messages. Chaque message possède un paramètre d'ancrage, il s'agit du premier paramètre de la structure du message, qui désigne l'ensemble des informations clé pour compléter le message, et un ensemble de paramètres de support. Pour améliorer l'efficacité de la localisation des messages, ces derniers sont répertoriés dans une table ordonnée selon le paramètre d'ancrage. La recherche d'un message est une recherche binaire basée sur la valeur de MCN. Le protocole SMART utilise les schémas d'agrégation de signatures proposés dans [Zhu et al., 2008], pour réduire le coût de la transmission des messages ayant le même contenu. Le principe du protocole SMART peut être résumé comme suit :

1. Premièrement, le nœud vérifie si le message avec les mêmes valeurs de MCN, de paramètre d'ancrage et de paramètres de support, existe déjà dans le tampon du nœud recevant. Si ces informations sont identiques, il compare les identifiants des deux nœuds

envoyant le message. Dans le cas où ils sont identiques, les temps de transmission sont vérifiés si :

- (a) La différence  $\Delta_t^2$  est inférieure à un certain seuil prédéfini ; c'est-à-dire la période durant laquelle un nœud n'a pas la permission d'envoyer un message identique. Le nœud qui a reçu le message signale une intrusion en envoyant une notification contenant l'identifiant du nœud responsable de cette dernière.
  - (b) Si  $\Delta_t > \text{seuil}$ , le message avec la dernière estampille temporelle est retenu, tandis que l'autre sera supprimé.
2. Dans le cas où le MCN et les paramètres d'ancrage et de support sont identiques avec ceux d'un message dans le tampon du nœud recevant mais les identifiants des véhicules ne le sont pas, il est indiqué que deux nœuds distincts ont reporté le même évènement. Dans ce cas, le nœud recevant fusionne ou agrège les deux certificats et signatures des deux sources dans un seul certificat et une seule signature en utilisant l'algorithme d'agrégation des signatures [Zhu et al., 2008].
  3. Dans le cas où le nouveau message reçu possède des valeurs MCN et des paramètres d'ancrage identiques mais des paramètres de support différents, le nœud compare les identifiants. S'ils sont identiques, il compare les estampilles temporelles des deux messages. Si le nouveau message possède une estampille temporelle plus grande, le nœud remplace l'ancien message par ce dernier, sinon il l'ignore.
  4. Au cas où le MCN et les clés du dernier message sont similaires à ceux d'un message appartenant au tampon, mais que les paramètres de support et les identifiants des deux nœuds sources sont différents, le nœud compare les estampilles temporelles. Si ces deux dernières sont identiques, cela signifie que l'un des messages est erroné, donc les deux messages seront mis en quarantaine. Sinon si les estampilles sont différentes, le nouveau message remplace l'ancien.
  5. Quand un nœud reçoit un message avec une valeur MCN similaire à celle de l'un des messages du tampon, mais avec des paramètres d'ancrage qui ne le sont pas, alors quels que soient les valeurs des identifiants, le nœud récepteur concatène le nouveau message dans sa liste.

---

2.  $\Delta_t = \text{le temps de transmission du nouveau message} - \text{le temps de transmission du message déjà stocké}$ .

6. Quand les valeurs MCN des deux messages reçus (le nouveau et celui déjà existant dans son tampon) sont différents, sans effectuer d'autres comparaisons le message est inclut dans le tampon.

Les messages en quarantaine doivent passer par un processus que nous allons décrire. Le protocole SMART ne valide pas l'identité du nœud émetteur mais il vérifie la validité du message. Pour ce faire, le nœud effectue les opérations suivantes :

1. Tout d'abord, il marque un bit spécial à « 0 » entre le paramètre MCN et les autres paramètres du message avant de le transmettre aux autres nœuds pour indiquer que ce dernier est en quarantaine.
2. Il agrège les deux messages dans un tampon sous l'indication « en quarantaine ». Cela signifie qu'ils nécessitent une confirmation.
3. Une requête est transmise aux nœuds voisins pour demander la confirmation. Le message reste en quarantaine jusqu'à la réception de cette dernière.

La dissémination des données agrégées est basée sur l'algorithme d'inondation avec élagage (FSP pour Flooding with Self Pruning) [Lim and Kim, 2000]. Il s'agit d'un mécanisme d'inondation à un saut. Dans ce système, quand un hôte diffuse un message, il inclut tous les voisins directs (un seul saut) dans l'entête du paquet. Lors de la réception d'un message par un nœud, ce dernier consulte tous les nœuds voisins directs et ceux listés dans l'entête du paquet sans le diffuser aux voisins communs (ce qui évite la transmission redondante). Dans l'étude envisagée, les auteurs distinguent un nœud transporteur qui peut recevoir les messages de plusieurs sources. Ces messages sont agrégés dans une seule liste après élimination de la redondance. Ce nœud est responsable de l'extraction des messages non transmis. Le protocole SMART fonctionne comme un système de filtrage multi-niveaux, et permet de réduire la redondance jusqu'à 37%.

#### 2.4.1.4 Approche de Rehman et al.

Dans [Rehman et al., 2013], les auteurs proposent un nouveau protocole de dissémination des messages d'alerte pour avertir les véhicules de la probabilité d'un danger. Pour cela, des

informations temps réel provenant des nœuds voisins directs sont utilisées pour identifier le(s) prochain(s) nœud(s) relais le(s) plus approprié(s). Ce protocole permet de réduire le nombre d'accidents tout en fournissant une évaluation par simulation des scénarios des chaînes de collision. Un deuxième protocole est proposé pour sélectionner le nœud qui effectue la diffusion des messages d'alerte en cas de collisions multiples impliquant des voitures.

Dans ce travail, les auteurs proposent un protocole de dissémination des messages d'alerte qui vise à améliorer la précision lors de la sélection des nœuds relais, et à augmenter la fiabilité de transmission des données tout en utilisant les informations provenant des nœuds voisins à un-saut. La performance du protocole est évaluée en considérant un modèle de mobilité réel, tandis que le canal radio mobile et les paramètres d'obstacle radio sont aussi pris en compte. Dans ce protocole, la réduction des accidents de la circulation routière sur les routes à grande vitesse est ciblée. En outre, le deuxième protocole proposé par Rehman et al. et qui dépend aussi des informations provenant des nœuds voisins directs, porte sur la sélection du nœud responsable de la diffusion initiale des messages d'alerte dans le cas de plusieurs accidents sur la même route. Les auteurs ont considéré que la communication entre les véhicules n'est pas symétrique. Cela est dû à la grande mobilité des nœuds, aux interférences, aux obstacles radio, etc. Par conséquent, si un véhicule peut communiquer avec un autre directement, cela ne signifie pas que l'inverse soit toujours vrai. La méthode choisie pour la sélection des nœuds relais est une méthode distribuée. Les véhicules utilisés pour l'expérimentation sont équipés par des dispositifs de géolocalisation (GPS) et par un émetteur-récepteur (transceiver en anglais) supportant le standard 802.11 (b, g ou p). Dans le protocole de sélection des nœuds relais, des paquets « Hello » qui contiennent l'identifiant du véhicule émetteur, sa position et une liste de nœuds actifs communiquant en permanence avec le nœud source, sont envoyés périodiquement. En utilisant ces paquets périodiques, le protocole constitue un algorithme de sélection dynamique et explicite des nœuds relais pour la dissémination des messages d'alerte en mode multi-sauts mais en se basant sur des communications à un-saut. Chaque couple de nœud ayant une communication bidirectionnelle et durable est considéré comme étant un couple. Les nœuds couples enregistrent leurs participations au réseau dans une table de couplage. Cette dernière requiert l'identifiant de l'émetteur, et la

liste des nœuds communicant avec ce dernier, d'où la réduction du nombre de messages transmis périodiquement, ce qui améliore l'utilisation de la bande passante. Pour identifier des nœuds de couplage, un nœud X diffuse un message « Hello » contenant son identifiant, sa position et la liste des nœuds actifs. Lorsqu'un nœud Y reçoit ce message, il vérifie son identifiant. S'il n'appartient pas à sa base, il le rajoute. Il vérifie la stabilité de connexion entre les deux nœuds. Si le lien est stable, il le marque comme un nœud de couplage.

Le principe du deuxième protocole est le suivant : les nœuds présents sur la route de l'accident doivent diffuser le message. Les auteurs ont supposé que les véhicules qui ont subi l'accident sont les initiateurs de l'alerte. D'autre part, si plusieurs véhicules sont impliqués dans cet accident, une méthodologie de dissémination de l'alerte par un seul véhicule doit être établie, en coopération avec les autres véhicules concernés. Pour cela, les auteurs ont considéré un scénario plus réaliste où plusieurs véhicules subissent un accident. Ils ont proposé un algorithme basé sur une métrique appelée « composite » pour déterminer quel véhicule doit avoir un temps d'attente inférieur à ceux de ses concurrents. Ce dernier sera responsable de la diffusion des messages, tandis que les concurrents s'abstiennent de le faire. Dans ce système, les auteurs se sont focalisés sur l'amélioration de la fiabilité et de la portée de transmission des messages, tout en gardant un délai de communication de bout en bout raisonnable.

#### 2.4.1.5 Approche de Sedjelmaci et al. (oDHVN)

Dans [Sedjelmaci et al., 2018], un protocole opportuniste pour la dissémination de l'information a été proposé. Ce dernier combine à la fois une approche d'inondation (Flooding en anglais)<sup>3</sup> et le protocole oDHVN (DHVN opportuniste). Ces deux approches sont combinées pour fonctionner de manière opportuniste dans un plan de Manhattan.

---

3. Un algorithme d'inondation (Flooding en anglais) est un algorithme de distribution de données à chaque partie d'un réseau connecté. Les techniques d'inondation sont utilisées dans plusieurs systèmes tels que Usenet, les connexions P2P pour le partage des fichiers, et dans certains protocoles de routage. Il existe plusieurs variantes pour les algorithmes d'inondation, la plupart fonctionne comme suit : chaque nœud agit à la fois comme étant émetteur et récepteur, et essaie de transférer les messages reçus à tous ses voisins, à l'exception du nœud source. Ces algorithmes sont utilisés afin de diffuser les messages à toutes les parties accessibles du réseau.

Le protocole DHVN (Dissemination protocol for Heterogeneous cooperative Vehicular Network) est un protocole de dissémination de données avec relais pour les réseaux véhiculaires coopératifs et hétérogènes, et qui utilise la technique « Store and Forward<sup>4</sup> » pour la transmission des messages [Mehar et al., 2012]. Plusieurs facteurs sont pris en compte dans le protocole DHVN, comme la topologie des routes, la connectivité du réseau, les partitionnements probables dans un trafic épars, et les capacités de communication V2V dans un environnement hétérogène. Dans ce protocole, les véhicules qui sont capables de transmettre le maximum de données (exemple : autobus, camions, etc.) sont élus comme étant des nœuds relais. Le véhicule source envoie le paquet dans les deux sens. Chaque nœud récepteur empruntant le même itinéraire déclenche un timer en fonction de la distance qui le sépare de l'émetteur. Les informations de position (ou bien les coordonnées GPS) de l'expéditeur sont extraites à partir de l'en-tête du paquet, pour calculer le délai d'attente (Backoff Delay). Les nœuds relais sont choisis pour chaque segment de route, et pour chaque direction afin d'assurer une bonne propagation des messages. Le choix de la période de retransmission dans DHVN est crucial. En effet, une petite période entraîne une perte de la bande passante et une longue période implique un retard important [Mehar et al., 2012].

Dans le protocole oDHVN, une nouvelle logique est ajoutée à la version standard du protocole DHVN afin de diffuser efficacement les informations en deux étapes [Sedjelmaci et al., 2018]. La première étape consiste à ajouter les trois étiquettes (ou tags) suivantes : une étiquette pour la diffusion initiale qui est utilisée uniquement pour la première transmission par inondation, une étiquette "DHVN standard" et une autre "DHVN proche intersection". La deuxième étape consiste à modifier la période SNF (Store and Forward), en adaptant cette dernière en fonction de la région.

---

4. Le véhicule chargé de transmettre le message utilise le module "Store and Forward" pour conserver les données jusqu'à ce qu'un meilleur retransmetteur soit trouvé. C'est une méthode de transmission en mode différé.

#### 2.4.1.6 Approche de Kerrache et al.

Dans [Kerrache et al., 2016], un mécanisme opportuniste, pour la diffusion des messages d'alerte, basé sur une relation de confiance entre les véhicules, a été proposé. Cette proposition est basée sur l'hypothèse suivante : seulement certains pairs sont honnêtes et coopératifs.

L'idée de base de cette approche repose principalement sur les informations véhiculées par les messages DENM concernant un événement spécifique. Une extension de la pile protocolaire classique a été ajoutée afin de prendre en charge une diffusion opportuniste des messages DENM. L'approche de [Kerrache et al., 2016] consiste à intégrer deux composantes principales : (i) un module d'établissement de confiance et (ii) un module de diffusion opportuniste.

La tâche principale du module d'établissement de confiance est d'évaluer les interactions directes entre les véhicules, ainsi que leurs degrés de collaboration dans différentes opérations de communication. Ainsi, des indices d'honnêteté appelés "Trust" sont calculés par chaque véhicule en rapport avec ses voisins ; cette valeur de confiance sera acheminée par les messages DENM et sera ensuite combinée à la qualité des messages d'événement générés pour calculer un degré de confiance relatif à la validité de l'événement signalé.

Le module de diffusion opportuniste est responsable de la sélection du meilleur nœud relais pour acheminer le message de l'événement rapporté. L'identité de ce dernier est également incluse dans le message DENM.

Comme mentionné dans la section 1.7.3.3.2, les messages DENM sont diffusés pour des applications d'avertissement de danger de routes (RHW). Une application RHW coopérative est une application basée sur des événements composée de cinq conteneurs, dont deux sont obligatoires (l'en-tête ITS PDU et le conteneur de gestion) et les trois autres sont facultatifs (le conteneur de situation, le conteneur de localisation et le conteneur alacarte) [ETSI, 2014; Festag, 2014].

### 2.4.1.7 Synthèse des approches opportunistes

Les travaux cités précédemment s'inscrivent dans le cadre des problématiques de dissémination de l'information dans les réseaux véhiculaires. Le tableau 2.2 récapitule les points clés de chaque approche.

## 2.4.2 Méthodes de routage

Dans la suite de cette section, nous allons présenter quelques protocoles de routage parmi les plus utilisés dans les réseaux véhiculaires.

### 2.4.2.1 Le protocole GPCR (Greedy Perimeter Coordinator Routing)

Dans [Lochert et al., 2005], les auteurs ont proposé le protocole GPCR qui est un protocole de routage basé sur la géolocalisation, dans un environnement urbain. Le protocole GPCR est très bien adapté pour des environnements très dynamiques tels que la communication intervéhicules sur les autoroutes ou dans les villes. GPCR est une combinaison du protocole GPSR [Lochert et al., 2005] et de l'utilisation de la cartographie routière. Les auteurs supposent que chaque nœud peut savoir s'il se trouve à une intersection auquel cas il acquiert le statut de nœud coordinateur<sup>5</sup>. Ainsi, les messages sont transmis le long de la route en utilisant une approche gloutonne avec une préférence donnée aux nœuds coordinateurs. Cela signifie qu'en choisissant le prochain nœud relais, un nœud coordinateur est préféré à un nœud non-coordinateur, même s'il n'est pas le plus proche de la destination, et ceci afin d'éviter les obstacles radios (bâtiments, ...). Ce protocole est basé sur la topologie des routes et des carrefours [Lochert et al., 2005].

---

5. Nœud coordinateur : un nœud qui se trouve à une intersection.

#### 2.4.2.2 Le protocole VADD (Vehicle-Assisted Data Delivery Routing)

Il s'agit d'un protocole de routage et de livraison de données, développé par Zhao et al. [Zhao and Cao, 2008]. Le protocole VADD adopte l'idée de "Carry-and-forward" pour la livraison des données à partir d'un véhicule en mouvement vers une destination fixe. Le problème le plus important est de choisir un chemin de transfert avec le plus petit délai de livraison des paquets. Le protocole VADD permet de transmettre des paquets à travers des canaux sans fil, et si ces derniers doivent être transportés par les véhicules, ceux circulant sur la route la plus rapide sont choisis en premier lieu. Ce protocole suppose que les véhicules sont équipés de cartes numériques, qui fournissent les niveaux des rues et les statistiques de trafics tels que la densité et la vitesse des véhicules sur les routes à différents moments de la journée. Selon les informations fournies par les cartes numériques, un modèle est proposé pour estimer le délai de livraison de données par différentes routes.

#### 2.4.2.3 Le protocole ROMSGP (Receive On Most Stable Group-Path Routing Protocol)

Pour améliorer la fiabilité du routage, dans [Taleb et al., 2007], les auteurs ont proposé le protocole ROMSGP (Receive on Most Stable Group-Path) dédié aux environnements urbains. Ils indiquent qu'un acheminement instable se produit généralement à cause de la perte de connectivité, autrement dit si un véhicule se déplace hors de la portée de transmission d'un véhicule voisin. Dans le protocole ROMSGP, tous les véhicules sont répartis en quatre groupes sur la base du vecteur de vitesse. Un routage est considéré stable si les deux véhicules sont classés dans le même groupe, sinon, le routage est instable. Un véhicule appartient à un groupe si le vecteur de vitesse possède un vecteur de projection maximale avec ce groupe.

#### 2.4.2.4 Le protocole AODV (On Demand Distance Vector)

Il s'agit d'un protocole de routage réactif ; ainsi, les chemins sont découverts et maintenus à la demande. Lorsqu'un nœud souhaite envoyer des données à un nœud destinataire, la

première étape consiste à diffuser (broadcast) à tous les nœuds du réseau un message "RREQ" de découverte du chemin de routage. Un nœud, à la réception du message (RREQ), consulte sa table de routage; s'il détecte un chemin le reliant au nœud destination, il ajoute son adresse dans le chemin de routage et retransmet le message (RREQ) vers le nœud suivant. Simultanément, il envoie un message de confirmation (RREP) au nœud source; ce message l'informe de sa participation à la construction du chemin de routage. Le chemin de routage est représenté comme une chaîne de nœuds reliant le nœud source au nœud destinataire. Chaque nœud intermédiaire pointe vers le nœud suivant et précédent par deux pointeurs appelés respectivement pointeur suivant et pointeur précédent. La chaîne construite par les pointeurs suivants sert à transférer les paquets de la source au destinataire. En revanche, la chaîne de retour est pointée par les pointeurs précédents pour retourner au nœud source les réponses de confirmation ou d'acquiescement de réception des paquets. Le protocole AODV fonctionne d'une manière distribuée : chaque nœud intermédiaire maintient uniquement des pointeurs vers le nœud suivant et le nœud précédent, au lieu de maintenir le chemin entier (shared-based). La deuxième étape du protocole AODV consiste à maintenir le chemin de routage jusqu'à la fin de la transmission. Pour le maintien du chemin, le protocole utilise trois types de messages : (1) le message "route time-out", diffusé lorsqu'aucune activité n'est remarquée sur le chemin pendant un certain temps; (2) le message "Hello", généralement diffusé sur le réseau pour détecter la présence des nœuds dans le voisinage direct. Le message Hello permet de maintenir les pointeurs précédents et suivants afin de maintenir le chemin stable durant le transfert des paquets; enfin, (3) le message "route-error" est diffusé sur le chemin lors de la détection d'une rupture de liens dans le chemin [Perkins et al., 2002].

#### 2.4.2.5 Le protocole DSR (Dynamic Source Routing)

Il s'agit d'un autre protocole de routage réactif. Il possède un mécanisme de routage différent de celui du protocole AODV. En effet, dans le protocole de routage DSR [David et al., 2001], l'entête du paquet transmis par le nœud expéditeur contient l'adresse de tous les nœuds intermédiaires ainsi que l'adresse du nœud destinataire. Similaire à la majorité des protocoles de routage réactifs, le mécanisme du protocole DSR repose sur deux procédures

essentielles : la découverte et le maintien du chemin de routage lors du transfert des paquets. En effet, lorsqu'un nœud source souhaite envoyer un paquet à un nœud destinataire, il vérifie, dans sa table de routage, la présence d'un chemin de routage ; lorsqu'un chemin est détecté, la phase de découverte du chemin est rapidement achevée et le nœud source envoie le paquet à travers le réseau. Par contre, si aucun chemin convenable n'est détecté, le nœud source diffuse à tous les nœuds du réseau une demande de construction du chemin (RREQ). Pour chaque retransmission du paquet entre les nœuds intermédiaires, l'adresse du nœud, recevant le paquet, est ajoutée dans l'entête du paquet [David et al., 2001].

#### 2.4.2.6 Le protocole DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector)

Ce protocole est de type unicast proactif [Perkins and Bhagwat, 1994]. Chaque nœud dans le réseau maintient une table de routage. Cette table comporte les informations suivantes : la liste de tous les nœuds destinataires possibles, le nombre de sauts nécessaires pour atteindre chaque destination, et enfin, le numéro de séquence (SN) qui correspond à une destination. Chaque nœud envoie sa table de routage à tous les nœuds de son voisinage lorsqu'un changement se produit. En effet, la table de routage est mise à jour selon deux paramètres : le temps et le type de l'événement détecté. Pour chaque mécanisme de mise à jour, le numéro de séquence est incrémenté pour différencier les anciennes des nouvelles routes.

Dans le protocole DSDV, le nœud attend la prochaine mise à jour initiée par la destination, avant de mettre à jour l'entrée associée vers cette destination dans la table de routage. Cependant, ce mécanisme d'attente ralentit le fonctionnement du protocole et diminue sa performance [Perkins and Bhagwat, 1994].

#### 2.4.2.7 Le protocole GSR (Global State Routing)

Ce protocole est similaire au protocole DSDV décrit précédemment en terme de mise à jour de la table de routage. Dans le protocole GSR [Tsu-Wei and Mario, 1998], chaque nœud maintient essentiellement la liste de ses voisins, la table de la topologie du réseau, la

table des nœuds suivants (Next hop nodes) qui contient l'adresse du nœud retransmetteur du paquet vers chaque nœud destinataire, et enfin la table de distance comportant le chemin le plus court vers chaque destination (distance calculée par l'algorithme de Dijkstra). Lors d'un changement d'état des liens dans le réseau et grâce aux messages de contrôle diffusés dans le réseau, toutes les tables maintenues sont mises à jour. Mentionnons également que les mises-à-jour sont appliquées uniquement lorsque le numéro de séquence est supérieur au numéro de séquence précédemment sauvegardée dans la table [Tsu-Wei and Mario, 1998].

#### 2.4.2.8 Le protocole OLSR (Optimized Link State Routing)

Ce protocole par état de lien utilise une technique optimisée pour la diffusion des messages topologiques [Jacquet et al., 2001]. La solution consiste à ne permettre qu'à un sous-ensemble de voisins de retransmettre les messages. Ces voisins sont appelés les relais multipoint ou MPR (multipoint relays). Chaque nœud effectue la sélection de ses MPR en se basant sur la connaissance de son voisinage à deux sauts. L'ensemble des MPR doit être le plus petit possible, tout en s'assurant que la diffusion par leur intermédiaire permet d'atteindre le voisinage à deux sauts dans sa totalité. Le problème qui consiste à trouver le plus petit ensemble de MPR est analogue au problème de la recherche d'ensemble dominant minimal dans un graphe. Dans OLSR, les nœuds appliquent une heuristique qui permet de se rapprocher de l'ensemble minimal dans la majeure partie des cas.

#### 2.4.3 Méthodes de clusterisation dans les réseaux véhiculaires

Dans les réseaux véhiculaires, les nœuds du réseau représentent les véhicules circulant sur des routes ou des autoroutes. Il s'agit d'un réseau Ad-Hoc à haute mobilité. En effet, la différence entre la vitesse des véhicules influence la topologie du réseau, qui évolue constamment et rapidement et rend la gestion des canaux de transmission très difficile. Les algorithmes les plus couramment utilisés dans les réseaux véhiculaires sont inspirés de réseaux mobiles (MANET). Cependant, les nœuds d'un réseau véhiculaire sont extrêmement dynamiques et la topologie du réseau n'est pas stable. Il est donc nécessaire de développer de nouveaux

algorithmes de clustering, qui prennent en compte l'aspect haute mobilité, et d'adapter les mécanismes de routage à ce contexte particulier. Certains des protocoles de clusterisation (CBRP) parmi les plus utilisés dans les réseaux véhiculaires sont discutés dans les sections suivantes.

### 2.4.3.1 Classification des méthodes de clusterisation

Avant de balayer les travaux connexes, nous donnons un aperçu de la classification différente des algorithmes de clustering (cf. Figure 2.1). Les algorithmes de classification classiques ont été classés en six catégories [Coma, 2003] :

1. Méthodes de partitionnement,
2. Méthodes hiérarchiques,
3. Algorithmes de clustering basés sur la densité,
4. Algorithmes de clustering basés sur un modèle,
5. Algorithmes de clustering basés sur les algorithmes de colonies de fourmis (ACO),
6. Et des méthodes hybrides.

Les méthodes de clusterisation dans les réseaux mobiles peuvent être classées en fonction du (des) paramètre (s) ciblé (s). *Anupama et al.* ont classé ces méthodes en six classes [Anupama and Sathya-narayana, 2011] :

1. Algorithmes basés sur la localisation,
2. Algorithmes basés sur le voisinage,
3. Algorithmes basés sur l'énergie,
4. Méthodes basées sur l'intelligence artificielle,
5. Méthodes basées sur la mobilité,
6. Et des méthodes basées sur le poids.

*Balia et al.* ont classé les algorithmes de clustering dans les réseaux véhiculaires en six catégories [Bali et al., 2014] :

1. Clustering prédictif,

2. Cluster de backbone,
3. Cluster basé sur l'adresse MAC,
4. Techniques de clustering traditionnelles,
5. Clustering hybride,
6. Et clustering sécurisé.

| Technique      | Densité de trafic  | Mobilité   | Avantages   | Défis Majeurs  |
|----------------|--|--|---|--|
| Opportuniste   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Moyenne</li> </ul>                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Moyenne</li> </ul>                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fiable pour des scénarios spécifiques.</li> <li>• Taux de livraison élevé pour des messages de sécurité inactive.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Congestion du réseau.</li> <li>• Sensible à la mobilité.</li> </ul>   |
| Géographique   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Éparse</li> <li>• Moyenne</li> </ul>                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible à moyenne</li> </ul>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible complexité de calcul.</li> <li>• Taux de livraison élevé vers la destination géographique.</li> </ul>                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilisation de sources externes pour atteindre l'emplacement cible.</li> <li>• Fiable pour des zones limitées.</li> </ul> |
| P2P            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dense</li> </ul>                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible</li> </ul>                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Coûts faible de maintenance pour une architecture Client/ Serveur.</li> <li>• Pas de surcharge réseau.</li> </ul>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Retard dans l'acheminement des messages.</li> <li>• Perte des routes dans un réseau très mobile.</li> </ul>               |
| Agrégation     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dense</li> </ul>                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Moyenne</li> </ul>                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilisation performante de la bande passante.</li> <li>• Moins de perte pour les adresses réseaux.</li> </ul>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensible aux attaques réseau.</li> <li>• Indépendance mutuelle.</li> </ul>  |
| Routage        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Éparse</li> <li>• Moyenne</li> <li>• Dense</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible</li> <li>• Moyenne</li> <li>• Haute</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Convenable pour des architectures de réseaux hétérogènes.</li> <li>• Routes optimales pour des zones réduites.</li> </ul>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mauvaise performance en cas de grande distance entre la source et la destination.</li> </ul>                              |
| Clusterisation | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Moyenne</li> <li>• Dense</li> </ul>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Moyenne</li> <li>• Haute</li> </ul>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Meilleure utilisation des canaux de transmission.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensible à la mobilité.</li> </ul>  |

Tableau 2.1 : Synthèse sur les techniques de dissémination de données dans les réseaux véhiculaires.

|                                    |  |  |   |  |
|------------------------------------|--|--|---|--|
| Approche                           | Zhong et al.   | Goel et al.  | Nair et al.   | Rehman et al.  |
| Problème traité                    | Dissémination des informations sur les trajets en temps réel.      | Diffusion des informations pertinentes sur les parcours. | Dissémination des informations agrégées dans différentes situations.                        | Acheminement des informations des alertes actives.   |
| Principaux dispositifs             | Émetteur-récepteur Wi-Fi.<br>GPS.<br>Carte numérique.              | TrafficRep.<br>IHM.                                      | Connecteur Wi-Fi.<br>Plateforme de traitement.  | Émetteur-récepteur supportant la norme 802.11.   |
| Algorithmes et techniques utilisés | Algorithme MALENA.<br>Technique de "Rank Based Store and Forward". | Projets Naive.<br>Projet Smart.                          | Algorithme de chaînage séparé.<br>Schéma d'agrégation de signatures.<br>Algorithme FSP.     | Algorithme de sélection dynamique des nœuds relais.  |
| Principaux paramètres              | Temps réel.<br>Pertinence des rapports.                            | Rayon de diffusion des TLR.<br>bande passante.           | Paramètres d'ancrage.<br>Paramètres de support.<br>MCN.                                     | Métrique composite.<br>Identifiants des nœuds actifs.  |
| Mécanismes développés              | Mécanisme de comparaison de la pertinence des rapports.            | Mécanisme de diffusion et de mise-à-jour des TLR.        | Mécanisme d'agrégation, de classification et de diffusion des messages de différents types. | Mécanisme de sélection des nœuds transporteurs de données associé à un mécanisme d'enregistrement des processus. |

Tableau 2.2 : Synthèse des travaux existants.

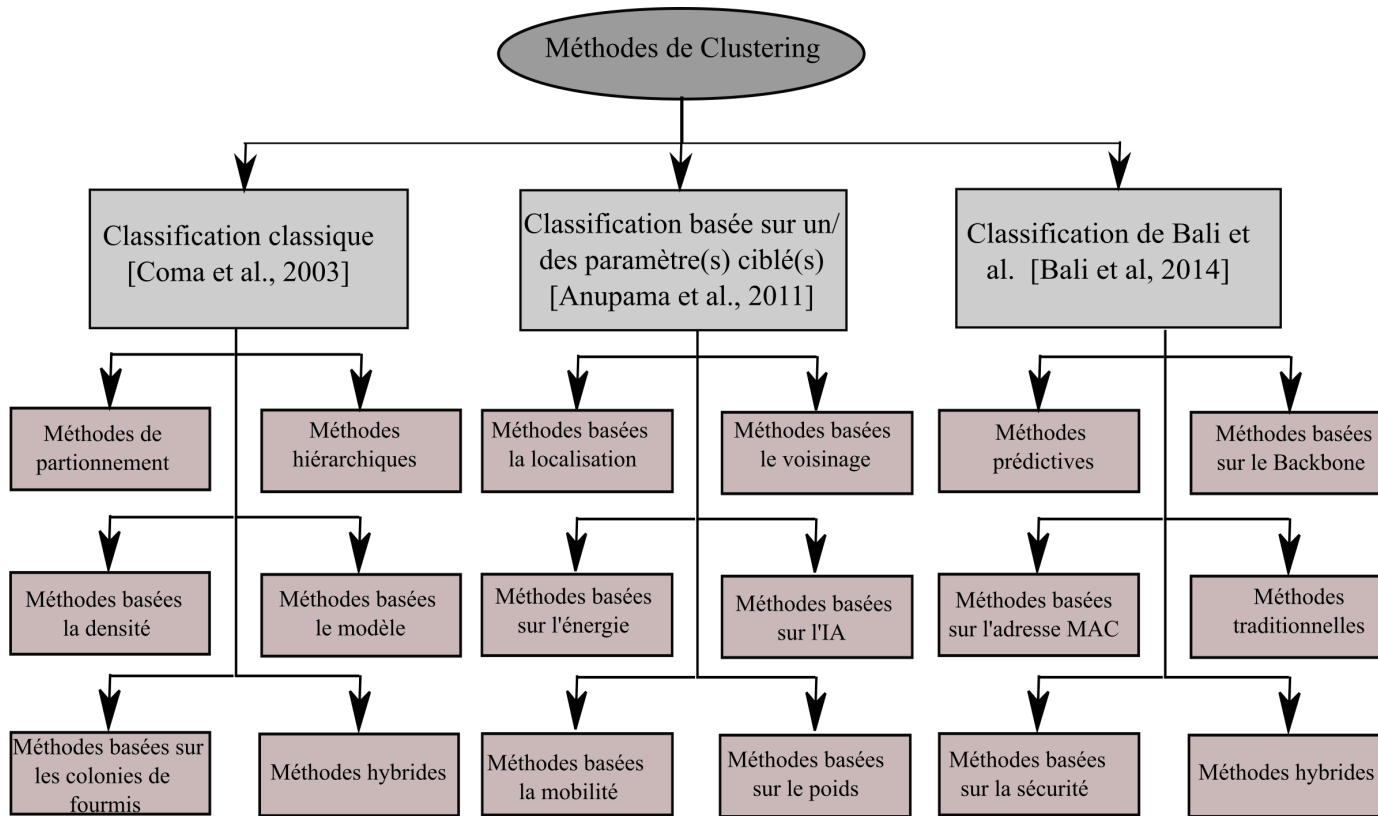


FIGURE 2.1 : Classifications des méthodes de Clustering.

### 2.4.3.2 Méthodes de clusterisation dans les réseaux véhiculaires

Dans [Tonguz et al., 2007], les auteurs ont développé un algorithme appelé DV-CAST. Ce protocole est entièrement basé sur les informations locales collectées via les messages périodiques "Hello" échangés. Dans ce protocole, trois paramètres principaux sont utilisés pour chaque véhicule : le drapeau de destination (DFlg) qui indique si le nœud de destination final se déplace dans la même destination que la source ; la connectivité de direction de message (MDC) qui détermine si elle est la dernière dans le cluster ; et la direction de sens opposé (ODC) qui indique si elle est connectée à au moins un véhicule se déplaçant dans la direction opposée. Ces paramètres sont utilisés pour déterminer le processus approprié "Rebroadcast ou Broadcast suppression intra et inter-clusters".

L'algorithme PPC (Position-based Prioritized Clustering) a été proposé dans [Wang et al., 2008]. En utilisant les informations des nœuds de destination et les paramètres de vitesse du véhicule, chaque nœud estime le temps de trajet à la destination. Pour élire les chefs de clusters, deux critères sont considérés : la valeur maximale du temps de trajet, et les nœuds qui dévient de leur vitesse moyenne, seront exclus de leur rôle de CH.

L'algorithme MOBIC [Souza et al., 2001] est une extension du plus petit ID [Jiang, 1999]. Dans MOBIC, une métrique agrégée basée sur la mobilité relative des nœuds et de leurs voisins et le rapport des niveaux de puissance des signaux de plusieurs réceptions sont utilisés. Le nœud ayant la plus petite mobilité relative sera élu CH. Cet algorithme est adapté aux scénarios de mobilité réduite.

ALM [Souza et al., 2010] (Aggregate Local Mobility) est une balise basée algorithme de clustering. Les algorithmes de clustering basés sur les balises consistent à envoyer des balises périodiques de chaque nœud à ses voisins, à un intervalle de temps prédéfini, dans l'espoir de former des clusters [Purtoosi et al., 2004]. Les informations GPS échangées dans les messages Hello sont utilisées pour calculer la mobilité relative. La statistique ALM est calculée en fonction de la variance de la mobilité relative. Les nœuds ayant le plus petit ALM envoient

un HELLO\_CH à leurs voisins dans l'espoir de former des clusters.

Dans [Hassanabadi et al., 2014], une nouvelle méthode de clustering appelée APROVE (Affinity PROpagation for VEhicular networks) est introduite. Ce protocole utilise le processus de mobilité pour la mise en cluster. APROVE CBRP vise la stabilité des grappes qui peuvent être définies par une longue durée de vie de CH, membres et un changement occasionnel de rôles, en particulier pour le CH. La propagation d'affinité (AP) est le paramètre le plus important dans cet algorithme. Ce dernier est basé sur les positions des véhicules et leurs données de vitesse pour trouver des nœuds similaires (appelés "exemples") pour chaque nœud en utilisant une fonction de similarité.

Le protocole d'acheminement assisté par un groupe de véhicules (VCAR) est proposé pour fonctionner dans un trafic dense conditions et traite avec le mode de jonction [Naveen and Karuppanan, 2011]. Dans ce protocole, les véhicules s'approchant de l'intersection de la route passe en mode jonction et envoie le paquet à un nœud spécial situé dans le milieu de la jonction, appelé nœud statique. Ce nœud vérifie périodiquement son environnement et détecte des groupes de voisins se déplaçant dans la même direction des véhicules de destination. Les CH associés sont responsables de transmettre des données. Une technique de relais à un saut entre les nœuds de clusters est utilisée pour délivrer des paquets. Si cette technique est insuffisante pour relayer les messages, les nœuds à deux sauts sont impliqués.

Dans [Daeinabi et al., 2011], les auteurs ont développé un algorithme de cluster appelé VWCA (pour Vehicular Weighted based Clustering Algorithm en anglais). L'idée clé de cet algorithme consiste en la construction d'une échelle de groupes de véhicules de taille moyenne. Dans VWCA, une combinaison de transmission de données de diffusion et des techniques de stockage et retransmission sont utilisées. Les auteurs emploient un ensemble de paramètres tels que la valeur de méfiance, le nombre de voisins en fonction de la plage de transmission dynamique et de la direction des véhicules. Le CH doit avoir une faible valeur de méfiance.

Ce dernier représente le comportement du véhicule lors de la transmission d'un message.

Le protocole de routage basé sur la zone de déplacement (MoZo) est l'un des algorithmes de clustering récents, qui révèle de nombreuses performances [Lin et al., 2017]. L'idée centrale de cette approche est de construire des clusters qui seront utilisés dans la phase de routage des messages. La similarité entre les véhicules est le paramètre principal de cet algorithme ; il est enregistré en exploitant de nombreuses distances calculées à différents moments. Les chefs de clusters se réfèrent aux nœuds qui ont le maximum de similitude. Ce paramètre est utilisé pour définir une zone, appelée "la zone en mouvement" en plus des paramètres suivants : l'arbre de localisation et la vitesse (ou bien arborescence CLV, dans laquelle les informations du véhicule membre sont stockées), et la file d'attente d'événement de départ (LE) qui sert à stocker les horodatages lorsque les véhicules membres s'éloignent de la portée de communication du CH.

### 2.4.3.3 Synthèse sur les travaux de clusterisation

Le tableau 2.3 fournit une synthèse sur les méthodes utilisées pour la clusterisation dans les réseaux véhiculaires. La synthèse a été réalisée en se basant sur les principaux paramètres utilisés pour élire les chefs de clusters, et les critères pris en compte pour déterminer des groupes homogènes. Les avantages et les limites de chaque méthode ont été récapitulés dans ce tableau en se basant sur les simulations faites.

En général, les méthodes de clustering utilisant plusieurs paramètres et critères (généralement connu sous le nom méthodes hybrides), sont plus prometteuses que les autres protocoles de routage pour les réseaux véhiculaires en raison des contraintes de mobilité.

| Protocole | Classe  | Paramètres principaux                        | Avantages  | Limites  |
|-----------|---|--|--|--|
| DV-CAST   | Méthode de partitionnement<br>Basé sur le voisinage | Indicateur de destination<br>Connectivité    | Direction opposée<br>pour optimiser le temps                         | Clusters instables<br>Surcharge réseau                                 |
| PPC       | Basé sur la localisation<br>Clustering prédictif    | Temps de voyage<br>Vitesse                   | Clusters stable  | Besoin de<br>données préalables  |
| MOBIC     | Basé sur la mobilité<br>Basé sur le poids           | Mobilité relative                            | Temps de Clustering<br>réduit  | Clusters fréquemment<br>modifiés                                       |
| ALM       | Basé sur le poids<br>Basé sur la mobilité           | Mobilité locale agrégée                      | Temps réduit pour la<br>formation des clusters                       | Surcharge réseau   |
| APROVE    | Clustering hybride                                  | Propagation d'affinité                       | Clusters stable<br>Transmission fiable<br>de données                 | Congestion de réseau<br>consommation de la<br>bande passante           |
| VCAR      | Basé sur la localisation<br>Basé sur le voisinage   | Valeur de similarité<br>directionnelle (DSV) | Taux de livraison de<br>paquets élevé<br>Fiabilité temporelle        | Zone de couverture<br>statique   |
| VWCA      | Basé sur le poids<br>Basé sur la localisation       | Valeur de confiance                          | Durée de vie CH<br>et membres optimisée<br>Moins de surcharge réseau | Dégradation<br>de performance<br>dans un réseau<br>très mobile         |
| MoZo      | Basé sur la localisation<br>Méthode hiérarchique    | Similarité<br>Arbre CLV                      | Clusters stable<br>Pertinent pour les<br>intersections de route      | Temps significatif<br>pour former les clusters<br>Congestion du réseau |

Tableau 2.3 : Synthèse sur les travaux de clusterisation.

#### 2.4.4 Défis liés à la dissémination de données

La diffusion de données est un processus indispensable pour les systèmes de trafic routier, pour améliorer la qualité de la conduite. Bien que ce processus semble être très simple, il est en réalité compliqué d'avoir une connexion fiable pour des réseaux mobiles, en raison du grand nombre de nœuds impliqués et du changement de topologie qui est assez fréquent. Parmi les principaux défis de la dissémination de données, on peut citer :

**La grande mobilité des nœuds et les déconnexions fréquentes** : Le grand défi des réseaux véhiculaires est le développement d'algorithmes fiables pour la dissémination de données en temps réel. La forte mobilité et la topologie souvent déconnectée influent les performances de diffusion. La densité du trafic varie également d'une zone à une autre et au cours de la journée, le trafic est faible pendant la nuit, mais au cours de journée la densité des nœuds de réseau est très élevée dans les zones urbaines, et en particulier pendant les heures de pointe, ce qui entraîne fréquemment une déconnexion du réseau. Les solutions proposées dans l'état de l'art sont pertinentes que pour des scénarios précis [Lyu et al., 2018].

**Partage de données dans un réseau congestionné** : Le deuxième défi majeur des réseaux véhiculaires est de diffuser les données de sécurité active dans le réseau avant d'atteindre leurs échéances. Lorsque le véhicule tente de transmettre des messages critiques dans une zone dense, l'accès au canal de transmission est un peu pénible voir impossible dans certains cas. Donc, il est indispensable de développer des protocoles pour une gestion optimale des supports sans-fil, afin d'améliorer la consommation de la bande passante, tout en prenant en compte les priorités de messages à diffuser, qui dépendent principalement du type de l'évènement rapporté [Liu et al., 2018].

**Gestion des situations d'urgence en utilisant des technologies de transmission hétérogènes** : Dans des scénarios d'urgence, il est primordiale d'utiliser d'autres technologies pour relayer les informations critiques. Les applications réseau qui sont hétérogènes, impliquent un coût d'utilisation des ressources, par exemple LTE. Pour ces raisons, les données et les spectres des technologies de communication doivent être prises en compte lors du développement des approches hétérogènes [Ahmad et al., 2019].

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, les travaux liés à la dissémination de l'information dans les réseaux véhiculaires ont été explorés. Plusieurs techniques sont utilisées pour la diffusion de données, ces dernières peuvent être classées en six catégories. Les approches de dissémination opportunistes sont basées sur la politique de stockage et de transfert (Carry and forward) qui permet de relayer les messages dans un réseau déconnecté, en transportant ces derniers jusqu'à ce qu'un nœud relais soit à l'écoute.

Les approches de dissémination géographiques sont destinées pour diffuser les information dans une zone limitée, en utilisant l'adressage géographique (GeoNetworking). Ce type d'approches est souvent lié à des protocoles de routage, ce qui permet de distinguer une sous classe des protocoles de routage géographiques.

Les protocoles P2P offrent une architecture de communication alternative à l'architecture traditionnelle client-serveur. Ces protocoles sont souvent utilisés comme parties des approches de Clustering. L'agrégation de données a pour but minimiser le volume des informations échangées, pour pallier les problèmes de tempête de diffusion. Cette technique ne peut pas être utilisée seule pour la dissémination de données. Elle est souvent associée à des techniques opportunistes. Les travaux de dissémination de données les plus pertinents sont discutés dans ce chapitre. Plusieurs études synthétiques ont été faites afin d'avoir une vision globale sur les travaux d'état de l'art.

Deuxième partie

Contribution



# Une nouvelle approche de clusterisation pour la dissémination de données dans les réseaux véhiculaires

## 3.1 Introduction

Les applications de sécurité routière doivent intégrer des modules ou des protocoles de dissémination de données. En plus de la diversité des exigences de ces applications, des exigences non fonctionnelles doivent également être prises en compte par ces systèmes de communication. Vu la topologie très dynamique des réseaux véhiculaires et le nombre de nœuds impliqués dans le processus de dissémination d'informations dans ce genre de réseaux, des techniques d'optimisation et de routage doivent être utilisées.

Afin de faciliter de telles applications avec éventuellement un nombre important de nœuds participants au réseau, nous avons envisagé l'utilisation de trois techniques différentes pour la phase d'acquisition et de transmission de données.

L'approche proposée dans ce chapitre est basée sur une technique d'optimisation, de clustering et de routage (cf. Figure 3.1). Lors de la détection d'un événement, une phase

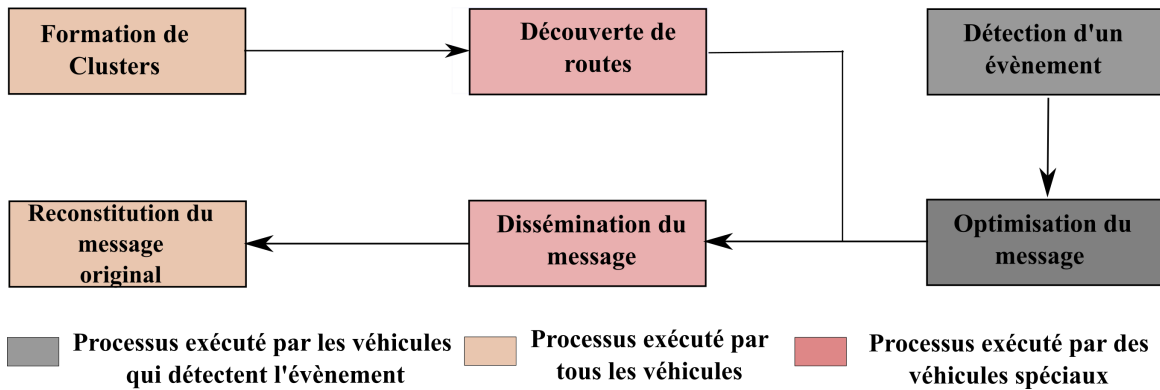


FIGURE 3.1 : Schéma général de l'approche proposée.

d'optimisation du message est exécutée afin de réduire le nombre et la taille des paquets échangés dans une zone calculée selon la nature et la durée de vie de l'évènement détecté. La deuxième étape qui peut se lancer en même temps que la première phase, consiste en une approche de clustering en temps réel. Ce protocole a pour but de d'éviter les transmissions redondantes et le problème de la tempête de diffusion (Broadcast Storm), et donc améliorer l'utilisation de la bande passante, et prévenir la perte de données. La troisième phase consiste en un protocole de routage, pour relayer les paquets entre clusters de manière optimisée. Les étapes de cette approche sont expliquées dans les sections qui suivent.

## 3.2 Contraintes prises en compte

De nombreuses applications doivent respecter des contraintes temporelles pour le traitement des données. Ces dernières font référence aux données collectées par le véhicule lui-même ou l'infrastructure routière (RSU). De plus, ces données représentent le comportement du véhicule ou de son environnement à un instant  $t$  sur une courte période  $p$ , donc ces données sont considérées comme étant des données extrêmement volatiles. Après cette période, l'environnement est soumis à des modifications, donc les données précédemment collectées deviennent obsolètes. Pour ces raisons, les informations échangées doivent atteindre leur destination dans les délais accordés. De plus, chaque information possède un intervalle de validité

| Évènement                                      | Code |
|--|------|
| Accident                                       | 1    |
| Zone dangereuse                                | 2    |
| Obstacle mobile                                | 3    |
| Embouteillage                                  | 4    |
| Obstacle fixe                                  | 5    |
| Véhicule dans la bande d'arrêt d'urgence (BAU) | 6    |
| Collision                                      | 7    |
| Travaux routiers                               | 8    |
| Rapport météorologique                         | 9    |
| Conditions de conduite                         | 10   |
| Densité de circulation                         | 11   |
| Rapport de temps de voyage                     | 12   |
| Accès Internet (Carte / Info)                  | 13   |
| Fichier multimédia                             | 14   |

Tableau 3.1 : Codes des évènements relatifs au trafic routier.

absolue (*AVI*). Par conséquent, au-delà de cette période, ces données deviennent obsolètes et ne peuvent plus être utilisées dans d'autres processus. Ainsi, cet ensemble de données est considéré comme une donnée temps réel. Ainsi, nous rejoignons ces types de gestion de données. Dans notre protocole, nous envisageons exploiter des métriques de qualité de données (QdD), des mécanismes de clustering et de routage pour répondre à ces exigences.

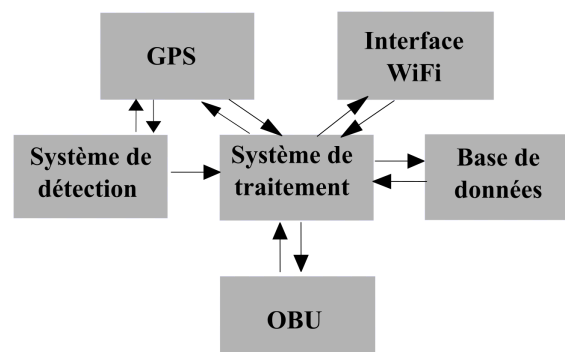


FIGURE 3.2 : Composants des systèmes.

### 3.3 Fonctionnement général de l’approche

Dans notre proposition, on suppose que chaque véhicule est équipé de plusieurs composants qui communiquent avec le système de traitement des données. Ce dernier est chargé de traiter les différentes instructions communiquées. Ces composants sont listés dans la figure 3.2. Le système de détection est responsable de la collecte des données et de la détection des événements survenant dans le véhicule ou dans son environnement. Le GPS a pour rôle de localiser les véhicules et les événements. Les véhicules utilisent une interface Wi-Fi pour communiquer et échanger des données. Pour chaque système véhiculaire, une base de données est requise pour récupérer l’intégralité du message correspondant, après la phase d’optimisation (cf. Figure 3.4). Elle regroupe les types d’événements et leurs codes correspondants comme décrit dans le tableau 3.1.

Ensuite, tous les véhicules appartenant à la zone de couverture (cf. Figure 3.5) contribuent à la phase de formation de clusters, à la découverte de routes et à la diffusion des messages. La dernière étape consiste à récupérer le message correspondant ou le message d’origine. Le processus général est récapitulé dans la figure 3.3.

L’approche proposée comporte deux phases :

- Une phase d’optimisation des messages et de calcul de la zone de couverture : cette phase consiste à échanger des codes à la place du corps des messages. Ce protocole vise à minimiser le nombre de paquets transmis afin de respecter la contrainte de la formule 3.1. La zone de couverture désigne la zone où le message doit être diffusé.

$$Current\_Time - TS_{msg} \leq AVI_{msg} \quad (3.1)$$

Où :

- $Current\_Time$  fait référence au temps actuel de la diffusion.
- $TS_{msg}$  représente l’estampille temporelle du message  $msg$ .
- $AVI_{msg}$  est l’intervalle de validité absolue du message  $msg$ .

- Une phase de clustering : il s'agit d'un CBRP (Cluster Based Routing Protocol), qui consiste à construire des groupes homogènes et des routes fiables. Ce protocole vise à produire rapidement des clusters stables, dans le but de transmettre des messages aux nœuds avant leur date d'échéance.

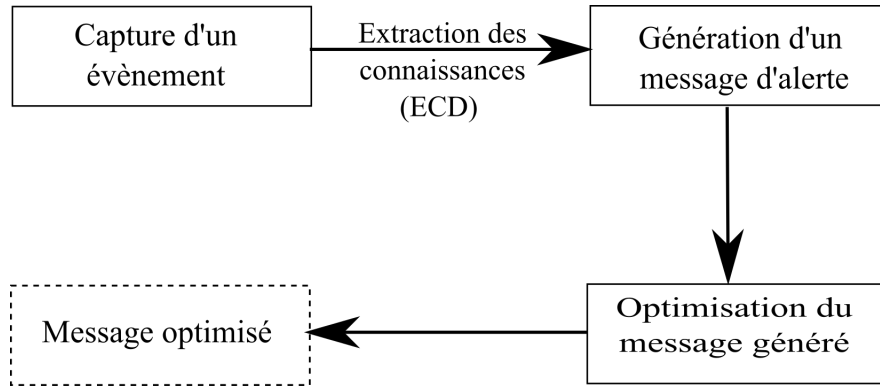
Lorsqu'un véhicule détecte un événement, il exécute la phase d'optimisation du message et envoie un message d'alerte à ses voisins à un saut afin de vérifier si le même message a été détecté par un autre véhicule et d'éviter toute perte de message. Si un nœud voisin répond que le même message a déjà été produit, que son *AVI* n'est pas obsolète, et que le processus de clustering a été lancé, le message généré sera conservé dans la base de données pour le processus de diffusion. La sélection du/des véhicule(s) responsable(s) de la diffusion se fera en consultant le protocole de routage de la section 3.9. L'étape suivante consiste à calculer la zone de couverture par le premier véhicule qui détecte l'événement selon les formules 3.2, 3.3 et 3.4. Le but du calcul de la zone de couverture est de limiter la propagation des messages hors de la zone concernée, parce que la transmission de messages à des véhicules qui n'atteindront pas le point où l'événement a eu lieu, conduit à la diffusion d'informations non pertinentes, ce qui entraîne une surcharge des réseaux.

### 3.4 Optimisation des messages

Dans l'approche proposée, les données échangées sont représentées par des codes au lieu d'échanger des messages textuels, ce qui permet de réduire le nombre de paquets transmis. Nous supposons donc que chaque véhicule est équipé d'une base de données dans laquelle sont stockés les types d'événements et leurs codes correspondants.

On suppose que les messages sont composés de quatre parties, comme décrit dans le tableau 3.2. Les informations les plus importantes dans cette structure sont les données échangées. Elles sont représentées par des codes au lieu des messages textuels. Cela permet de réduire le nombre de paquets transmis en réduisant la taille du message, ce qui permet





1. Vérification de la base des codes.
2. Récupération du code correspondant à l'évènement.
3. Construction du message optimisé.

FIGURE 3.4 : Processus d'optimisation des messages.

|                                    |                                |   |                                 |
|------------------------------------|--------------------------------|---|---------------------------------|
| Estampille temporelle<br>(1 octet) | Date d'expiration<br>(1 octet) | Coordonnées GPS de l'évènement<br>(12 octets) | Code correspondant<br>(1 octet) |
|------------------------------------|--------------------------------|---|---------------------------------|

Tableau 3.2 : Message optimisé.

### 3.5 Calcul de la zone de couverture

Avant de lancer le processus de clustering, le ou les véhicule(s) qui détectent l'évènement doivent calculer les coordonnées de la zone de couverture dans laquelle les messages doivent être disséminés. Les coordonnées de cette zone dépendent de l'intervalle de validité absolue (*AVI*) du message généré, et de la vitesse du premier véhicule détectant l'évènement sur la route concernée (cf. Figure 3.5).

Il est intéressant de prendre en compte les coordonnées de la zone de couverture. En effet, la transmission de données obsolètes à des véhicules ou la transmission d'un message à un véhicule qui n'atteindra pas le point où l'évènement a eu lieu n'a pas d'utilité.

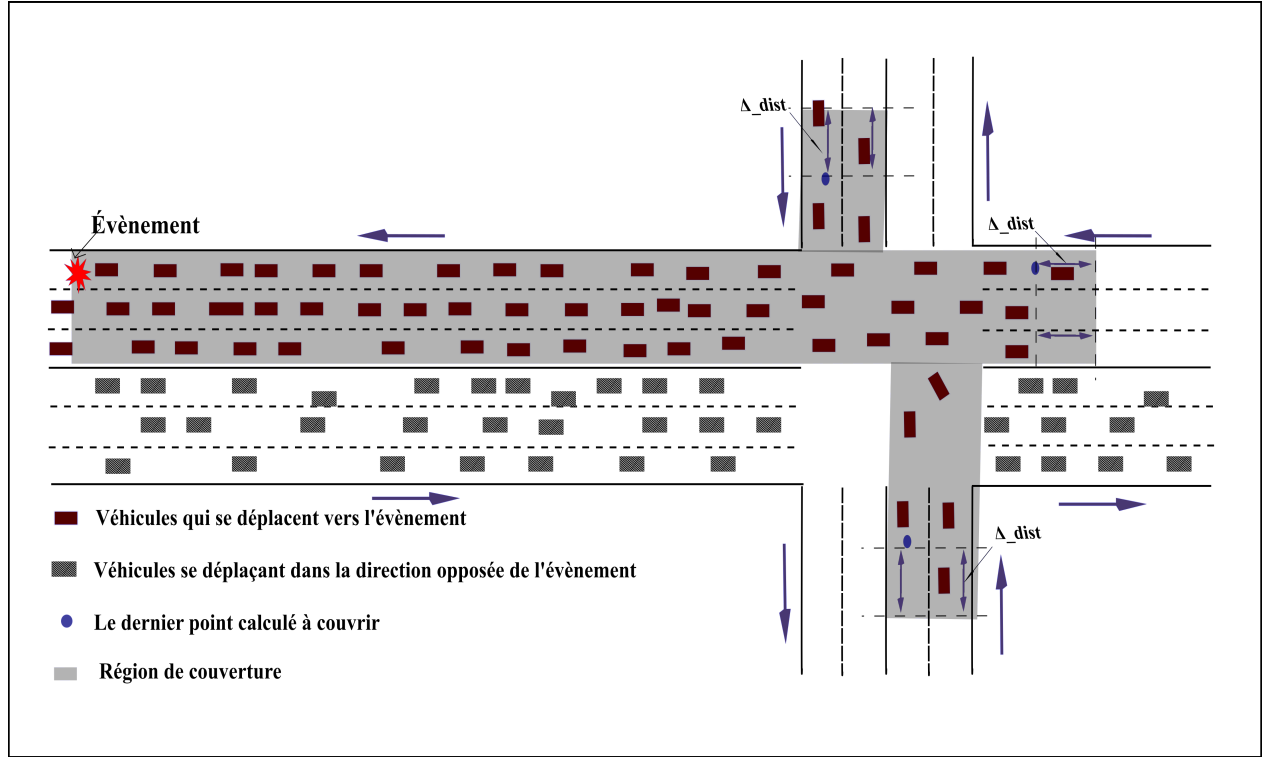


FIGURE 3.5 : zone de couverture.

La formule 3.2 est utilisée pour calculer la distance de couverture. Les coordonnées GPS du dernier point à couvrir, dans la zone précédemment considérée, sont calculées dans les formules 3.3 et 3.4 :

$$Dist_{cov} = AVI \times V_a + \Delta_{dist} \quad (3.2)$$

$$\varphi_2 = \arcsin(\sin \varphi_1 \cos \delta + \cos \varphi_1 \sin \delta \cos \theta) \quad (3.3)$$

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \arctan 2(\sin \theta \sin \delta \cos \varphi_1, \cos \delta - \sin \varphi_1 \sin \varphi_2) \quad (3.4)$$

Où :

- $Dist_{cov}$  est la distance de couverture,
- $V_a$  est la vitesse du premier véhicule détectant l'évènement,
- $\Delta_{dist}$  est une courte distance à ajouter en raison de la différenciation des vitesses de véhicules, pour couvrir un maximum de nœuds circulant sur la même route et pour améliorer la fiabilité du processus de dissémination de données,
- $\varphi_i$  représente la latitude du nœud  $i$ ,
- $\lambda_i$  représente la longitude du nœud  $i$ , le nœud 1 est le premier véhicule qui a détecté l'évènement, et le nœud 2 représente le dernier véhicule qui doit recevoir le message,
- $\theta$  est le relèvement<sup>1</sup> (bearing) dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du nord,
- $\delta$  représente la distance angulaire  $\frac{Dist_{cov}}{R}$ ,
- $R$  est le rayon de la terre.

### 3.6 Formation des clusters

Lorsqu'un véhicule détecte un événement, il vérifie d'abord si le message est en cours de diffusion et si ses voisins à un saut ont détecté le même événement, en envoyant un message de vérification aux voisins. Si le message était déjà en cours de diffusion et que son *AVI* n'est pas obsolète, le message généré sera alors supprimé. Si d'autres véhicules ont détecté le même événement, et l'un des voisins a lancé le processus de formation de clusters, le véhicule détectant l'évènement enregistre le message dans sa base de données, pour le processus de dissémination. La sélection du (des) véhicule(s) responsable(s) de la diffusion se fera en se référant au protocole de routage dans la section 3.9.

Le premier véhicule détectant l'évènement lance le processus de clustering en diffusant des messages "Hello" à ses voisins. La structure des messages "Hello" est présentée dans le tableau 3.3. Chaque voisin fait la même chose tant que la zone concernée n'est pas entièrement

---

1. Le relèvement est une mesure de l'angle que fait une droite passant par deux points avec la ligne nord-sud pour déterminer une position.

couverte ( $position_x(\varphi_x, \lambda_x)$  est inférieur à  $position_{limit}(\varphi_2, \lambda_2)$ , (cf. Equation 3.3, 3.4)), sinon le message "Hello" est ignoré.

|                                     |                        |   |                            |
|-------------------------------------|------------------------|---|----------------------------|
| Adresse MAC<br>(6 octets)           | Position<br>(8 octets) | Vitesse<br>(4 octets)                   | ID de la voie<br>(1 octet) |
| Direction de mouvement<br>(1 octet) | CD<br>(1 octet)        | Estampille temporelle (TS)<br>(1 octet) | AVI<br>(1 octet)           |

Tableau 3.3 : Structure des messages "Hello".

Au début de ce processus, tous les nœuds sont dans un état "indécis". Après diffusion des messages "Hello" et collecte des données sur les nœuds, chaque nœud conserve la liste de ses voisins ( $NV[]$ ), le temps de transmission de ces messages aux nœuds voisins  $TRP_j$ , tel que  $j$  est l'indice d'un voisin ( $v_j \in NV[]$ ), la vitesse  $Vr_j$  et la validité approximative des liens  $LV_j$ . Le paramètre  $LV_j$  dépendra de la vitesses du véhicule (autrement dit, la distance qui sépare deux véhicules voisins) et le rayon de transmission des véhicules. Nous admettons que les interférences sont négligeables.

Ces paramètres seront utilisés pour calculer la valeur *Fitness* d'un véhicule  $v_i$  ( $Fitness_i$ ) (cf. Équation 3.5). La fonction objectif vise à minimiser la valeur de la *Fitness* afin de choisir un chef de cluster ( $CH$ ) pour chaque groupe de véhicules (cf. Équation 3.6).

$$Fitness_i = \alpha \cdot \sum_{i=0}^{CD} \frac{TRP_j}{n} - \beta \cdot CD + \gamma \cdot \sum_{i=0}^{CD} \frac{Vr_j}{n} - \sigma \cdot \sum_{i=0}^{CD} \frac{LV_j}{n} \quad (3.5)$$

$$CH_j \leftarrow \arg\langle \min(Fitness_i) \rangle \quad (3.6)$$

Où :

- $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , et  $\sigma$  sont des facteurs positifs.
- $TRP_j$  fait référence à la période de transmission entre le nœud actuel et son voisin  $j$  ( $V$  et  $V_j$ ), exprimée par la moyenne de la différence entre le temps de réception de la réponse  $TRC_j$  et l'estampille temporelle  $TS$  du message "Hello". La formule de la

période de transmission est exprimée comme suit :  $TRP_j = \frac{TRC_j - TS}{2}$ . Ce temps est calculé par le nœud émetteur en raison du problème de synchronisation des horloges.

- $n$  : nombre de nœuds dans une zone carrée de  $TR \times TR$ , où  $TR$  est le rayon de transmission maximale des nœuds.
- $CD$  est le degré de connectivité. Il est à noter que  $CD$  n'est pas nécessairement égal à  $n - 1$ .
- La mobilité relative  $Vr_j$  est exprimée par la différence entre la vitesse du véhicule actuel  $V$  et la vitesse du véhicule voisin  $V_j$ . La formule de la mobilité relative est exprimé comme suit :  $Vr_j = |V - V_j|$ .
- La durée de vie du lien  $LV_j$  entre le véhicule actuel et son voisin  $j$  est donnée par le rapport de la différence entre  $TR$  et la distance  $Dist_j$  (la distance entre le véhicule actuel et le voisin  $j$ ) et la mobilité relative des nœuds concernés  $Vr_j$ . La formule de la durée de validité d'un lien est exprimée comme suit :  $LV_j = \frac{TR - Dist_j}{Vr_j}$ .

Lorsque le temps de transmission entre les nœuds ( $TRP_j$ ) et leur mobilité relative ( $Vr_j$ ) sont inférieurs, le degré de connectivité ( $CD$ ) et la durée de vie des liens entre les véhicules ( $LV_j$ ) sont plus élevés, le nœud est plus susceptible d'être un  $CH$  (cf. Equation 3.5, 3.6). Dans les sections suivantes, cet algorithme est désigné par le nom *FitnessClustering*.

Le processus général d'élection des  $CH$  est expliqué dans les algorithmes 1 et 2. Il est plus détaillé dans la figure 3.6.

Le processus de diffusion des messages "Hello" et de calcul de la *Fitness* est résumé dans l'algorithme 1, où :

- $CT$  fait référence au temps actuel.
- $TS$  est l'estampille temporelle du message "Hello".
- $AVI$  représente l'intervalle de validité absolue du message "Hello".

Le  $CH$  est choisi en fonction de la *Fitness* du véhicule et de ses voisins. Chaque nœud échange sa *Fitness* avec ses voisins  $NV[]$  et doit attendre un temps  $t$  pour enregistrer toutes les *Fitness* des véhicules dans la table *RecordFitness[]*. Le  $CH$  est initialisé au

Algorithme 1: Calcul de *Fitness*.

```

1: Diffuser les messages "Hello"
2: Attendre la réception d'une réponse
3:  $CT \leftarrow TS_{(Hello)}$ 
4:
5: tant que  $CT - TS_{(Hello)} < AVI_{(Hello)}$  faire
6:   Attendre la réception d'un message "Hello"
7:   Enregistrer MacAddress dans  $NV []$ 
8:   Calculer la distance ( $Dist_j$ )
9:    $CT \leftarrow CurrentTime$ 
10: fin tant que
11:
12:  $CD \leftarrow NV[].length$ 
13:
14: pour chaque  $v_j \in NV []$  faire
15:   Calculer la période de transmission  $TRP_j$ 
16:   Calculer la vitesse relative  $Vr_j$ 
17:   Calculer la durée de vie des liens  $LV_j$ 
18: fin pour
19:
20: Calculer la Fitness (cf. Équation 3.5)

```

premier voisin *MacAddress*. Après avoir comparé toutes les valeurs de *Fitness*, la plus petite valeur sera sélectionnée et comparée avec la *Fitness* locale. Le minimum (*min*) sera donc sélectionné. Chaque voisin qui ne répond pas sera supprimé de  $NV []$ . Après ces étapes, un *CH\_DEMAND* sera envoyé au nœud sélectionné *my\_CH*. Ce dernier envoie un *CH\_ACCEPTED* ou un *CH\_REFUSED* basé sur son adhésion à un groupe et la différence de *Fitness*.

Un *CH\_ACCEPTED* sera envoyé si *my\_CH* n'appartient pas à un autre cluster ou s'il s'agit d'un membre et que la différence des ratios de *Fitness* des membres demandant le même nœud pour être leur *CH* est inférieur à la différence des ratios de *Fitness* avec les autres voisins ayant le même *CH* que le nœud concerné.

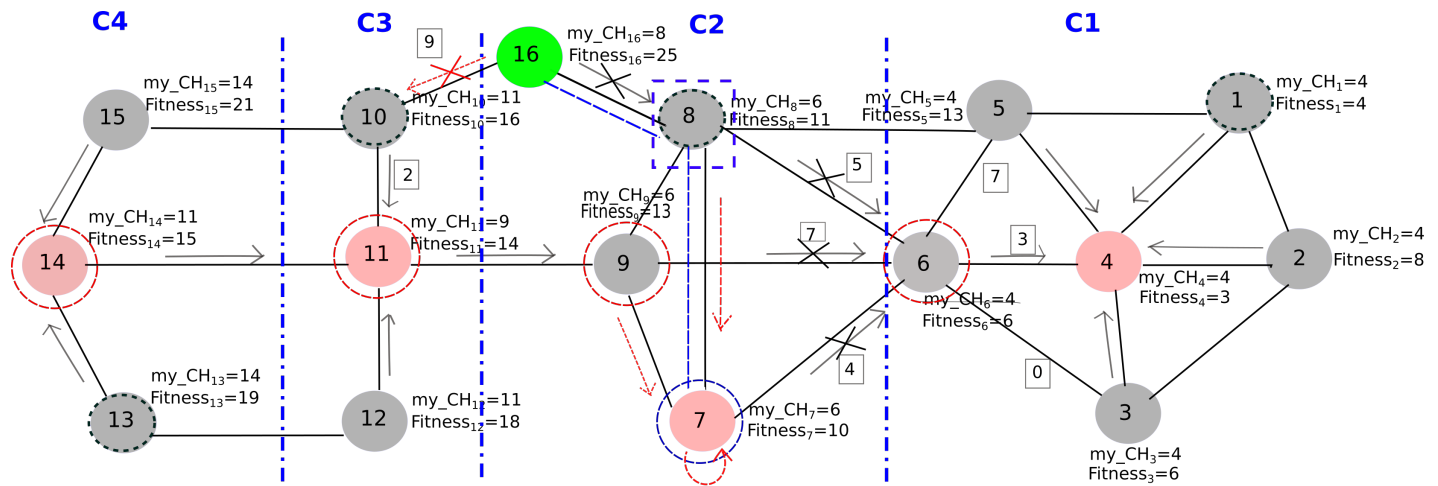
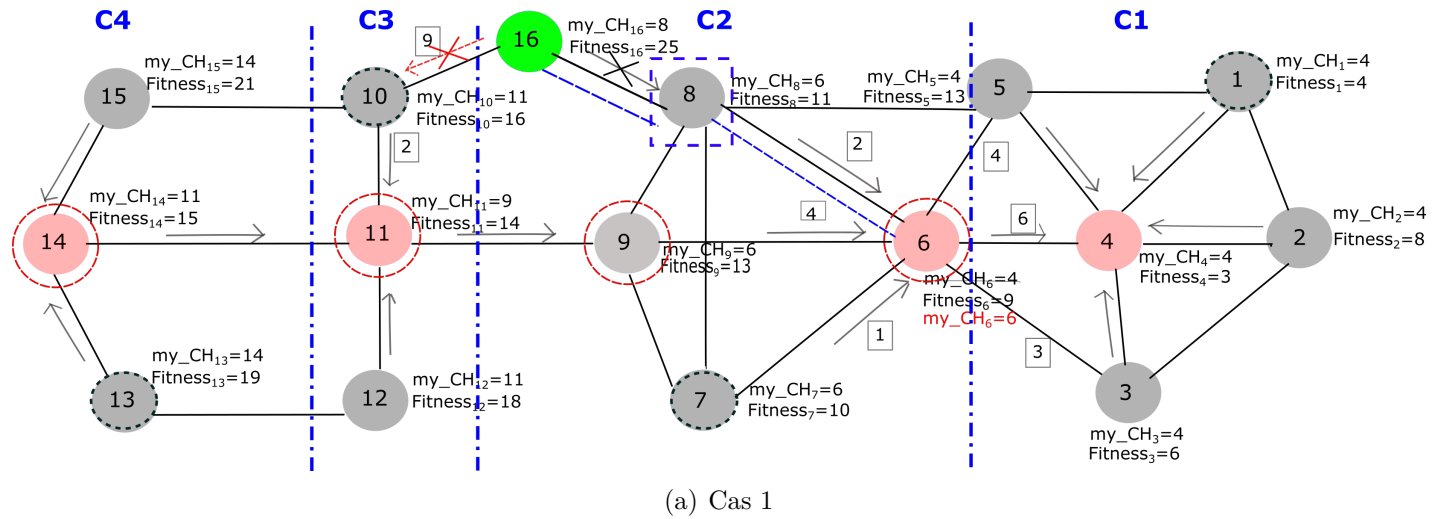
Ce processus est illustré à la figure 3.6(a). Dans cet exemple, les nœuds 7, 8 et 9 envoient un *CH\_DEMAND* au nœud 6, qui appartient au cluster *C1*. Ce nœud calcule la somme des différences des ratios de *Fitness* avec les voisins 3, 4 et 5, qui sont également membres dans

$C1$ . Cette somme est désignée par  $D_1$  dans l'algorithme 3 et est égale à  $\frac{13}{3}$  dans l'exemple mentionné dans la figure 3.6(a). De la même manière, le nœud 6 calcule la somme des différences des ratios *Fitness* avec les nœuds 7, 8 et 9 référencée par  $D_2$  dans l'algorithme 3, et qui est égal à  $\frac{5}{3}$ . Dans ce cas, le nœud 6 quittera le cluster  $C1$  et envoie un *CH\_ACCEPTED* à 7, 8 et 9, et demande à ces derniers de mettre à jour leur paramètre *Demand* pour ajuster leur état ( $Demand = 2$ ). Chaque nœud peut demander au plus deux nœuds pour être son *CH*.

Dans les cas restants, un *CH\_REFUSED* sera envoyé. Dans ce cas, le demandeur marque le nœud précédemment demandé comme étant *RelayNode*, et choisit un autre nœud comme *CH* en sélectionnant le voisin ayant la *Fitness* la plus petite, comme illustré dans la figure 3.6(b). Dans cet exemple, les nœuds 7, 8 et 9 envoient un *CH\_DEMAND* au nœud 6. Ce dernier calcule et compare  $D_1$  et  $D_2$ . Comme  $(D_1 = \frac{10}{3}) < (D_2 = \frac{16}{3})$ , le nœud 6 envoie un *CH\_REFUSED* aux nœuds précédents. Ces nœuds envoient à nouveau un *CH\_DEMAND* au nœud ayant la *Fitness* la plus petite. Pour le même exemple précédent mentionné dans la figure 3.6(b), le prochain nœud sélectionné est 7, qui acceptera la demande de délégation comme illustré dans la figure 3.6(b).

Si aucune réponse n'est reçue, le nœud garde une connexion avec le nœud voisin lié au *CH* précédemment demandé et ayant la valeur minimale de *Fitness*. Ce dernier reçoit l'état *SM* (second membre). Cela conduit à avoir des clusters avec des connexions à deux sauts. Ce cas est illustré dans les figures 3.6(a) et 3.6(b) pour le nœud 16 qui demande au nœud 8 pour être son *CH*. Ce dernier refuse cette demande en raison de son paramètre *Demand* qui a atteint 2, il ne peut donc pas changer d'état. Le nœud 16 reste en communication avec le nœud 8 en tant que *RelayNode*. La prochaine demande sera envoyée au nœud 10 qui est plus stable avec des voisins ayant le même *CH* (le nœud 11). Un deuxième *CH\_REFUSED* sera reçu par le nœud 16. Dans ce cas, le nœud 16 sera attaché comme étant un second membre (*SM*) au nœud 8 (*RelayNode*) et aura 6 comme étant *CH* dans la figure 3.6(a) et 7 comme étant son *CH* dans la figure 3.6(b). De la même manière, les nœuds 9 et 11 refuseront la délégation aux nœuds 11 et 14 respectivement, en raison de leur valeur maximale de *Demand* qui est égale à 2.

Basé également sur la valeur *Fitness*, un sous-CH (*SCH*) est désigné par chaque *CH* (par exemple, le nœud 1 pour le cluster *C1* dans les figures 3.6(a), 3.6(b)). La sélection du *SCH* se fait en comparant la *Fitness* du *CH* et celle de ses membres. Le membre ayant la *Fitness* la plus petite sera élu comme *SCH*. Lorsqu'un nœud est connecté à plus d'un *CH*, le nœud ayant la plus petite *Fitness* sera choisi comme son *CH*. Le processus global est expliqué dans l'algorithme 2, et la figure 3.6.



- Noeud membre
- Noeud CH
- Noeud SM
- Noeud SCH
- Noeud demandé pour être CH
- Noeud relais
- Lien SM vers CH
- n =  $\Delta$  de fitness avec le noeud demandé
- Deuxième demande pour CH
- Demande pour CH
- Demande refusée
- Délimiteurs de Cluster
- Lien de communication
- Cn Identifiant du cluster n

(b) Cas 2

FIGURE 3.6 : Élection des chefs de clusters (CH).

### 3.7 Découverte des clusters voisins

Dans notre approche, on considère que les clusters voisins sont au maximum à 3-sauts du  $CH$ . Un cluster est voisin s'il est en communication directe avec le  $CH$  de ce dernier, ou en communication indirecte via un nœud intermédiaire en communication directe avec les deux  $CH$  des clusters en question (deux sauts), ou via deux nœuds intermédiaires au maximum en communication directe avec les deux  $CH$  concernés.

Après découverte des clusters voisins, ces derniers sont classés et étiquetés par des labels « Cluster stable » ou « Cluster non stable ». Chaque  $CH$  vérifie la stabilité de ses communications en comparant la durée de vie des liens  $LV$  avec l' $AVI$  de l'événement. Si  $LV_{ci,ck}$  est inférieur à un seuil  $\theta$ , le cluster voisin en question est considéré comme « Cluster stable », et « Cluster non stable » dans les cas inverses. Les deux listes sont ensuite sauvegardées par le  $CH$ . Le processus de découverte des clusters voisins est récapitulé dans l'algorithme 4.

### 3.8 Maintenance des clusters

Entre deux phases de formation de clusters ( $\delta_{CMT}$ ), la maintenance de ces derniers sera exécutée pour assurer la fraîcheur de chaque donnée et la fiabilité des processus exécutés. Dans cette phase, une métrique appelée Fitness relative ( $RFitness$ ) est utilisée pour évaluer les liens (ou les communications). Un nœud intermédiaire  $v_k$  est utilisé dans le cas où un nœud perd sa connexion directe avec son  $CH$  ou  $SCH$ .

Les Fitness relatives pour  $CH_i$ ,  $SCH_i$ ,  $CH_j$  sont calculées respectivement selon les équations 3.7, 3.8 et 3.9. Ces paramètres font référence aux  $Fitness$  calculées indirectement lorsque la connexion est perdue entre un membre et son  $CH$  ou  $SCH$ .

$$RFitCH_i = RTRP_{k,CH_i} + RVr_{k,CH_i} - RLV_{k,CH_i} \quad (3.7)$$

Où :

—  $RTRP$ ,  $RVr$ ,  $RLV$  sont des paramètres qui font référence à la période de transmission relative, à la mobilité relative et à la durée de validité relative du lien, respectivement, entre deux nœuds connectés indirectement.

$$— RTRP_{k,CH_i} = \frac{TRP_k + TRP_{k,CH_i}}{2}$$

$$— RVr_{k,CH_i} = \frac{Vr_k + Vr_{k,CH_i}}{2}$$

$$— RLV_{k,CH_i} = \frac{LV_k + LV_{k,CH_i}}{2}$$

$$RFitSCH_i = RTRP_{k,SCH_i} + RVr_{k,SCH_i} - RLV_{k,SCH_i} \quad (3.8)$$

Où :

$$— RTRP_{k,SCH_i} = \frac{TRP_k + TRP_{k,SCH_i}}{2}$$

$$— RVr_{k,SCH_i} = \frac{Vr_k + Vr_{k,SCH_i}}{2}$$

$$— RLV_{k,SCH_i} = \frac{LV_k + LV_{k,SCH_i}}{2}$$

$$RFitCH_j = RTRP_{k,CH_j} + RVr_{k,CH_j} - RLV_{k,CH_j} \quad (3.9)$$

Où :

$$— RTRP_{k,CH_j} = \frac{TRP_k + TRP_{k,CH_j}}{2}$$

$$— RVr_{k,CH_j} = \frac{Vr_k + Vr_{k,CH_j}}{2}$$

$$— RLV_{k,CH_j} = \frac{LV_k + LV_{k,CH_j}}{2}$$

### 3.9 Routage de l'information

Chaque véhicule, dans la zone de couverture, doit participer à chaque étape de clustering (formation de clusters, découverte de clusters voisins et maintenance). Dans le protocole de

roulage, les nœuds participant à cette étape doivent fournir le meilleur effort possible conformément à l'équation 3.10. Lors de la réception du message, chaque véhicule doit exécuter l'opération inverse consistant à récupérer le message d'origine.

Nous utilisons l'algorithme RTAA\* (Real Time Adaptive A\*) pour la découverte des routes à partir de la source (premier véhicule détectant l'événement) vers le dernier CH concerné dans la zone de couverture. Cet algorithme est très utilisé dans les jeux temps-réel. L'algorithme RTAA\* est appliqué pour construire des routes rapides et optimales entre les clusters.

$$RTP = |a.LV_j - b.TRP_j| \quad (3.10)$$

Où :  $a$  et  $b$  sont des coefficients positifs à faire varier.

RTAA\* est une heuristique incrémentale, qui permet de résoudre des séquences plus rapidement que les heuristiques qui résolvent des problèmes à partir de zéro [Koenig and Likhachev, 2006]. Dans cet algorithme, les données collectées de la recherche en cours et de la recherche précédente servent à accélérer les recherches A\*.

Le RTAA\* généralise le PAA\* (Path Adaptive A\*) pour accélérer la recherche suivante A\* afin de se terminer rapidement en utilisant le principe d'arborescence réutilisable [Koenig and Likhachev, 2006]. Ce processus permet de trouver une autre route si l'optimum est perdu en raison de la mobilité des véhicules.

Le RTAA\* doit prendre en charge deux opérations :

- L'ajout d'un chemin à l'arborescence réutilisable : lorsque RTAA\* s'arrête car il est sur le point de développer une arborescence réutilisable incluant le nœud de but, RTAA\* ajoute le chemin du premier nœud au nœud réel (fusionnant deux routes : le précédent et la route dans l'arbre réutilisable).
- La suppression de chemins de l'arborescence réutilisable : lorsque le coût d'une arête dans l'arborescence réutilisable augmente, la route allant de l'en-tête de l'arborescence au nœud réel est supprimée.

Dans cette phase, les données précédemment collectées sont utilisées pour acheminer le message optimisé entre les clusters, en appliquant l'algorithme RTAA\*. Dans ce dernier, nous utilisons le paramètre calculé dans l'équation 3.10 pour chaque nœud appartenant à la zone de couverture. La recherche RTAA\* est appliquée et les routes des arbres sont construites en utilisant le paramètre *RTP* (Real Time Path) comme heuristique.

Algorithme 2: Élection du CH et délégation de SCH pour chaque véhicule.

```

1: Initialiser :  $RecordFitness[] = NULL$ ,  $Response = NULL$ ,  $Demand = 0$ ,  $minFit = 0$ ,
    $RelayNode = NULL$ ,  $my\_CH = NULL$ ,  $my\_SCH = NULL$ 
2: Envoyer  $Fitness$  à tous les véhicules voisins
3: Attendre un temps  $t$ 
4: Enregistrer la  $Fitness$  reçue dans  $RecordFitness[]$ 
5:
6: si ( $CD = 0$ ) ou ( $RecordFitness[] = NULL$ ) alors
7:    $my\_CH \leftarrow myMacAddress$ 
8: sinon
9:    $minFit \leftarrow Min(RecordFitness[])$ 
10:   $my\_CH \leftarrow MacAddress(Node_{minFit})$ 
11:  Envoyer  $CH\_Demand$  à  $my\_CH$ 
12:   $Demand \leftarrow Demand + 1$ 
13:  Attendre un temps  $t$ 
14:
15:  si ( $Response = CH\_ACCEPTED$ ) alors
16:    Envoyer  $my\_CH$  et  $my\_SCH$  (ref : Algorithm 3) à tous les voisins
17:  sinon
18:
19:    si ( $Demand = 1$ ) alors
20:       $RelayNode \leftarrow my\_CH$ 
21:       $minFit \leftarrow Min(RecordFitness[] - \{my\_CH\})$ 
22:      Retour à la ligne 10
23:    sinon
24:       $my\_SCH \leftarrow RelayNode$ 
25:       $my\_State \leftarrow SM$ 
26:       $my\_CH \leftarrow CH(my\_SCH)$ 
27:      Envoyer  $my\_CH$  et  $SCH$  à tous les voisins
28:    fin si
29:
30:  fin si
31:
32:  si ( $myMacAddress \neq DesignatedSCH$ ) and ( $my\_State \neq SM$ ) alors
33:     $my\_State \leftarrow MN$ 
34:  fin si
35:
36: fin si

```

Algorithme 3: Réponse du CH aux demandes de délégation.

```

1: Initialiser :  $NumCommons = 0$ ,  $NumDemanders = 0$ ,  $D_1 = 0$ ,  $D_2 = 0$ 
2:
3: si  $CH\_DEMAND$  est reçue du véhicule  $v_i$  alors
4:
5:   si  $my\_State = CH$  alors
6:     Désigner le membre ayant min de  $Fitness$  comme étant  $my\_SCH$ 
7:     Envoyer  $CH\_ACCEPTED$  et  $my\_SCH$  dans un message à  $v_i$ 
8:   sinon
9:
10:    si ( $my\_CH \neq NULL$ ) alors
11:      pour  $v_j \in NV[]$  faire
12:
13:        si ( $my\_CH_j = my\_CH$ ) alors
14:           $NumCommons ++$ 
15:           $D_1 = D_1 + Fitness_j$ 
16:        sinon
17:
18:          si ( $my\_CH_j = myMacAddress$ ) alors
19:             $NumDemanders ++$ 
20:             $D_2 = D_2 + Fitness_j$ 
21:          fin si
22:
23:        fin si
24:
25:      fin pour
26:       $D_1 = D_1 / NumCommons$ 
27:       $D_2 = D_2 / NumDemanders$ 
28:    fin si
29:
30:    si  $my\_CH$  a un  $CH$  et  $D_1 \leq D_2$  alors
31:      Envoyer  $CH\_REFUSED$  à  $v_i$ 
32:    sinon
33:      Désigner le voisin ayant min de  $Fitness$  comme étant  $my\_SCH$ 
34:      Envoyer  $CH\_ACCEPTED$  et  $my\_SCH$  dans un message à  $v_i$ 
35:    fin si
36:
37:  fin si
38:
39: fin si

```

Algorithme 4: Découverte de clusters voisins.

```

1: Initialiser :  $m = 0, v = 0, z = 0$ 
2: pour chaque  $v_j \in SortedNV_{LV} []$  faire
3:     si ( $v_j$  est CH) alors
4:          $ListNClusters[m][0] \leftarrow C_j$ 
5:          $ListNClusters[m][1] \leftarrow v_j$ 
6:          $ListNClusters[m][2] \leftarrow v_j$ 
7:          $ListNClusters[m][3] \leftarrow v_j$ 
8:          $m++$ 
9:         si  $Lv_{ci,cj} < \theta$  alors
10:             $ListStableClusters[v] \leftarrow C_j$ 
11:             $v++$ 
12:         sinon
13:             $ListNonStableClusters[z] \leftarrow C_j$ 
14:             $z++$ 
15:         fin si
16:     sinon
17:         pour chaque  $v_k \in SortedNV_{LV}[j]$  faire
18:             si ( $v_k$  est CH) alors
19:                  $ListNClusters[m][0] \leftarrow C_k$ 
20:                  $ListNClusters[m][1] \leftarrow v_j$ 
21:                  $ListNClusters[m][2] \leftarrow v_k$ 
22:                  $ListNClusters[m][3] \leftarrow v_k$ 
23:                  $m++$ 
24:                 si  $Lv_{ci,ck,cj} < \theta$  alors
25:                     $ListStableClusters[v] \leftarrow C_k$ 
26:                     $v++$ 
27:                 sinon
28:                     $ListNonStableClusters[z] \leftarrow C_k$ 
29:                     $z++$ 
30:                 fin si
31:             sinon
32:                 pour chaque  $v_l \in SortedNV_{LV}[k]$  faire
33:                     si ( $v_l$  est CH) alors
34:                          $ListNClusters[m][0] \leftarrow C_l$ 
35:                          $ListNClusters[m][1] \leftarrow v_j$ 
36:                          $ListNClusters[m][2] \leftarrow v_k$ 
37:                          $ListNClusters[m][3] \leftarrow v_l$ 
38:                          $m++$ 
39:                          $ListNonStableClusters[z] \leftarrow C_l$ 
40:                          $z++$ 
41:                     fin si
42:                 fin pour
43:             fin si
44:         fin pour
45:     fin si
46: fin pour
    
```

Algorithme 5: Maintenance des clusters.

```

1: pour tout  $\delta_{CMT}$ , chaque nœud : faire
2:   Envoyer CH_Checking à my_CH
3:   Envoyer SCH_Checking à my_SCH
4:   Envoyer NeighbourCH_Checking à  $CH \in NV[]$ 
5:   Attendre un temps  $t$ 
6:   si CH_Confirmed = NULL alors
7:     si SCH_Confirmed  $\neq$  NULL alors
8:        $my\_CH \leftarrow SCH$ 
9:     sinon
10:      si NeighboursCH_Confirmed  $\neq$  NULL alors
11:         $my\_CH \leftarrow \arg \min\{Fitness_{NeighboursCH}\}$ 
12:      sinon
13:        si  $v_i$  est en communication avec  $v_k$  et  $v_k$  est en communication avec
         $my\_CH$  et / ou  $my\_SCH_i$  et / ou NeighboursCH alors
14:          Calculer la  $RFitness_{CH_i}$ 
15:          Calculer la  $RFitness_{my\_SCH_i}$ 
16:          Calculer la  $RFitness_{NeighboursCH}$ 
17:           $my\_CH \leftarrow \arg \min(RFit_{CH_i}, RFit_{SCH_i}, RFit_{NeighboursCH})$ 
18:        sinon
19:           $my\_CH \leftarrow myMacAddress$ 
20:        fin si
21:      fin si
22:    fin si
23:  fin si
24: fin pour

```

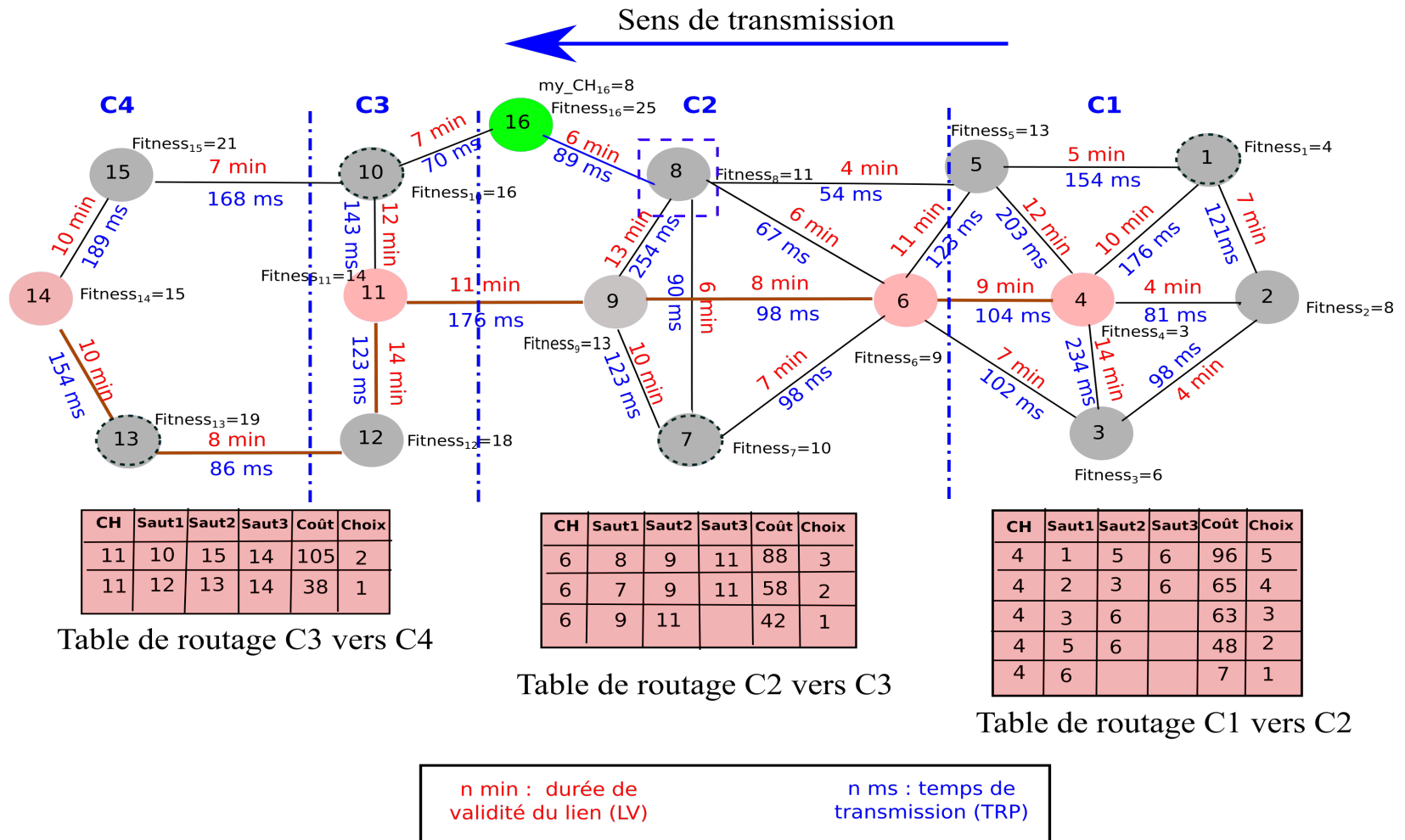


FIGURE 3.7 : Exemple de schéma de l'algorithme *FitnessClustering*.

Dans la figure 3.7, les schémas de routage entre clusters  $C1$ ,  $C2$ , et  $C3$  sont illustrés. Le coût général de chaque route ( $RTP$ ) est calculé en utilisant la formule 3.10. Dans l'exemple de la figure 3.7, les valeurs des coefficients  $a$  et  $b$  sont fixées à 0.5 ( $a = 0.5$  et  $b = 0.5$ ). Ensuite, les messages seront routés en utilisant le chemin optimal. Si le chemin optimal est perdu, le deuxième chemin optimal est utilisé (cf. Figure 3.7).

### 3.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons un nouvel algorithme CBRP (Cluster Cased Routing Protocol) pour les réseaux véhiculaires basé sur le mode de communication V2V. L'approche proposée permet aux véhicules de se regrouper en utilisant le paramètre *Fitness*, qui combine de nombreux paramètres. Étant donné que l'approche est basée sur le degré de connectivité (CD), elle peut être classée en tant que protocole de clustering basé sur le voisinage. La mobilité relative est un paramètre important de la fonction *Fitness*. Cela conduit à classer cet algorithme en tant que algorithme basé sur la mobilité. En plus de ces paramètres, la période de transmission (TRP) et la durée de validité des liens (LV) permettent de prédire l'état futur du réseau, ce qui permet de le classer comme étant un algorithme de clusterisation prédictive. L'algorithme *FitnessClustering* peut également être classé en tant qu'algorithme pondéré, car il utilise de nombreux facteurs ou poids dans la fonction *Fitness*. Ces classifications permettent de considérer cette approche comme une approche de clusterisation multi-objectifs ou hybride.



# Simulations et résultats

## 4.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, de nombreux défis pour la dissémination de données dans les réseaux véhiculaires ont été discutés. En parallèle, de nombreuses applications et technologies sont en cours de développement pour les relever. Ces applications doivent donc être minutieusement vérifiées avant leur déploiement dans le monde réel.

Tester de telles applications dans un environnement réel, présente un danger direct sur la vie des humains, implique des coûts très élevés et présente de nombreux problèmes de sécurité. Donc, pour vérifier ce type d'applications, la simulation informatique est utilisée.

Afin de valider notre approche *FitnessClustering*, nous avons réalisé des expériences par simulation, en prenant en compte l'aspect temps réel et un scénario de simulation réaliste. Ces simulations sont alimentées par un modèle de trafic routier urbain dont les paramètres sont obtenus à partir de plusieurs expérimentations et scénarios. Les outils, le scénario et les paramètres de simulation sont détaillés les sections qui suivent.

## 4.2 Outils de simulation

Pour simuler l'approche proposée, nous avons utilisé le simulateur VanetSim [Tomandl et al., 2014] pour évaluer en temps réel les performances des algorithmes. VanetSim permet de simuler différents scénarios de trafic routier en temps réel, en utilisant des cartes OSM<sup>1</sup>.

VANETsim contient quatre composants principaux : **une interface graphique**, un module pour **la création de scénarios**, **un noyau de simulation** et un module pour **le post-traitement** [Tomandl et al., 2014] (cf. Figure 4.1).

**L'interface graphique** fournit un éditeur de cartes graphiques qui permet à l'utilisateur de créer et de manipuler des cartes routières. Les cartes peuvent être créées ou importées d'OpenStreetMap sous format XML, ce qui facilite l'interopérabilité avec d'autres outils. En outre, l'interface graphique visualise le processus de simulation sur une carte interactive qui peut être visionnée à différentes échelles afin d'afficher les routes et les véhicules. La simulation peut être exécutée en lignes de commande pour une exécution de plusieurs expériences dans un lot.

**Le module de création de scénarios** offre la possibilité de préparer rapidement une série d'expériences dans lesquelles les paramètres de simulation peuvent être modifiés automatiquement. Les expériences sont enregistrées dans des fichiers de scénarios (XML), ce qui permet de les exploiter pour plusieurs exécutions.

**Le noyau de simulation** permet l'exécution de la simulation, en prenant en compte les paramètres des autres modules. Ce module fonctionne en combinant tous les éléments pertinents d'infrastructure, de véhicules et de sécurité / confidentialité pour la simulation.

Dans **le module de post-traitement**, les fichiers journaux créés lors de la simulation sont analysés et traités pour créer des tableaux, des graphiques ou pour visualiser les résultats obtenus lors de la simulation directement sur la carte interactive de l'interface graphique.

---

1. OSM ou OpenStreetMap est un projet qui a pour but de constituer une base de données cartographiques libre du monde entier (permettant par exemple de créer des cartes sous licence libre), en utilisant le système GPS et d'autres données libres.

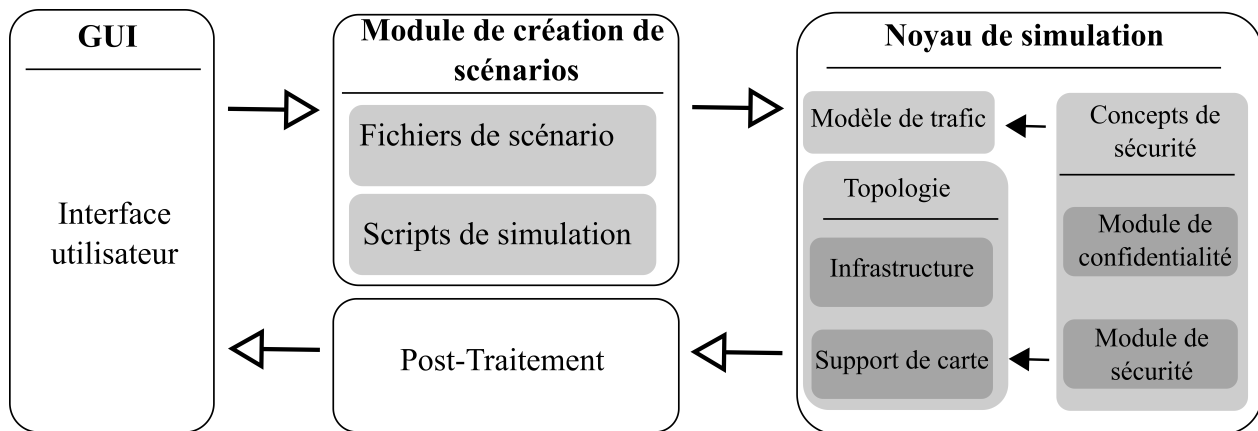


FIGURE 4.1 : Architecture en bloc du simulateur VanetSim [Tomandl et al., 2014].

### 4.3 Scénario de simulation

Notre scénario de simulation consiste en une ville urbaine de  $8km \times 6km$  (cf. Figure 4.2), dans laquelle les véhicules se déplacent sur différentes voies et autoroutes, avec des directions et des vitesses variées.

Les véhicules sont injectés selon un processus de Poisson avec une fréquence de 5, 7 et 10 véhicules par seconde, afin d’obtenir différents trafics denses. Le temps total de simulation associé aux fréquences d’insertion précédentes est d’environ 300, 700 et 1000 *sec*. De nombreux événements sont générés pendant la simulation et à différents moments pour tester le processus de clustering. Les performances de notre approche sont évaluées pendant le temps restant.

### 4.4 Paramètres de simulation

Les différentes valeurs pour tous les paramètres utilisés sont mentionnées dans le tableau 4.1. Pour avoir une fiabilité statistique, le processus de simulation est répété plusieurs fois pour différents scénarios, afin d’assurer que les résultats obtenus reflètent la réalité pour différents scénarios.

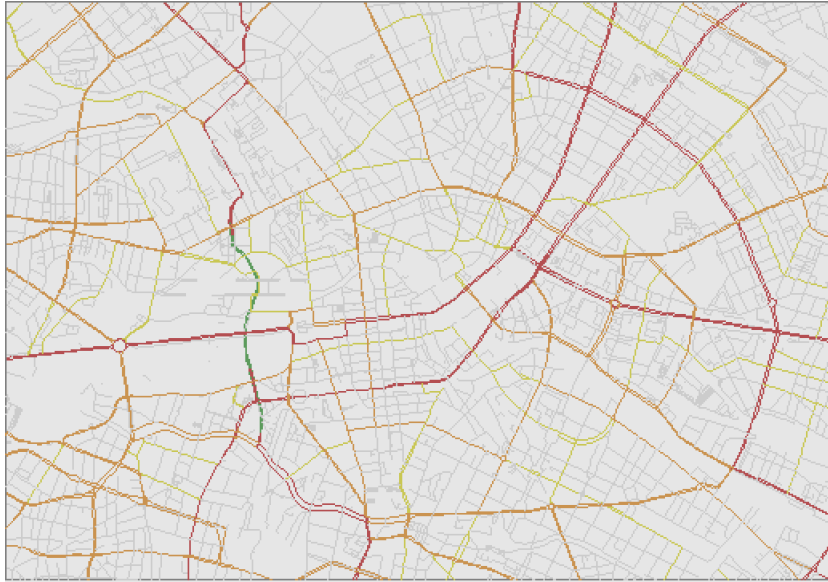


FIGURE 4.2 : Carte utilisée dans la simulation (Ville de Berlin).

Dans chaque expérience, le flux de véhicules est généré 10 fois pour les mêmes paramètres  $\lambda$  de Poisson et la durée de la simulation  $T_{sim}$ .

La valeur de  $\lambda$  est variée pour obtenir différentes densités de trafic ( $\lambda = 5$  pour obtenir un trafic dense,  $\lambda = 7$  pour obtenir un trafic moyennement dense et  $\lambda = 10$  pour obtenir un trafic très dense).  $\lambda$  est varié pour garantir que les performances de la simulation sont valables pour différents scénarios. Le temps de simulation  $T_{sim}$  est d'environ 300 , 700 et 1000 *sec*. Ces paramètres donnent environ 1200 combinaisons, 10 combinaisons ont été exécutées en parallèle, afin de réduire le temps d'exécution. D'un autre côté, les paramètres de la fonction *Fitness* sont variés comme indiqué dans le tableau 4.2.

## 4.5 Métriques d'évaluation

Pour évaluer les performances de notre approche, nous avons varié les valeurs des coefficients des paramètres de la fonction *Fitness* afin d'évaluer :

Tableau 4.1 : Paramètres et valeurs des modèles de simulation.

| Paramètre   | Valeur  |
|---|---|
| Temps de simulation                                       | 300, 700 et 1000 secondes   |
| Modèle de génération de trafic                            | <i>Modèle de trafic Poisson</i>   |
| Taille des messages "Hello"                               | 23 octets   |
| Intervalle de génération des messages "Hello"             | 3 secondes  |
| Intervalle de validité absolue des messages "Hello" (AVI) | 3 secondes  |
| Vitesse minimale  | 10 m/s  |
| Vitesse maximale  | 60 m/s  |
| Variation de vitesse                                      | De manière aléatoire tel que la vitesse $\in$ [Vitesse minimale , Vitesse maximale] |
| Taille du réseau (L*W)                                    | 8km $\times$ 6km  |
| Portée maximale de transmission                           | 300 m   |
| Taille du message d'événement                             | 15 octets   |
| Nombre maximal de sauts                                   | 2   |
| Fréquence moyenne d'insertion des véhicules               | 5, 7 et 10 ms   |
| Temps de maintenance                                      | 3 secondes après la phase de formation des clusters                                 |
| Nombre maximal de voies                                   | 3   |
| Protocole Mac   | IEEE 802.11p  |
| Fréquence de la porteuse                                  | 5.89 Hz   |

- Nombre de clusters générés sous des conditions différentes de trafic (vitesses et densités de réseau variables) : ce paramètre est évalué pour expliquer les variations des autres métriques de performance.
- La durée de vie d'un CH fait référence au temps pendant lequel un véhicule gardera son rôle de CH avant de quitter le réseau (autrement dit cette mesure est lié à la durée de vie d'un nœud ayant le rôle *CH* au moins une fois).
- La durée de vie d'un MN, d'un SCH et d'un SM sont estimées de la même manière, en se référant à la durée des états correspondants (*MN*, *SCH*, et *SM* respectivement) des véhicules pendant la durée où ces nœuds sont actifs.
- La stabilité globale d'un cluster est calculée en utilisant les quatre durées d'état décrites précédemment par rapport à la durée de vie globale des nœuds et la durée de

la simulation. L'impact de chaque paramètre et des facteurs de poids correspondants est illustré dans le tableau 4.2. Notez que nous avons pris en compte les scénarios précédemment définis avec différentes densités de trafic, des temps de simulation et des vitesses variables pour obtenir les valeurs affichées dans le tableau 4.2.

- Temps de formation des clusters : c'est un paramètre de performance très important qui permet d'évaluer l'efficacité des approches de Clustering, en particulier dans un réseau extrêmement mobile. Plus le temps de formation des clusters est petit, plus l'algorithme est efficace. Dans la section suivante, le temps de formation de quatre algorithmes (*APROVE*, *VWCA*, *MoZo* et *FitnessClustering*) décrits précédemment dans les chapitres 2 et 3 est évalué. Le temps de maintenance des clusters est simulé aussi pour les algorithmes qui proposent une phase de maintenance.
- Le temps global de routage de notre approche et de l'algorithme *MoZo* est également calculé pour évaluer l'efficacité des routes. Pour évaluer cette métrique, un événement est généré pendant la simulation afin de mesurer le coût de transmission de bout en bout pour la zone de couverture calculée dans l'algorithme *FitnessClustering*.
- Nombre de véhicules orphelins : ce paramètre permet d'évaluer le nombre de nœuds, qui restent en état UN (UNdecided) après la phase de formation des clusters. Plus ce nombre est élevé, moins l'algorithme est performant.
- Taux de livraison : cette métrique représente le pourcentage des messages effectivement envoyés aux nœuds destinataires. Ce paramètre est calculé en soustrayant le nombre de messages reçus du nombre de messages envoyés pour chaque nœud, puis en divisant sur le nombre total des messages envoyés par tous les nœuds. Le taux moyen de livraison de messages envoyés correctement sur un canal de communication est un paramètre très important pour évaluer les performances des méthodes de clustering.
- Surcharge de réseau (Overhead en anglais) : la tempête de diffusion<sup>2</sup> [Dong et al., 2017] est l'un des défis les plus pressants pour les réseaux véhiculaires. Il perturbe souvent la communication réseau, en raison de la grande quantité de messages échangés et des

---

2. La tempête de diffusion ou encore tempête de broadcast (Broadcast Storm en anglais) est une saturation du réseau entraînant son blocage lors de laquelle les messages (trames) transmis en diffusion (souvent des messages d'information, de demande d'information ou d'erreur) donnent lieu à une réponse des hôtes sur le même domaine de diffusion. Dans certains cas, cette panne provoque une situation de déni de service (DoS).

changements fréquents de la topologie [Dong et al., 2017; Velmurugan and Manickam, 2018; Feukeu and Zuva, 2018]. La mise en cluster dans les réseaux véhiculaires vise principalement à réduire les coûts de communication. En raison de la mobilité à grande échelle des réseaux véhiculaires, du nombre de nœuds impliqués et du nombre important de messages échangés, le nombre total de paquets à transférer ou à transmettre doit être simulé afin d'évaluer la surcharge des communications déclenchées par les algorithmes, pendant la simulation. Pour le processus d'évaluation, nous avons simulé les quatre algorithmes suivants : APROVE, MoZo, VWCA et notre algorithme, qui est désigné par *FitnessClustering*. Théoriquement, pour les quatre algorithmes, le nombre de trames envoyées augmente en parallèle avec la taille du réseau. Les paramètres les plus importants liés à la surcharge du réseau sont la taille des paquets "Hello" et la fréquence de génération de ces derniers. Théoriquement, et comme le montrent les équations 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, *FitnessClustering* et MoZo présentent une meilleure performance que VWCA et APROVE. Cela est dû à la taille des paquets des messages "Hello" échangés et à l'intervalle de dissémination de ces algorithmes.

$$BeaconSize_{APROVE} = 99 * NumActiveVeh + 12 \sum_{i=0}^{NumActiveVeh} CD_{i\text{octet}}/sec \quad (4.1)$$

$$BeaconSize_{VWCA} = 300 * NumActiveVeh + 12 \sum_{i=0}^{NumActiveVeh} CD_{i\text{octet}}/2sec \quad (4.2)$$

$$BeaconSize_{MoZo} = 32 * NumActiveVeh + 12 \sum_{i=0}^{NumActiveVeh} CD_{i\text{octet}}/sec \quad (4.3)$$

$$BeaconSize_{FitnessClustering} = 23 * NumActiveVeh + 4 \sum_{i=0}^{NumActiveVeh} CD_{i\text{octet}}/3sec \quad (4.4)$$

## 4.6 Résultats obtenus

### 4.6.1 Évaluation des paramètres de la fonction *FitnessClustering*

Les paramètres de la fonctions *Fitness* ont été évalués, pour étudier l'impact de chaque facteur sur l'approche de Clustering et comparer les résultats présentant un meilleur rendu avec les résultats des autres algorithmes. Le tableau 4.2 montre que chaque paramètre a un impact sur les performances du Clustering. Il montre clairement que les paramètres légèrement modifiés ont tendance à réduire ou à augmenter la durée de vie pour un état précis (*CH*, *SCH*, *MN*, *SM*) et donc la stabilité des clusters.

À partir du tableau 4.2, nous pouvons observer que lorsque deux facteurs ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\sigma$ ) sont nuls, la stabilité des clusters diminue, or le taux de changement de *CH* est plus élevé (durée de *CH* inférieure). Par exemple, lorsque ( $\alpha = 0$ ,  $\beta = 0.75$ ,  $\gamma = 0.25$  et  $\sigma = 0$ ), la durée de vie d'un *CH* est inférieure à celle de la durée de vie d'un *SCH* et *MN*. Cela conduit à des changements plus fréquents des *CH*, par conséquent le cluster devient plus instable, ce qui implique une ré-affiliation fréquente du nœud.

Lorsque ( $\alpha = 0.25$ ,  $\beta = 0$ ,  $\gamma = 0$  et  $\sigma = 0.75$ ), la durée de vie d'un *CH* est supérieure à celle du premier cas ( $\alpha = 0$ ,  $\beta = 0.75$ ,  $\gamma = 0.25$  et  $\sigma = 0$ ). Ce résultat peut s'expliquer par l'impact des paramètres période de transmission (*TRP*) et mobilité relative (*Vr*) qui sont plus faibles dans ce scénario, alors que la durée de vie des nœuds qui ont un rôle très important dans notre approche (Durée *SCH*) est plus courte. L'état *SCH* est considéré comme étant un rôle très important, parce qu'il permet de maintenir les clusters rapidement et de ré-affilier les nœuds d'un cluster très rapidement en cas de perte de son *CH*.

Selon les résultats de la simulation (cf. Tableau 4.2), les meilleurs résultats de performance sont obtenus lorsqu'au moins 3 facteurs ne sont pas nuls, par exemple, les facteurs de la combinaison de paramètres suivantes ( $\alpha = 0.25$ ,  $\beta = 0.25$ ,  $\gamma = 0.50$  et  $\sigma = 0$ ).

Dans le cas où les quatre paramètres sont combinés dans la fonction *Fitness*, les meilleures performances de clustering sont obtenues pour ( $\alpha = 0.25$ ,  $\beta = 0.25$ ,  $\gamma = 0.25$ ,  $\sigma = 0.25$ ) et

les quatre dernières combinaison de facteurs du tableau 4.2 ( $\alpha = 0.10, \beta = 0.30, \gamma = 0.30, \sigma = 0.30$ ), ( $\alpha = 0.30, \beta = 0.10, \gamma = 0.30, \sigma = 0.30$ ), ( $\alpha = 0.30, \beta = 0.30, \gamma = 0.10, \sigma = 0.30$ ) et ( $\alpha = 0.30, \beta = 0.30, \gamma = 0.30, \sigma = 0.10$ ).

La combinaison suivante de facteurs : ( $\alpha = 0.30, \beta = 0.10, \gamma = 0.30$  et  $\sigma = 0.30$ ) donne les meilleures performances de l'algorithme *FitnessClustering*. Cela confirme que le degré de connectivité (*CD*) n'est pas le paramètre le plus important pour la formation des clusters dans un environnement très mobile.

Selon les résultats de la simulation, les quatre meilleures combinaisons de paramètres de la fonctions *Fitness* sont conservées pour le reste des calculs de performance.

| $\alpha$ | $\beta$ | $\gamma$ | $\sigma$ | Durée de<br>vie d'un<br>CH | Durée de<br>vie d'un<br>SCH | Durée de<br>vie d'un<br>MN | Durée de<br>vie d'un<br>SM | Stabilité<br>des clusters |
|----------|---------|----------|----------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 0.00     | 0.00    | 0.25     | 0.75     | 42%                        | 33%                         | 82%                        | 47%                        | 51%                       |
| 0.00     | 0.00    | 0.50     | 0.50     | 48%                        | 48%                         | 92%                        | 46%                        | 59%                       |
| 0.00     | 0.00    | 0.75     | 0.25     | 39%                        | 33%                         | 71%                        | 56%                        | 50%                       |
| 0.00     | 0.25    | 0.00     | 0.75     | 43%                        | 40%                         | 76%                        | 41%                        | 50%                       |
| 0.00     | 0.25    | 0.25     | 0.50     | 43%                        | 40%                         | 76%                        | 50%                        | 52%                       |
| 0.00     | 0.25    | 0.50     | 0.25     | 42%                        | 44%                         | 77%                        | 52%                        | 54%                       |
| 0.00     | 0.25    | 0.75     | 0.00     | 46%                        | 44%                         | 82%                        | 57%                        | 57%                       |
| 0.00     | 0.50    | 0.00     | 0.50     | 45%                        | 39%                         | 77%                        | 41%                        | 50%                       |
| 0.00     | 0.50    | 0.25     | 0.25     | 50%                        | 47%                         | 84%                        | 51%                        | 58%                       |
| 0.00     | 0.50    | 0.50     | 0.00     | 37%                        | 41%                         | 69%                        | 57%                        | 51%                       |
| 0.00     | 0.75    | 0.00     | 0.25     | 46%                        | 46%                         | 84%                        | 50%                        | 56%                       |
| 0.00     | 0.75    | 0.25     | 0.00     | 34%                        | 36%                         | 74%                        | 54%                        | 49%                       |
| 0.25     | 0.00    | 0.00     | 0.75     | 45%                        | 40%                         | 87%                        | 55%                        | 57%                       |
| 0.25     | 0.00    | 0.25     | 0.50     | 46%                        | 50%                         | 82%                        | 57%                        | 59%                       |
| 0.25     | 0.00    | 0.50     | 0.25     | 50%                        | 45%                         | 84%                        | 62%                        | 61%                       |
| 0.25     | 0.00    | 0.75     | 0.00     | 50%                        | 38%                         | 85%                        | 64%                        | 59%                       |

|             |             |             |             |            |            |            |            |            |
|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.25        | 0.25        | 0.00        | 0.50        | 59%        | 43%        | 89%        | 64%        | 61%        |
| <b>0.25</b> | <b>0.25</b> | <b>0.25</b> | <b>0.25</b> | <b>68%</b> | <b>55%</b> | <b>90%</b> | <b>64%</b> | <b>70%</b> |
| 0.25        | 0.25        | 0.50        | 0.00        | 47%        | 62%        | 83%        | 59%        | 63%        |
| 0.25        | 0.50        | 0.00        | 0.25        | 48%        | 44%        | 87%        | 53%        | 58%        |
| 0.25        | 0.50        | 0.25        | 0.00        | 44%        | 48%        | 69%        | 54%        | 54%        |
| 0.25        | 0.75        | 0.00        | 0.00        | 44%        | 60%        | 72%        | 56%        | 58%        |
| 0.50        | 0.00        | 0.00        | 0.50        | 43%        | 30%        | 78%        | 44%        | 49%        |
| <b>0.50</b> | <b>0.00</b> | <b>0.25</b> | <b>0.25</b> | <b>54%</b> | <b>46%</b> | <b>83%</b> | <b>76%</b> | <b>65%</b> |
| 0.50        | 0.00        | 0.50        | 0.00        | 44%        | 29%        | 78%        | 65%        | 54%        |
| 0.50        | 0.25        | 0.00        | 0.25        | 56%        | 44%        | 88%        | 56%        | 61%        |
| 0.50        | 0.25        | 0.25        | 0.00        | 51%        | 50%        | 83%        | 62%        | 62%        |
| 0.50        | 0.50        | 0.00        | 0.00        | 49%        | 50%        | 76%        | 55%        | 57%        |
| 0.75        | 0.00        | 0.00        | 0.25        | 52%        | 42%        | 90%        | 48%        | 58%        |
| 0.75        | 0.00        | 0.25        | 0.00        | 43%        | 31%        | 76%        | 55%        | 51%        |
| 0.75        | 0.25        | 0.00        | 0.00        | 41%        | 51%        | 68%        | 50%        | 52%        |
| 0.10        | 0.30        | 0.30        | 0.30        | 53%        | 48%        | 82%        | 60%        | 61%        |
| <b>0.30</b> | <b>0.10</b> | <b>0.30</b> | <b>0.30</b> | <b>62%</b> | <b>84%</b> | <b>83%</b> | <b>61%</b> | <b>73%</b> |
| 0.30        | 0.30        | 0.10        | 0.30        | 53%        | 56%        | 82%        | 62%        | 63%        |
| <b>0.30</b> | <b>0.30</b> | <b>0.30</b> | <b>0.10</b> | <b>59%</b> | <b>52%</b> | <b>88%</b> | <b>57%</b> | <b>64%</b> |

Tableau 4.2 : Évaluation des paramètres de la fonction *Fitness*.

#### 4.6.2 Analyse des performances des algorithmes et comparaison des résultats

Dans la figure 4.3, le nombre moyen normalisé de clusters générés est illustré pour avoir une meilleure analyse des autres métriques évaluées dans les sections suivantes, et consolider

l'analyse des résultats représentant la durée moyenne pendant laquelle un nœud conserve son état, et les durées consommées pour évaluer les différentes phases de chaque algorithme. À partir de cette figure, on en déduit que l'algorithme *FitnessClustering* génère peu de clusters, car certains nœuds, dont l'état est *SM*, sont connectés au *CH* via un nœud intermédiaire (certains clusters avec des connexions à deux sauts).

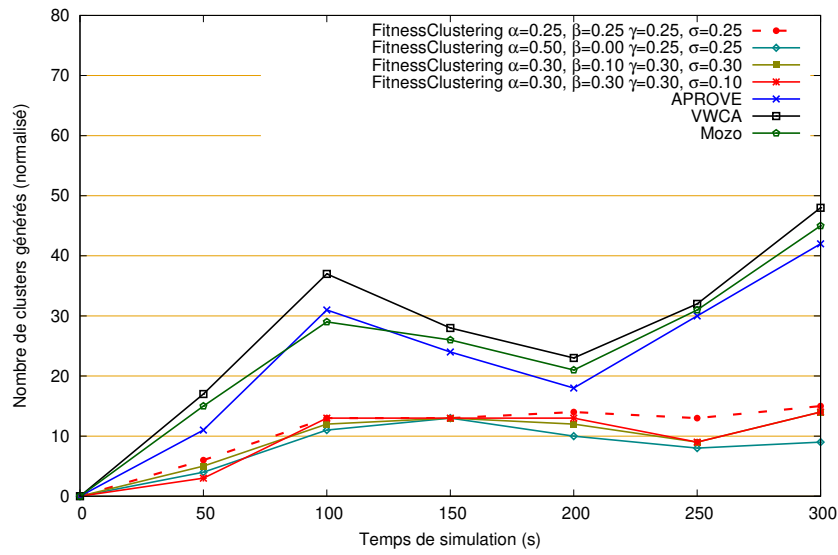


FIGURE 4.3 : Nombre normalisé de clusters générés.

Les résultats de la figure 4.4 illustrent les performances des clusters en termes de durée de vie moyenne des véhicules ayant l'état *CH*. Les résultats obtenus montrent que la vitesse maximale influence différemment les quatre algorithmes. Les nœuds *CH* dans APROVE et Mozo sont plus instables dans un environnement très dynamique, contrairement à VWCA qui est plus efficace lorsque la vitesse augmente. Cette stabilité est due au nombre élevé de *CH* résultant dans cette approche. La durée de vie des nœuds *CH* dans l'algorithme *FitnessClustering* est légèrement influencée par la vitesse, comme illustré dans la Figure 4.4.

La combinaison ( $\alpha = 0.30, \beta = 0.30, \gamma = 0.10, \sigma = 0.30$ ) est la plus performante en terme de la durée de vie d'un CH. En effet, quand la durée de vie des liens de communication (*LV*) est élevée, la période de transmission (*TRP*) et la mobilité relative (*Vr*) sont faibles; les

véhicules conservent leurs états pendant une longue période. Le degré de connectivité ( $CD$ ) a un impact léger sur la durée de vie d'un CH, mais il est important d'inclure ce paramètre dans la fonction principale ( $Fitness$ ), comme l'indique la combinaison ( $\alpha = 0.50, \beta = 0.00, \gamma = 0.25, \sigma = 0.25$ ). Cette combinaison de facteurs présente des résultats moins satisfaisants en terme de durée de vie d'un CH lorsque  $\beta$  est nul.

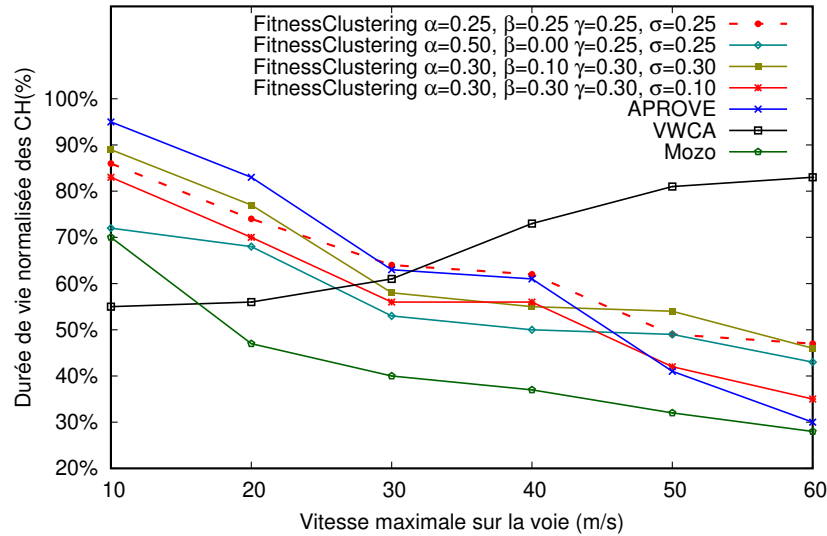
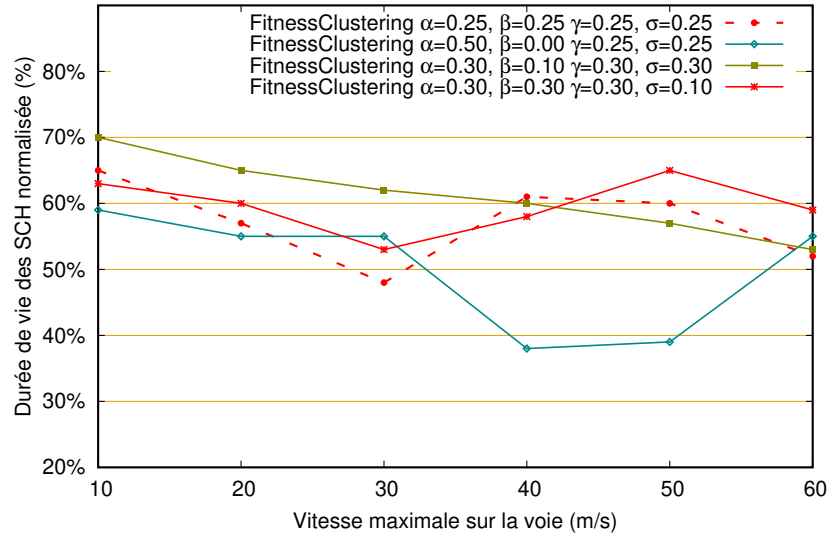


FIGURE 4.4 : Durée de vie normalisée des  $CH$  (%).

Les nœuds  $SCH$  ont pour rôle de gérer les clusters lorsque le  $CH$  est déconnecté. La vitesse maximale sur une voie influence inversement la durée de vie d'un  $SCH$ , car dans un environnement très mobile, les nœuds  $CH$  ont tendance à se déconnecter plus fréquemment de leurs clusters. Donc les  $SCH$  ont pour rôle de gérer les clusters jusqu'au prochain cycle de Clustering.

Lorsque les nœuds  $SCH$  sont choisis avec un facteur de degré de connectivité nul ( $\beta = 0$ ), leurs déconnexions et transitions d'état sont plus fréquentes, comme le montre la figure 4.5 pour la combinaison ( $\alpha = 0.50, \beta = 0.00, \gamma = 0, 25, \sigma = 0, 25$ ).

FIGURE 4.5 : Durée de vie normalisée des *SCH* (%).

La figure 4.6 présente la durée de vie moyenne normalisée des nœuds ayant l'état membre (*MN*). Nous observons que lorsque la valeur de la vitesse est comprise entre  $10m/s$  et  $45m/s$ , les nœuds membres sont plus stables. Les clusters produits par VWCA et FitnessClustering sont plus stables par rapport aux groupes produits par APROVE et MoZo en termes de durée de vie des membres. Lorsque la vitesse maximale sur une voie est supérieure, les nœuds membres dans VWCA ont tendance à perdre leurs performances, tandis que *FitnessClustering* maintient une bonne efficacité pour les membres.

Dans un réseau véhiculaire peu mobile, *FitnessClustering* produit moins de nœuds de second membre (*SM*), comme indiqué dans la figure 4.7, car la plupart des nœuds dans des scénarios de trafic stable sont connectés directement à leur *CH*. Dans des conditions de trafic mobile modérées, les seconds membres produits ont tendance à conserver leurs états plus longtemps, en raison de la durée de vie des liens (*LV*) qui est supérieure dans ce type de trafic.

La durée de vie des *SM* est plus courte dans un réseau très mobile à cause de la déconnexion fréquente des nœuds, comme illustré dans la figure 4.7. La combinaison des quatre

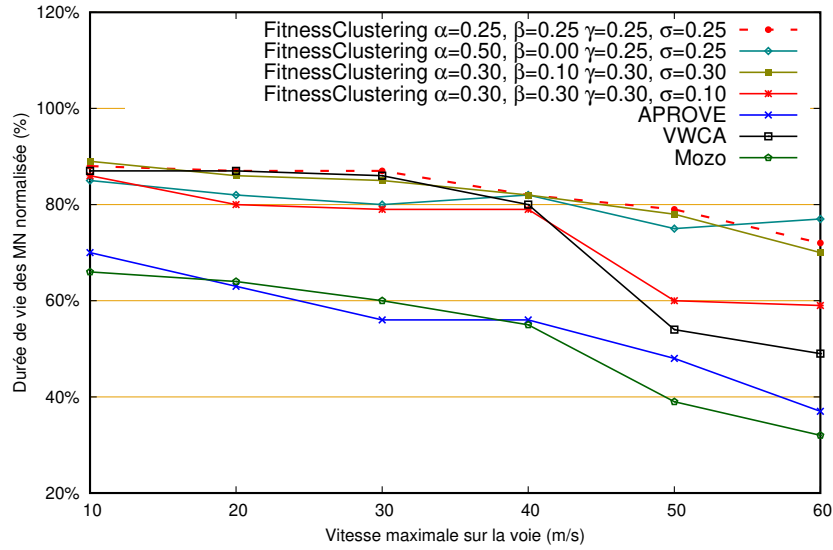


FIGURE 4.6 : Durée de vie normalisée des membres de clusters (*MN*) (%).

paramètres de la fonction *Fitness* ( $\alpha \neq 0, \beta \neq 0, \gamma \neq 0$  et  $\sigma \neq 0$ ) améliore la durée de vie des membres *SM*, comme indiqué dans la même figure.

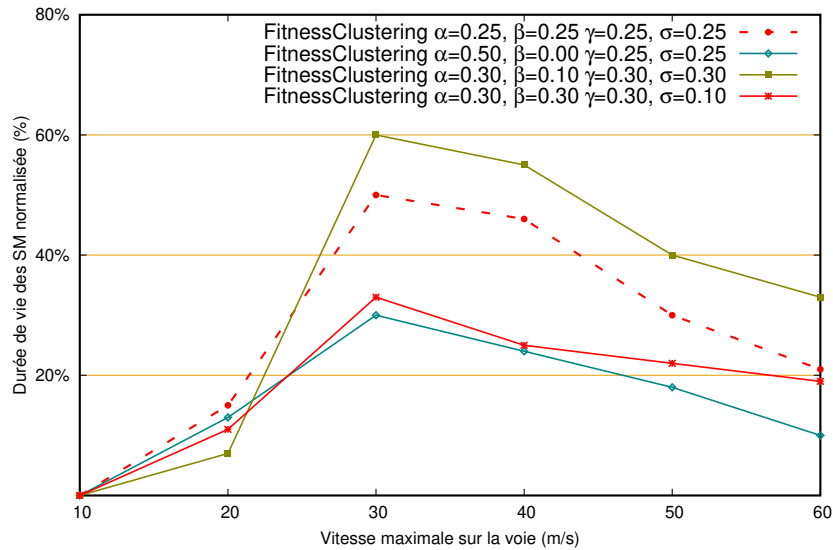


FIGURE 4.7 : Durée de vie normalisée des seconds membres de clusters (*SM*) (%).

Les résultats de la figure 4.8 montrent les performances du cluster en terme de durée moyenne des véhicules. Les résultats montrent que les algorithmes APROVE, MoZo et VWCA reflètent de manière significative la dégradation des performances en raison de la variation de la mobilité du réseau. APROVE et MoZo ont tendance à être instables dans un réseau très mobile, tandis que VWCA procure un gain nettement meilleur en terme de stabilité lorsque la vitesse augmente. Dans l'algorithme *FitnessClustering*, les nœuds maintiennent leurs stabilités plus longtemps malgré les variations de vitesse. Comme illustré dans la figure 4.8, les valeurs des facteurs de la combinaison ( $\alpha = 0.30$ ,  $\beta = 0.30$ ,  $\gamma = 0.10$ ,  $\sigma = 0.30$ ) offrent des performances supérieures aux autres combinaisons.

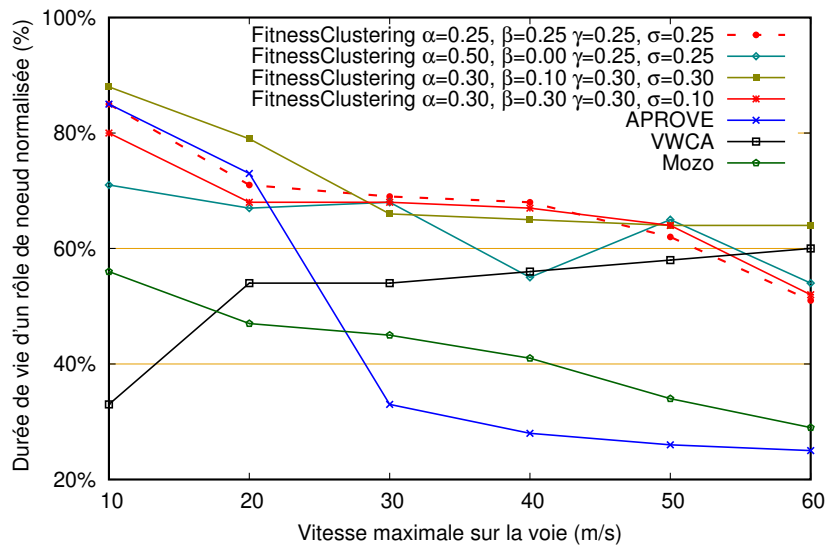


FIGURE 4.8 : Durée de vie normalisée d'un rôle de nœud (%).

Dans les réseaux mobiles, l'environnement change rapidement. En conséquence, les algorithmes de clustering doivent offrir une efficacité optimale en terme de coût. La figure 4.9 illustre les résultats obtenus pour les temps de formation des clusters sous différentes densités de trafic.

À partir de la figure 4.9, nous pouvons constater que notre algorithme et MoZo surpassent les algorithmes VWCA et APROVE en terme de coût. L'algorithme APROVE a besoin de

plus de temps pour former les clusters en raison du nombre d'itérations nécessaires pour converger [Hassanabadi et al., 2014].

VWCA requiert une longue période pour former les clusters en raison de l'exécution de sa phase *AATR* [Daeinabi et al., 2011], qui consiste à déterminer la meilleure portée de transmission pour chaque nœud, ce qui conduit à calculer plusieurs fois les listes de voisinage [Daeinabi et al., 2011].

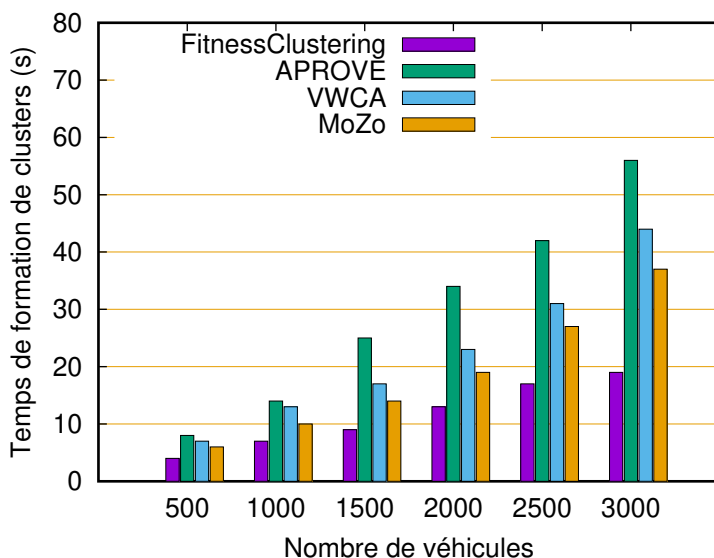


FIGURE 4.9 : Temps normalisé de formation de clusters.

MoZo, APROVE et notre approche *FitnessClustering* proposent une phase de maintenance pour améliorer les performances des algorithmes correspondants. Comme illustré dans la figure 4.10, les processus de maintenance des algorithmes APROVE et *FitnessClustering* consomment moins de temps, tandis que MoZo requiert un temps plus significatif pour entretenir les clusters en raison de la maintenance des zones mobiles [Lin et al., 2017].

Pour évaluer les performances de routage des approches *FitnessClustering* et MoZo, la simulation a été lancée avec différentes durées de vie d'événements, afin de couvrir des

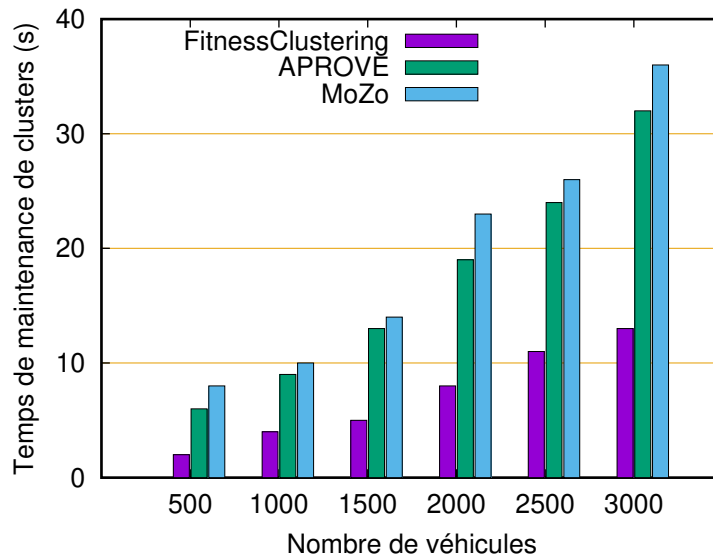


FIGURE 4.10 : Temps normalisé de maintenance de clusters.

distances plus ou moins variables. Comme illustré dans la figure 4.11, l'approche Fitness-Clustering propose une méthode de routage plus fiable MoZo en terme de coût.

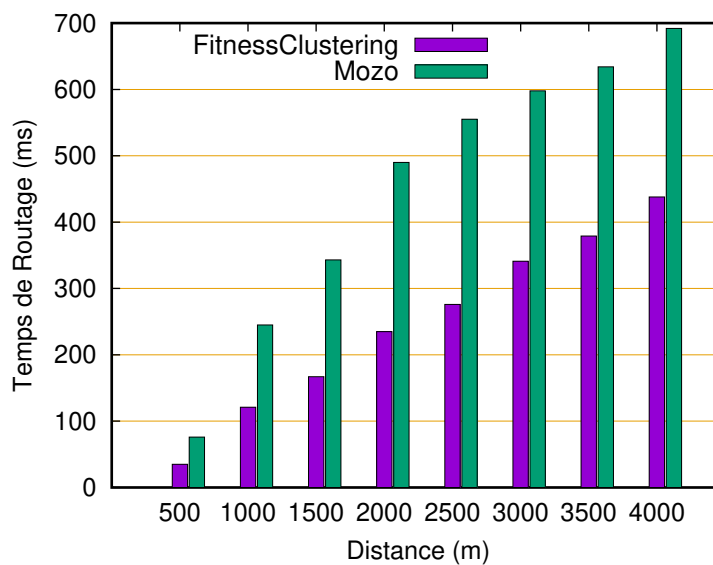


FIGURE 4.11 : Temps normalisé de routage.

Dans la phase de routage MoZo, l'algorithme Dijkstra est utilisé pour la découverte des routes [Lin et al., 2017], tandis que dans notre approche, la phase de routage est basée sur l'algorithme RTAA\* [Koenig and Likhachev, 2006]. Cet algorithme permet d'exploiter les arbres précédemment construits dans les recherches suivantes, ce qui permet de réduire le temps de routage. Cette heuristique est très utilisée dans les jeux temps réel [Koenig and Likhachev, 2006]. Les résultats présentés ont été obtenus avec les valeurs  $a = 0,5$  et  $b = 0,5$ . D'autres valeurs peuvent être testées dans les futurs travaux.

Le nombre de nœuds orphelins est très élevé pour MoZo et VWCA dans un réseau très dense (cf. Figure 4.12). Cela est dû au processus *AATR* de l'algorithme VWCA [Daeinabi et al., 2011], qui est plus adapté au type de trafic épars. MoZo est plus performant pour maintenir les zones mobiles construites et *CLV - Tree* dans un trafic peu dense [Lin et al., 2017]. La densité n'influence que très légèrement les algorithmes *FitnessClustering* et APROVE (cf. Figure 4.12) car ce paramètre est indirectement pris en compte lors du processus de formation des clusters.

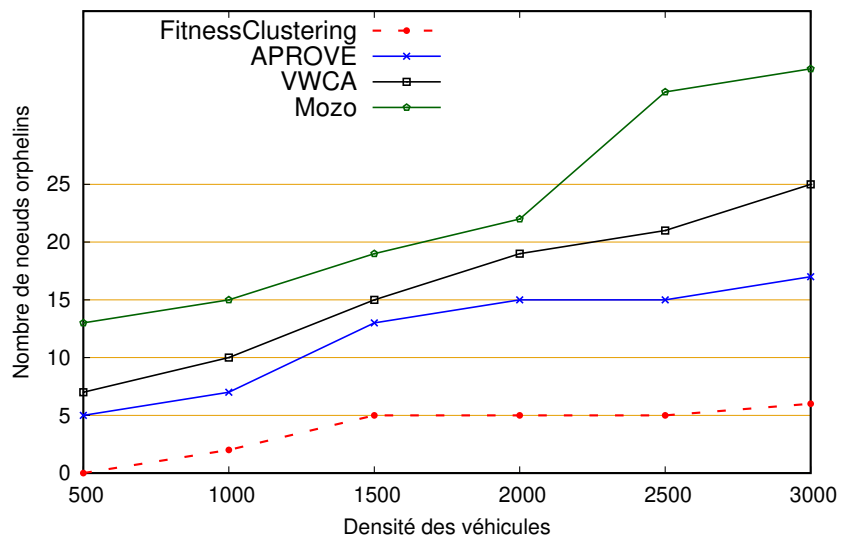


FIGURE 4.12 : Nombre moyen de nœuds orphelins par rapport à la densité.

Comme le montre la figure 4.13, MoZo et *FitnessClustering* présentent de meilleurs résultats que les algorithmes APROVE et VWCA. Cela s'explique par les temps réduits des phases de formation de clusters de ces approches et la performance des processus de maintenance associés. Alors que la phase de formation des clusters pour APROVE et VWCA requiert un temps plus significatif pour former les clusters. Pendant ce temps, la topologie du réseau a changé à cause de la mobilité des nœuds.

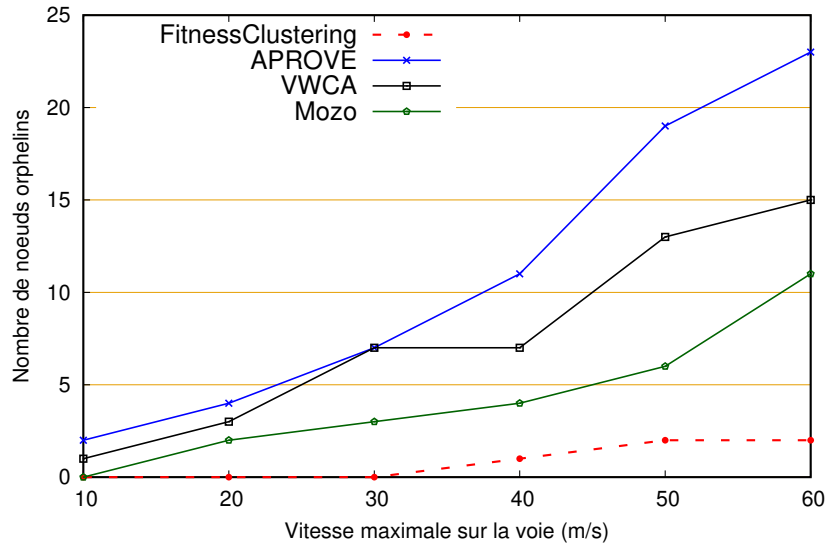


FIGURE 4.13 : Nombre moyen de nœuds orphelins par rapport à la mobilité.

La fréquence de déconnexion des membres ( $MN$ ) de leurs clusters illustre le taux de pertes de connexion entre les membres et leur  $CH$ . Comme le montre la figure 4.14, les nœuds  $MN$  dans MoZo et VWCA ont tendance à perdre leurs connexions fréquemment avec leurs  $CH$  dans un réseau peu mobile.

*FitnessClustering* procure une connexion plus stable des nœuds  $MN$  avec leurs  $CH$ . Ce dernier est moins impacté par la mobilité du réseau, en raison du paramètre durée de vie des liens ( $LV$ ) utilisé dans la fonction *Fitness*. Les nœuds  $MN$  de l'algorithme APROVE sont plus susceptibles de perdre leurs connexions avec le  $CH$  dans un réseau très mobile, en raison de la fonction de similarité utilisée [Hassanabadi et al., 2014].

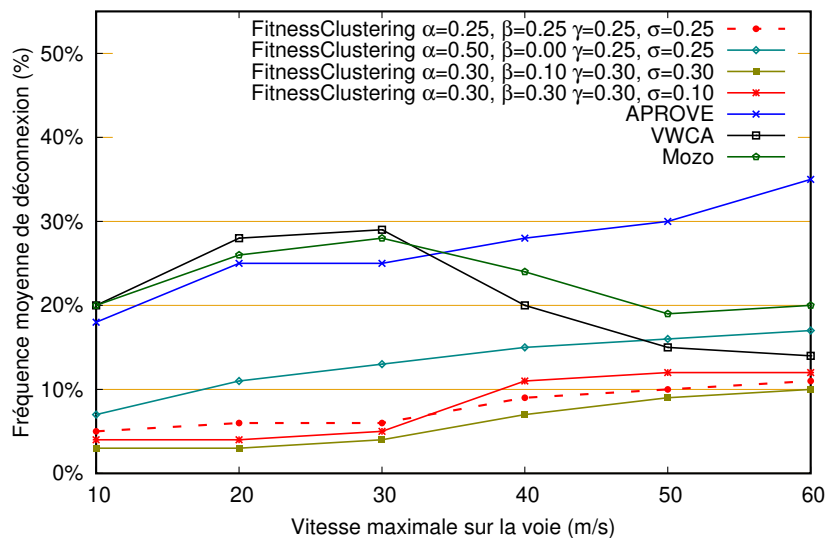


FIGURE 4.14 : Fréquence moyenne de déconnexion des membres de clusters.

Tandis que pour l'approche VWCA, les nœuds rétablissent rapidement leur lien de communication avec leur *CH* en augmentant le rayon de communication [Daeinabi et al., 2011]. Dans l'algorithme MoZo, les liens de communication sont rétablis rapidement en exécutant le processus de maintenance de la zone mobile [Lin et al., 2017].

La congestion du réseau est l'un des défis majeurs pour les réseaux mobiles. Dans la figure 4.15, nous pouvons constater que le nombre de paquets échangés dans notre approche est inférieur à celui des trois autres approches. L'algorithme APROVE possède la plus grande surcharge de communication car les nœuds doivent diffuser des messages "Hello" toutes les secondes et donc entretenir les clusters fréquemment.

MoZo et VWCA sont plus fiables que l'algorithme APROVE, car pour ces méthodes, l'intervalle de dissémination des messages "Hello" est plus grand (2s). Dans notre approche, les messages "Hello" sont échangés toutes les 3 secondes. Le message d'origine est optimisé. Les clusters produits sont relativement petits et stables, et la zone de couverture est limitée, de sorte que les processus de maintenance des clusters et des routes ne sont pas fréquemment exécutés. De plus, le RTAA\* est très efficace pour maintenir les routes en temps réel ce qui

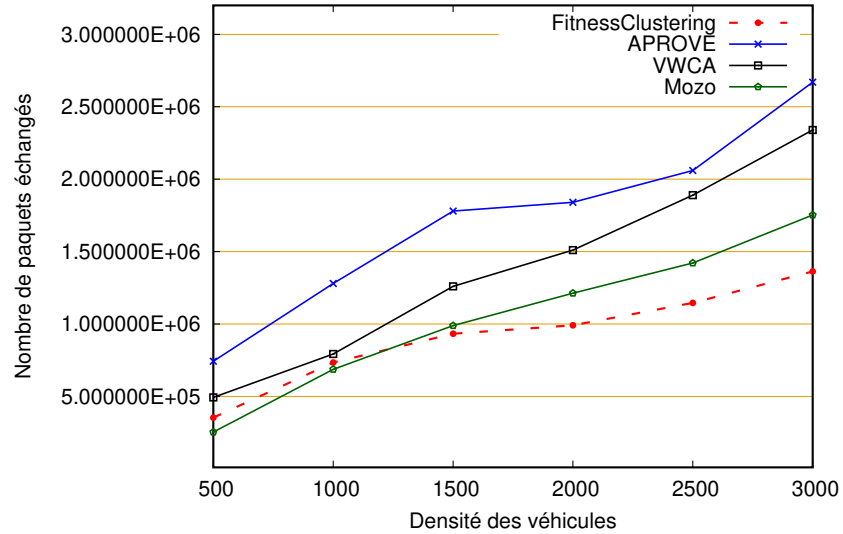


FIGURE 4.15 : Surcharge moyenne du réseau (Overhead).

encombre moins le réseau.

Le débit moyen de livraison est utilisé pour évaluer la fiabilité du protocole de routage pour transférer des données correctement. Pour les différentes distances de couverture (cf. Figure 4.16), on observe que le taux de livraison pour les combinaisons de facteurs ( $\alpha = 0.30$ ,  $\beta = 0.10$ ,  $\gamma = 0.30$  et  $\sigma = 0,30$ ) et ( $\alpha = 0,25$ ,  $\beta = 0,25$ ,  $\gamma = 0,25$  et  $\sigma = 0,25$ ) de *FitnessClustering*, et MoZo sont plus élevés et ont tendance à être stables (cf. Figure 4.16), car les routes sont établies et maintenues en temps réel.

VWCA surpasse les autres algorithmes en terme de taux de livraison en raison de l'augmentation des rayons de transmission des nœuds. Dans APPROVE, les liens entre les clusters sont souvent perdus, le processus de maintenance doit être exécuté plus souvent, ce qui prend plus de temps que les algorithmes précédents, et conduit à des échecs de livraison des messages.

Les résultats des taux de livraison moyens pour *FitnessClustering* pour les facteurs ( $\alpha = 0.50$ ,  $\beta = 0.00$ ,  $\gamma = 0.25$  et  $\sigma = 0.25$ ) et ( $\alpha = 0.30$ ,  $\beta = 0.30$ ,  $\gamma = 0.30$  et  $\sigma = 0.10$ ),

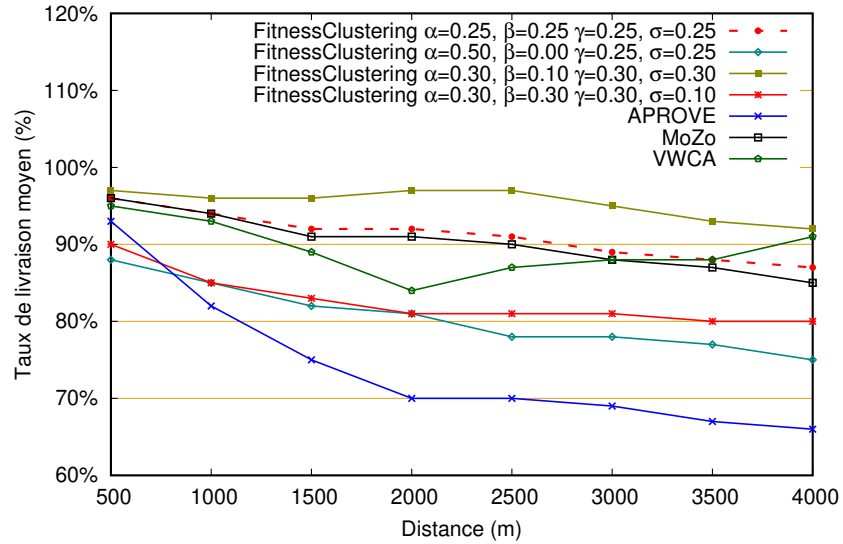


FIGURE 4.16 : Taux de livraison moyen des messages.

présentent une fiabilité moyenne. Cela confirme que la maintenance des routes est moins exécutée pour les clusters produits, avec des poids nuls pour  $CD$  ou  $LV$  dans la fonction  $Fitness$ .

Différents messages d'urgence ont été générés avec différentes durées de vie pendant la simulation. La figure 4.17 montre les résultats obtenus. Nous constatons que pour l'approche  $FitnessClustering$  le taux de livraison des messages est élevé même lorsque l'événement détecté est très volatil. Ceci est garanti par le processus d'optimisation des messages proposé pour notre approche. Il permet de réduire le nombre de paquets échangés, et d'améliorer ainsi la consommation de la bande passante.

MoZo permet aussi de diffuser rapidement les messages d'urgence ; ceci est assuré par la phase de maintenance qui est moins coûteuse en terme de temps [Lin et al., 2017] pour la construction des zones mobiles. En revanche, VWCA et APROVE ne sont pas des approches sensibles aux délais (Delay-sensitive), comme le montre la figure 4.17. Chaque phase de ces deux algorithmes requiert plus d'itérations pour converger.

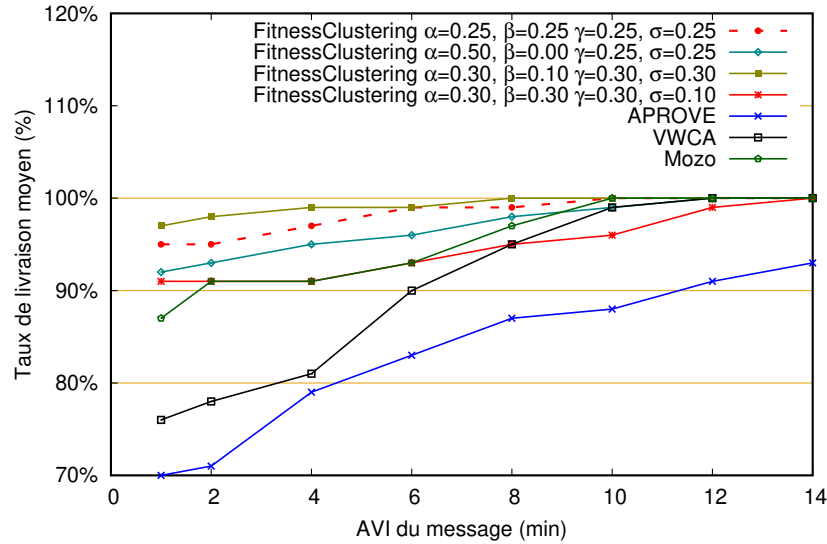


FIGURE 4.17 : Taux moyen de livraison versus l'AVI du message d'urgence généré.

## 4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évalué l'approche *FitnessClustering* en utilisant la simulation. Cette approche est basée sur une fonction multi-objectifs qui combine plusieurs paramètres. Cette combinaison permet une efficacité élevée dans différents types de trafics dans les réseaux véhiculaires. L'approche proposée et les algorithmes de clustering à comparer sont évalués en utilisant le simulateur VanetSim. Ce dernier permet une simulation en temps réel en utilisant des scénarios de trafic routier réels. Plusieurs métriques sont évaluées, pour déterminer le meilleur compromis entre ces approches. Différentes valeurs peuvent être affectées aux facteurs de la fonction *Fitness*, parmi lesquelles on a évalué 33 combinaisons possibles. Les 4 meilleures combinaisons ont été comparées avec les algorithmes VWCA, APROVE et MoZo. L'algorithme *FitnessClustering* produit des clusters de différentes tailles, dont certains sont à deux sauts, ce qui a réduit le nombre de clusters formés. L'utilisation de plusieurs paramètres qui ont une influence majeure et directe sur les performances de clustering, permet d'obtenir des clusters stables qui regroupent 4 rôles essentiels pour les nœuds (*CH*, *SCH*, *MN*, *SM*). Ces rôles sont moins influencés par la mobilité des nœuds. Les membres qui perdent connexions avec leurs *CH* sont rapidement maintenus pendant la phase de main-

tenance, qui est basée sur une fonction de *Fitness* relative (*RFitness*). En plus des performances de clustering, le routage est également une phase importante pour la dissémination de données entre véhicules. Pour l'approche *FitnessClustering*, nous avons utilisé un protocole existant, très utilisé dans les systèmes en temps réel. Ce dernier améliore l'efficacité de l'approche proposée.

**Troisième partie**

**Conclusion générale**

# Conclusion générale

---

## 5 Conclusion

Cette thèse aborde les problématiques de dissémination des informations dans les réseaux véhiculaires. Les approches qui s'inscrivent dans cet axe de recherche sont multiples, et varient selon les scénarios étudiés et les technologies de communication utilisées. Dans cette thèse, nous nous sommes focalisés sur l'aspect temps réel des communications inter-véhiculaires. En effet, les applications de transport intelligent requièrent souvent un canal de communication fiable prenant en charge les transmissions de messages critiques, tout en respectant les contraintes temporelles. L'aspect temps réel est considéré comme étant l'un des critères les plus importants pour mesurer la qualité du réseau pour les applications de sécurité active.

Dans cette perspective, un nouveau CBRP pour les réseaux véhiculaires basé sur le mode de communication V2V est exploré dans la partie contribution. L'approche proposée est basée sur un mécanisme de clustering. Ce dernier permet aux véhicules de se regrouper en utilisant une fonction objective appelée *Fitness* qui combine de nombreux paramètres. Étant donné que l'approche est basée sur le degré de connectivité (CD), elle peut être classée en tant que protocole de clustering basé sur le voisinage.

La mobilité relative est un paramètre important de la fonction *Fitness*. Cela conduit à catégoriser cet algorithme en tant que protocole de Clustering basé sur la mobilité. En plus de ces paramètres, la période de transmission (TRP) et la durée de vie des liens (LV) permettent de prédire l'état futur du réseau, ce qui permet de classer l'approche comme étant une méthode de classification prédictive.

L'algorithme *FitnessClustering* peut également être vu comme étant un algorithme basé sur le poids, car il exploite de nombreux facteurs ou poids dans la fonction *Fitness*. Ces classifications permettent de considérer cette approche de classification comme étant multi-objectifs ou hybride.

La combinaison de nombreux paramètres permet une efficacité élevée dans différents types de trafics, y compris les scénarios de trafics routiers denses et fortement mobiles. En plus des performances de clustering, le routage est également une phase importante pour l'échange de données entre véhicules. Dans notre approche, nous avons utilisé un protocole existant, très utilisé dans les algorithmes temps réel. Ce dernier améliore l'efficacité de l'approche proposée.

## 6 Perspectives de recherche

Comme perspectives de recherche, l'intégration de cette approche dans un environnement Cloud peut révéler plusieurs avantages. Ceci permettrait d'évaluer l'impact de collaboration des réseaux véhiculaires avec les réseaux Clouds pour des scénarios épars ou très mobile, afin de diffuser des messages d'alerte pour signaler un état d'urgence aux conducteurs dans le CCV (Vehicular Cloud Computing). Nous envisageons également d'étudier l'impact de cette approche pour désigner d'autres supports de stockage temporaire au niveau mobile de données lorsque la taille de la base de données des RSU est limitée.

Les travaux futurs seront principalement axés la gestion et le stockage de l'information pour un réseau véhiculaire très dense, en faisant appel à des techniques de gestion des bases de données. Une densité importante de véhicules signifie qu'une quantité importante de messages et d'informations sera générée, stockée et partagée. Ceci signifie que ces données doivent être

gérées et organisées de manière efficace tout en tenant compte de leurs temps de validité et du champs de dissémination approprié.

L'exploitation de données provenant d'autres réseaux sans fil à proximité, comme par exemple les réseaux de capteurs, présente un nouveau domaine d'applications et de services aux utilisateurs. Des solutions multiples peuvent être envisageables pour des scénarios où la perte de communication avec des bornes mobiles est fréquente.

Des solutions inspirées des réseaux centrés sur l'information (ICN ou Information Centric Networking) peuvent être envisagées pour répondre aux besoins urgents de communication (par exemple, mobilité des périphériques, évolutivité du réseau, accès à l'information et production de contenu en mode distribué). Le réseau ICN s'est avéré être un paradigme prometteur pour différents scénarios de réseaux véhiculaires. Plusieurs propositions préliminaires ont été étudiées pour une instance ICN connue sous le nom NDN (Named-Data Networking) [Khelifi et al., 2019]. Ces propositions sont basées sur un nouveau modèle de communication réseau dans lequel le paradigme traditionnel centré sur l'hôte a été remplacé par un nouveau modèle centré sur l'information.

Il est important d'assurer une gestion efficace de la mobilité dans les réseaux véhiculaires afin de conserver une vue topologique globale cohérente et précise sur le réseau, ceci permet de faciliter diverses fonctionnalités de réseau (par exemple le routage, la gestion du trafic, les services de sécurité et la virtualisation du réseau). Un moyen de minimiser les problèmes de communication induits par la mobilité est de développer des modèles de prévision de mobilité efficaces et précis basés sur les algorithmes d'apprentissage automatique (par exemple les réseaux de neurones).

# Bibliographie

- Adebiaye, R., 2017. Analysis on Mitigation of Intelli-drive Communication Congestion : Broadcasted Signal Phase in Vehicle-to-Vehicle (V2V) Safety Features Using DSRC IEEE 802.11 p Standard. American Journal of Computing Research Repository 5 (1), 1–13.
- Aguado, M., Matias, J., Jacob, E., Berbineau, M., 2008. The WiMAX ASN network in the V2I scenario. In : Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th. IEEE, pp. 1–5.
- Ahmad, I., Noor, R. M., Zaba, M. R., Qureshi, M. A., Imran, M., Shoaib, M., 2019. A Cooperative Heterogeneous Vehicular Clustering Mechanism for Road Traffic Management. International Journal of Parallel Programming, 1–20.
- Ahmed-Zaid, F., Bai, F., Bai, S., Basnayake, C., Bellur, B., Brovold, S., Brown, G., Caminiti, L., Cunningham, D., Elzein, H., et al., 2011. Vehicle safety communications–applications (VSC-a) final report. Tech. rep.
- Amoozadeh, M., Deng, H., Chuah, C.-N., Zhang, H. M., Ghosal, D., 2015. Platoon management with cooperative adaptive cruise control enabled by VANET. Vehicular Communications 2 (2), 110–123.
- Andreone, L., Visintainer, F., Wanielik, G., 2007. Vulnerable Road Users thoroughly addressed in accident prevention : the WATCH-OVER European project. In : 14th world congress on intelligent transport systems.

- Andrews, J. G., Ghosh, A., Muhamed, R., 2007. *Fundamentals of WiMAX : understanding broadband wireless networking*. Pearson Education.
- Ansari, K., Naghavi, H. S., Tian, Y.-C., Feng, Y., 2017. Requirements and Complexity Analysis of Cross-Layer Design Optimization for Adaptive Inter-vehicle DSRC. In : *International Conference on Mobile, Secure, and Programmable Networking*. Springer, pp. 122–137.
- Anupama, M., Sathya-narayana, B., 2011. Survey of Cluster Based Routing Protocols in Mobile Ad hoc Networks. *International Journal of Computer Theory and Engineering* 3 (6), 806–815.
- Arora, A., Rakesh, N., Mishra, K. K., 2018. Analysis of Safety Applications in VANET for LTE Based Network. In : *Networking Communication and Data Knowledge Engineering*. Springer, pp. 141–154.
- Arshad, M. R., Mehmood, S., Afsar, S., Zia, M. A., Farooq, U., 2012. An Evaluation study of WiMAX and WiFi on Vehicular Ad-Hoc Networks (VANETs). *International Journal of Scientific & Engineering Research* 3 (12), 1–7.
- Ayoob, A. A., Su, G., Wang, D., Mohammed, M. N., Hammood, O. A., 2017. Hybrid LTE-VANETs based optimal radio access selection. In : *International Conference of Reliable Information and Communication Technology*. Springer, pp. 189–200.
- Baldessari, R., Bödecker, B., Deegener, M., Festag, A., Franz, W., Kellum, C. C., Kosch, T., Kovacs, A., Lenardi, M., Menig, C., et al., 2007. *Car-2-car communication consortium-manifesto*.
- Bali, R. S., Kumar, N., Rodrigues, J. J., 2014. Clustering in vehicular Ad-Hoc networks : Taxonomy, challenges and solutions. *Vehicular Communications* 2014, 134–152.
- Barr, R., Haas, Z. J., 2004. *An efficient, unifying approach to simulation using virtual machines*. Citeseer.
- Bellaouar, S., Guerroumi, M., Derhab, A., Moussaoui, S., 2018. Towards Heterogeneous Architectures of Hybrid Vehicular Sensor Networks for Smart Cities. In : *Smart Cities*. Springer, pp. 51–70.

- Benkerdagh, S., Duvallet, C., 2019. Cluster-based emergency message dissemination strategy for VANET using V2V communication. *International Journal of Communication Systems*, e3897.
- Benkirane, S., Mostafa, S., Hasnaoui, M. L., Beni-Hssane, A., 2015. A new comparative study of Ad-Hoc routing protocol AODV and DSR in VANET environment using simulation tools. In : 2015 15th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA). IEEE, pp. 458–461.
- Bhakthavathsalam, R., Nayak, S., 2011. Operational inferences on VANETs in 802.16 e and 802.11 p with improved performance by Congestion Alert. In : Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2011 IEEE. IEEE, pp. 467–471.
- Bhargav, K. K., Singhal, R., 2013. Zigbee based VANETs for accident rescue missions in 3G WCDMA networks. In : Global Humanitarian Technology Conference : South Asia Satellite (GHTC-SAS), 2013 IEEE. IEEE, pp. 310–313.
- Bhover, S. U., Tugashetti, A., Rashinkar, P., 2017. V2X communication protocol in VANET for co-operative intelligent transportation system. In : Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA), 2017 International Conference on. IEEE, pp. 602–607.
- Boonsongsrikul, A., Kocijancic, S., Suppharangsarn, S., 2013. Effective energy consumption on wireless sensor networks : Survey and challenges. In : IEEE, the 36th International Convention on Information & Communication Technology Electronics & Microelectronics (MIPRO). pp. 469–473.
- Bronzi, W., Frank, R., Castignani, G., Engel, T., 2016. Bluetooth low energy performance and robustness analysis for inter-vehicular communications. *Ad-Hoc Networks* 37, 76–86.
- Burmester, M., Magkos, E., Chrissikopoulos, V., 2008. Strengthening Privacy Protection in VANETs. In : Proceedings of IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WIMOB). Avignon, France, pp. 508–513.
- Chakkour, Y., Fernández, H., Peñarrocha, V. M. R., Rubio, L., Reig, J., 2018. Coherence Time and Doppler Spread Analysis of the V2V Channel in Highway and Urban Environments.

- In : 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. IEEE, pp. 373–374.
- Chaqfeh, M., Lakas, A., Jawhar, I., 2014. A survey on data dissemination in vehicular Ad-Hoc networks. *Vehicular Communications* 1 (4), 214–225.
- Chaubey, N. K., 2016. Security analysis of vehicular Ad-Hoc networks (VANETs) : a comprehensive study. *International Journal of Security and Its Applications* 10 (5), 261–274.
- Chekkouri, A. S., Ezzouhairi, A., Pierre, S., 2018. A new integrated VANET-LTE-A architecture for enhanced mobility in small cells HetNet using dynamic gateway and traffic forwarding. *Computer Networks* 140, 15–27.
- Chen, L.-J., Sun, T., Liang, N.-C., 2010. An evaluation study of mobility support in ZigBee networks. *Journal of Signal Processing Systems* 59 (1), 111–122.
- Chen, M.-C., Chen, J.-L., Chang, T.-W., 2011a. Android/OSGi-based vehicular network management system. *Computer Communications* 34 (2), 169–183.
- Chen, W., Cai, S., 2005. Ad-Hoc peer-to-peer network architecture for vehicle safety communications. *IEEE Communications magazine* 43 (4), 100–107.
- Chen, W., Guha, R. K., Kwon, T. J., Lee, J., Hsu, Y.-Y., 2011b. A survey and challenges in routing and data dissemination in Vehicular Ad-Hoc Networks. *Wireless Communications and Mobile Computing* 11 (7), 787–795.
- Chhatani, R., Quazi, M. A., Rawat, P., 2017. A hybrid approach for secure communication over LTE VANET in urban road scenario. In : 2017 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS). IEEE, pp. 993–997.
- Choffnes, D. R., Bustamante, F. E., 2005. An Integrated Mobility and Traffic Model for Vehicular Wireless Networks. In : Proceedings of the 2<sup>nd</sup> ACM international workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET'05). pp. 69–78.
- Choi, J., Jung, S., Kim, Y., Yoo, M., 2009. A Fast and Efficient Handover Authentication Achieving Conditional Privacy in V2I Networks. In : Proceedings of the 9<sup>th</sup> International

- Conference on Smart Spaces and Next Generation Wired/Wireless Networking and Second Conference on Smart Spaces. St. Petersburg, Russia, pp. 291–300.
- Chopade, S., Deshmukh, A., Shete, R., Rathod, S., Student, B., 2017. Light Weight VANET using Multi-Hop Cluster Based WAVE and LTE. *International Journal of Engineering Science* 12048.
- Chundury, R., 2008. Mobile broadband backhaul : Addressing the challenge. *Planning Backhaul Networks, Ericsson Review* (3), 4–9.
- Codeca, L., Frank, R., Faye, S., Engel, T., 2017. Luxembourg sumo traffic (LUST) scenario : Traffic demand evaluation. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 9 (2), 52–63.
- Coma, R., 2003. Vers une architecture multi-agents pour du clustering dynamique d'une population d'agents. In : *MAJECSTIC'2003*. pp. 1–19.
- Committee, I. . L. S., et al., 2009. IEEE Standard for Information technology- Telecommunication and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements Part11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment1 : Radio Resource Measurement of Wireless LANs. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11n-2009>.
- Cooper, C., Franklin, D., Ros, M., Safaei, F., Abolhasan, M., 2017. A comparative survey of VANET clustering techniques. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 19 (1), 657–681.
- Cunha, F., Villas, L., Boukerche, A., Maia, G., Viana, A., Mini, R. A., Loureiro, A. A., 2016. Data communication in VANETs : Protocols, applications and challenges. *Ad-Hoc Networks* 44, 90–103.
- Da Cunha, F. D., Boukerche, A., Villas, L., Viana, A. C., Loureiro, A. A., 2014. Data Communication in VANETs : A Survey, Challenges and Applications. Ph.D. thesis, INRIA Saclay.

- Daeinabi, A., Rahbar, A. G. P., Khademzadeh, A., 2011. VWCA : An efficient clustering algorithm in vehicular Ad-Hoc networks. *Journal of Network and Computer Applications* 34, 207–222.
- David, J., David, M., Josh, B., 2001. DSR : The Dynamic Source Routing protocol for multihop wireless Ad-Hoc networks. In : *Ad Hoc Networking*. pp. 139–172.
- de Almeida Oliveira, T., Godoy, E. P., 2016. Zigbee wireless dynamic sensor networks : feasibility analysis and implementation guide. *IEEE Sensors Journal* 16 (11), 4614–4621.
- Devarajan, V., Gunasundari, R., Karthik, T., Rajasekaran, V., 2013. Integration of VANET-Wi MAX Networks. In : *IEEE International Conference on Advanced Research in Engineering and Technology, IEEE ICARET*. IEEE, pp. 695–700.
- Dimitrakopoulos, G., 2011. Intelligent transportation systems based on internet-connected vehicles : Fundamental research areas and challenges. In : *IEEE, the 11th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*. IEEE, pp. 145–151.
- Dinesh, D., Deshmukh, M., 2014. Challenges in vehicle Ad-Hoc network (VANET). *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences* 2 (7), 76–88.
- Dong, W., Lin, F., Zhang, H., Yin, Y., 2017. A cluster-based recursive broadcast routing algorithm to propagate emergency messages in city VANETs. In : *IEEE, The 9th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*. pp. 187–190.
- Dorge, P. D., Dorle, S. S., Chakole, M. B., Thote, D. K., 2012. Improvement of QoS in VANET with different mobility patterns. In : *Radar, Communication and Computing (ICRCC), 2012 International Conference on*. IEEE, pp. 206–209.
- Drishya, S., Vijayakumar, V., 2019. Modified Energy-Efficient Stable Clustering Algorithm for Mobile Ad-Hoc Networks (MANET). In : *Recent Developments in Machine Learning and Data Analytics*. Springer, pp. 455–465.
- Dutta, R., Thalore, R., 2017. A Review of Various Routing Protocols in VANET. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science* 4 (4).

- Elbery, A., Rakha, H., ElNainay, M. Y., Hoque, M. A., 2015. VNetIntSim-An Integrated Simulation Platform to Model Transportation and Communication Networks. In : VEHITS. pp. 133–143.
- Eloranta, P., 2013. Carlink-WiSafeCar-CoMoSeF—From technology tests and proof of concept towards deployment. In : 2013 IEEE 9th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP). IEEE, pp. 181–187.
- Emara, K., 2016. PREXT : privacy extension for veins VANET simulator. In : 2016 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC). IEEE, pp. 1–2.
- ETSI, T., 2014. 302 637-3, Intelligent Transport Systems (ITS) ; Vehicular Communications ; Basic Set of Application ; Part 3 : Specification of Decentralized Environmental Notification Basic Service. ETSI, Sophia Antipolis Cedex, France.
- Eze, E. C., Zhang, S., Liu, E., 2014. Vehicular Ad-Hoc networks (VANETs) : Current state, challenges, potentials and way forward. In : 2014 20th International Conference on Automation and Computing. IEEE, pp. 176–181.
- Fasbender, A., Gerdes, M., Smets, S., 2012. Cellular Networking Technologies in ITS Solutions : Opportunities and Challenges. In : Vinel, A., Mehmood, R., Berbineau, M., Garcia, C., Huang, C.-M., Chilamkurti, N. (Eds.), Communication Technologies for Vehicles. Vol. 7266 of Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, pp. 1–13.
- Ferro, E., Potorti, F., 2005. Bluetooth and Wi-Fi wireless protocols : a survey and a comparison. IEEE Wireless Communications 12 (1), 12–26.
- Festag, A., 2014. Cooperative intelligent transport systems standards in Europe. IEEE communications magazine 52 (12), 166–172.
- Festag, A., 2015. Standards for vehicular communication—from IEEE 802.11 p to 5G. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik 132 (7), 409–416.
- Festag, A., Fußler, H., Hartenstein, H., Sarma, A., Schmitz, R., 2004. Fleetnet : Bringing Car-to-Car communication into the real world. In : Proceeding of 11<sup>th</sup> World Congress on ITS. Nagoya, Japan, pp. 1–8.

- Festag, A., Noecker, G., Strassberger, M., Lübke, A., Bochow, B., Torrent-Moreno, M., Schnauffer, S., Eigner, R., Catrinescu, C., Kunisch, J., 2008. 'NoW-network on wheels' : Project objectives, technology and achievements.
- Feukeu, E., Zuva, T., 2018. Dynamic Broadcast Storm Mitigation Approach for VANETs. *Future Generation Computer Systems* 78, 180–187.
- Fiore, M., Harri, J., Filali, F., Bonnet, C., 2007. Vehicular Mobility Simulation for VANETs. In : *Proceeding of SCS/IEEE Annual Simulation Symposium*. Norfolk, VA, USA, pp. 301–309.
- Fontes, R. R., Afzal, S., Brito, S. H., Santos, M. A., Rothenberg, C. E., 2015. Mininet-WiFi : Emulating software-defined wireless networks. In : *2015 11th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*. IEEE, pp. 384–389.
- Frank, R., Bronzi, W., Castignani, G., Engel, T., 2014. Bluetooth low energy : An alternative technology for VANET applications. In : *Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS), 2014 11th Annual Conference on*. IEEE, pp. 104–107.
- Fujii, R., Ando, T., Hisazumi, K., Mine, T., Nakanishi, T., Fukuda, A., 2017. Support Environment for Traffic Simulation of ITS Services. In : *Proceedings of the International Conference on Software Engineering Research and Practice (SERP)*. The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer . . . , pp. 98–103.
- Ghosh, A., Wolter, D. R., Andrews, J. G., Chen, R., 2005. Broadband wireless access with WiMax/802.16 : current performance benchmarks and future potential. *IEEE communications magazine* 43 (2), 129–136.
- Goebel, N., Bialon, R., Mauve, M., Graffi, K., 2016. Coupled simulation of mobile cellular networks, road traffic and V2X applications using traces. In : *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, pp. 1–7.
- Goel, S., Imielinski, T., Ozbay, K., 2004. Ascertaining Viability of Wifi based Vehicle-to-Vehicle Network for Traffic Information Dissemination. In : *Proceedings of the 7<sup>th</sup> IEEE In-*

- ternational Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Washington - USA, pp. 1086–1091.
- Goel, S., Imielinski, T., Ozbay, K., Nath, B., 2003. Grassroots : A Scalable and Robust Information Architecture. Tech. rep., Department of Computer Science, Rutgers University.
- González, D., Pérez, J., Milanés, V., Nashashibi, F., 2016. A review of motion planning techniques for automated vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 17 (4), 1135–1145.
- Guchhait, A., Kandar, D., Maji, B., 2017. Design of a Hybrid Technology by Converging WiMAX and DSRC for Intelligent Transportation System. *International Journal of Sensors Wireless Communications and Control* 7 (1), 33–38.
- Gugulothu, V. K., Swain, C. M. K., Das, S., 2017. Throughput performance analysis of an integrated mobile WiMAX—DSRC cellular network with adaptive modulation and coding technique. In : *Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, 2017 2nd IEEE International Conference on. IEEE, pp. 1130–1134.
- Hassanabadi, B., Shea, C., Zhang, L., Valaee, S., 2014. Clustering in vehicular Ad-Hoc networks using affinity propagation. *Ad Hoc Networks* 13, 535–548.
- Holma, H., Toskala, A., 2005. WCDMA for UMTS : Radio access for third generation mobile communications. John Wiley & sons.
- Hu, S.-C., Wang, Y.-C., Huang, C.-Y., Tseng, Y.-C., 2009. A vehicular wireless sensor network for CO2 monitoring. In : *Sensors*, 2009 IEEE. IEEE, pp. 1498–1501.
- Hua, L. C., Anisi, M. H., Yee, L., Alam, M., 2017. Social networking-based cooperation mechanisms in vehicular ad-hoc network—A survey. *Vehicular Communications*.
- Hubaux, J.-P., Capkun, S., Luo, J., 2004. The security and privacy of smart vehicles. *IEEE Security & Privacy* 2 (3), 49–55.
- Hull, B., Bychkovsky, V., Zhang, Y., Chen, K., Goraczko, M., Miu, A., Shih, E., Balakrishnan, H., Madden, S., 2006. CarTel : a distributed mobile sensor computing system. In :

- Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems. ACM, pp. 125–138.
- Ibrahim, S., Kalathil, D., Sanchez, R. O., Varaiya, P., 2018. Estimating Phase Duration for SPaT Messages. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
- IEEE 802.11 Working Group, 2010. IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and information exchange between systems–Local and metropolitan area networks–Specific requirements–Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 6 : Wireless Access in Vehicular Environments. *IEEE Std 802 (11)*.
- Inzillo, V., De Rango, F., 2016. A directional MAC approach extending Omnet++ simulator. In : *Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference*. Society for Computer Simulation International, p. 48.
- Jacquet, P., Muhlethale, P., Clausen, T., Laouiti, A., Qayyum, A., Viennot, L., 2001. Optimized link state routing protocol for Ad-Hoc networks. In : *Proceedings of the Multi Topic Conference, INMIC Technology for the 21<sup>st</sup> Century*. Le Chesnay, France, pp. 62–68.
- Jerbi, M., 2008. Protocoles pour les communications dans les réseaux de véhicules en environnement urbain : Routage et GeoCast basés sur les intersections. Ph.D. thesis, Université d'Evry Val d'Essonne.
- Jesty, P. H., Bossom, R. A., 2011. Using the frame architecture for planning integrated intelligent transport systems. In : *2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems*. IEEE, pp. 370–375.
- Jha, R. K., Kharga, P., 2015. A comparative performance analysis of routing protocols in MANET using NS3 simulator. *International Journal of Computer Network and Information Security* 7 (4), 62–68.
- Jiang, M., 1999. Cluster based routing protocol (CBRP). Draft-IETF-manet-CBRP-spec-01.txt.

- Jiang, W., Li, F., Lin, D., Bertino, E., 2017. No one can track you : randomized authentication in vehicular ad-hoc networks. In : Pervasive Computing and Communications (PerCom), 2017 IEEE International Conference on. IEEE, pp. 197–206.
- Jyrwa, R. S., Kandar, D., Paul, B. S., 2018. An Approach to Convergence Between LTE and DSRC. In : Proceedings of the International Conference on Computing and Communication Systems. Springer, pp. 225–234.
- Karagiannis, G., Altintas, O., Ekici, E., Heijenk, G., Jarupan, B., Lin, K., Weil, T., 2011. Vehicular networking : A survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions. *IEEE communications surveys & tutorials* 13 (4), 584–616.
- Kaur, G., Kang, S. S., 2016. Study of Various Data Dissemination Types and its Protocols-A Review. *International Journal of Advanced Research in Computer Science* 7 (6).
- Kenney, J. B., 2011. Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States. In : Proceedings of the IEEE. Vol. 99. Toyota InfoTechnology Center, Mountain View, CA, USA, pp. 1162–1182.
- Kerrache, C. A., Calafate, C. T., Lagraa, N., Cano, J.-C., Manzoni, P., 2016. Trust-Aware Opportunistic Dissemination Scheme for VANET Safety Applications. In : Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced and Trusted Computing, Scalable Computing and Communications, Cloud and Big Data Computing, Internet of People, and Smart World Congress (UIC/ATC/ScalCom/CBDCCom/IoP/SmartWorld), 2016 Intl IEEE Conferences. IEEE, pp. 153–160.
- Khalik, K. A., Qayyum, A., Pannek, J., 2017. Methodology for Development of Logistics Information and Safety System Using Vehicular Adhoc Networks. In : Dynamics in Logistics. Springer, pp. 185–195.
- Khelifi, H., Luo, S., Nour, B., Moun gla, H., Faheem, Y., Hussain, R., Ksentini, A., 2019. Named data networking in vehicular Ad-Hoc networks : State-of-the-art and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*.

- Khurana, R., Singh, G., Sachdeva, M., 2018. Analysis of Group Mobility and File Mobility Model for Routing Protocols in MANET Using Netsim. *i-Manager's Journal on Information Technology* 7 (2), 1.
- Kim, W. W., 2018. Improved Paired Cluster-Based Routing Protocol in Vehicular Ad-Hoc Networks. *The International Journal of Advanced Smart Convergence* 7 (2), 22–32.
- Kishimoto, K., Yamada, M., Jinno, M., 04 2014. Cooperative inter-infrastructure communication system using 700 MHz band. *SEI TECHNICAL REVIEW*, 19–23.
- Klinger, J., Andrews, B., Cesarano, P. C., Aug. 10 2017. Vehicle, system and methods for determining autopilot parameters in a vehicle. *US Patent App. 15/206,222*.
- Koenig, S., Likhachev, M., 2006. Real-time adaptive A\*. In : *Proceedings of the 5th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. pp. 281–288.
- Ku, I., Lu, Y., Gerla, M., Ongaro, F., Gomes, R. L., Cerqueira, E., 2014. Towards software-defined VANET : Architecture and services. In : *IEEE , the 13th Annual Mediterranean Ad-Hoc Networking Workshop (MED-HOC-NET)*. pp. 103–110.
- Kumar, D., Verma, P., 2015. Routing protocols for MANET, VANET and AANET : a survey. *International Journal of Innovative Technology and Research (IJITR)* 3 (2), 1953–1956.
- Kumar, P., Ruthwik, M., Sree, M. K., Saad, M., Patil, A. P., 2016. Implementation of an Emergency Evacuation System Using Intelligent Routing Using QualNet Simulator. In : *Proceedings of the ACM Symposium on Women in Research 2016*. ACM, pp. 131–138.
- Kumar, V. D., Kandari, D., Paul, B. S., 2018. Uplink Communication Between WiMAX and IEEE 802.11 P Using Sub-channelization. In : *Proceedings of the International Conference on Computing and Communication Systems*. Springer, pp. 245–254.
- Lagana, M., Feiri, M., Sall, M., Lange, M., Tomatis, A., Papadimitratos, P., 2012. Secure communication in vehicular networks-PRESERVE DEMO. In : *IEEE Vehicular Networking Conference, VNC 2012*. IEEE Communications Society, pp. 11–12.

- Lagrange, X., Godlewski, P., Tabbane, S., GSM, R., 2000. Des principes à la norme, Editions Hermes Sciences. Tech. rep., ISBN 2-7462-0153-4.
- Lakas, A., Shaqfa, M., 2011. Geocache : sharing and exchanging road traffic information using peer-to-peer vehicular communication. In : Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd. IEEE, pp. 1–7.
- Lee, C., Jeong, T., 2011. FRCA : A Fuzzy Relevance-Based Cluster Head Selection Algorithm for Wireless Mobile Ad-Hoc Sensor Networks. *Sensors* 11 (5), 5383–5401.
- Lee, C. H., Lim, K. G., Chua, B. L., Chin, R. K. Y., Teo, K. T. K., 2016. Performance evaluation of IEEE 802.11 for vehicular communication. In : IEEE International Conference on Consumer Electronics, ICCE Asia. pp. 1–4.
- Li, X., Peng, M., Cai, J., Yi, C., Zhang, H., 2016. OPNET-based modeling and simulation of mobile Zigbee sensor networks. *Peer-to-Peer Networking and Applications* 9 (2), 414–423.
- Li, X., Song, T., Zhang, Y., Chen, G., Hu, J., 2018. A Hybrid Cooperative Spectrum Sensing Scheme Based on Spatial-Temporal Correlation for CR-VANET. In : 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, pp. 1–6.
- Lim, H., Kim, C., 2000. Multicast Tree Construction and Flooding in Wireless Ad-Hoc Networks. In : Proceedings of the ACM International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM). New York, USA, pp. 61–68.
- Lim, K. G., Lee, C. H., Chin, R. K. Y., Yeo, K. B., Teo, K. T. K., 2016. Simulators for vehicular Ad-Hoc network (VANET) development. In : 2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia). IEEE, pp. 1–4.
- Lin, D., Kang, J., Squicciarini, A., Wu, Y., Gurung, S., Tonguz, O., 2017. MoZo : A Moving Zone Based Routing Protocol Using Pure V2V Communication in VANETs. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 16 (5), 1357–1370.
- Lin, F., Liu, Y., 2017. An integration of WAVE and LTE wireless transmission in vehicle networks for safety and non-safety messages dissemination. In : Computer and Communications (ICCC), 2017 3rd IEEE International Conference on. IEEE, pp. 315–320.

- Liu, B., Jia, D., Wang, J., Lu, K., Wu, L., 2017. Cloud-Assisted Safety Message Dissemination in VANET-Cellular Heterogeneous Wireless Network. *IEEE Systems Journal* 11 (1), 128–139.
- Liu, L., Chen, C., Qiu, T., Zhang, M., Li, S., Zhou, B., 2018. A data dissemination scheme based on clustering and probabilistic broadcasting in VANETs. *Vehicular Communications* 13, 78–88.
- Lochert, C., Mauve, M., Fera, H., Hartenstein, H., 2005. Geographic routing in city scenarios. *ACM SIG MOBILE, Mobile Computing and Communications* 9, 69–72.
- Lyamin, N., Vinel, A., Smely, D., Bellalta, B., 2018. ETSI DCC : Decentralized Congestion Control in C-ITS. *IEEE Communications Magazine* 56 (12), 112–118.
- Lyu, F., Zhu, H., Zhou, H., Qian, L., Xu, W., Li, M., Shen, X., 2018. MoMAC : mobility-aware and collision-avoidance MAC for safety applications in VANETs. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 67 (11), 10590–10602.
- Mai, Y. T., Chen, J. Y., Liu, Y. K., Lee, W. Y., Wu, G. T., Li, M. Y., 2012. Intelligent vehicular warning system for VANET. In : *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 145. Trans Tech Publ, pp. 164–168.
- Mehar, S., Senouci, S. M., Remy, G., 2012. Dissemination protocol for heterogeneous cooperative vehicular networks. In : *2012 IFIP Wireless Days*. IEEE, pp. 1–6.
- Mejri, M. N., Ben-Othman, J., Hamdi, M., 2014. Survey on VANET security challenges and possible cryptographic solutions. *Vehicular Communications* 1 (2), 53–66.
- Mekki, T., Jabri, I., Rachedi, A., Jemaa, M. B., 2017. Proactive and hybrid wireless network access strategy for Vehicle Cloud networks : An evolutionary game approach. In : *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2017 13th International*. IEEE, pp. 1108–1113.
- Mojela, L. S., Booysen, M. J., 2013. On the use of WiMAX and Wi-Fi to provide in-vehicle connectivity and media distribution. In : *Industrial Technology (ICIT), 2013 IEEE International Conference on*. IEEE, pp. 1353–1358.

- Mor, A., 2012. Study of Different Type of Data Dissemination Strategy in VANET. Research Scholar, Deptt. Of Computer Science Applications, Kurukshetra University, Kurukshetra, Haryana, India.
- Mussa, S. A. B., Manaf, M., Ghafoor, K. Z., Doukha, Z., 2015. Simulation tools for Vehicular Ad-Hoc Networks : A comparison study and future perspectives. In : 2015 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM). IEEE, pp. 1–8.
- Nair, R., BenSoh, Chilamkurti, N., Park, J., 2013. Structure-free message aggregation and routing in traffic information system (SMART). In : Journal of Network and Computer Applications 36. pp. 974–980.
- Naveen, K., Karuppanan, K., 2011. VCAR : Scalable and Adaptive Data Dissemination for VANET. In : Advances in Computing and Communications - First International Conference, ACC 2011. pp. 615–623.
- Nayyar, A., Singh, R., 2015. A comprehensive review of simulation tools for wireless sensor networks (WSNs). Journal of Wireless Networking and Communications 5 (1), 19–47.
- Nguyen, V., Pham, C., Oo, T. Z., Tran, N. H., Huh, E.-N., Hong, C. S., 2018. MAC protocols with dynamic interval schemes for VANETs. Vehicular Communications.
- Ota, K., Kumrai, T., Dong, M., Kishigami, J., Guo, M., 2017. Smart infrastructure design for Smart Cities. IT Professional 19 (5), 42–49.
- Özyilmaz, B., Paker, S., 2018. SAE J2735 message suggestion for traffic light-vehicles communication. In : 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). IEEE, pp. 1–4.
- Pareit, D., Lannoo, B., Moerman, I., Demeester, P., 2012. The History of WiMAX : A Complete Survey of the Evolution in Certification and Standardization for IEEE 802.16 and WiMAX. IEEE Communications Surveys and Tutorials 14 (4), 1183–1211.

- Pathak, S., Shrawankar, U., 2009. Secured Communication in Real Time VANET. In : Proceedings of the 2009 Second International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology. Nagpur, pp. 1151–1155.
- Pathan, A.-S. K., 2016. Security of self-organizing networks : MANET, WSN, WMN, VANET. CRC press.
- Perdana, D., Munadi, R., Manurung, R. C., 2017. Performance Evaluation of Gauss-Markov Mobility Model in Hybrid LTE-VANET Networks. *Telkomnika* 15 (2).
- Perkins, C., Royer, E. M., Das, S., 2002. Ad Hoc On-Demand distance Vector (AODV) routing. In : Ad Hoc Networking Working Group of the Internet Engineering Task Force (IETF).
- Perkins, C. E., Bhagwat, P., 1994. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers. In : ACM SIGCOMM computer communication review. Vol. 24. ACM, pp. 234–244.
- Petracca, M., Pagano, P., Pelliccia, R., Ghibaudi, M., Salvadori, C., Nastasi, C., 10 2012. On-Board Unit hardware and software design for Vehicular Ad-hoc NETWORKS. In : Roadside Networks for Vehicular Communications : Architectures, Applications, and Test Fields.
- Phouthone, V., Dong, W., 2015. Simulation based and analysis of routing protocols for vanet using vanetmobisim and NS-2. *Int. J. Comput. Eng. Technol* 6, 32–41.
- Piao, J., McDonald, M., Hounsell, N., 2012. Cooperative vehicle-infrastructure systems for improving driver information services : an analysis of COOPERS test results. *IET Intelligent Transport Systems* 6 (1), 9–17.
- Pigné, Y., Danoy, G., Bouvry, P., 2010. A platform for realistic online vehicular network management. In : 2010 IEEE Globecom Workshops. IEEE, pp. 595–599.
- Pinho, T., Coelho, J., Oliveira, P., Oliveira, B., Marques, A., Rasinmäki, J., Moreira, A., Veiga, G., Boaventura-Cunha, J., 2018. Routing and schedule simulation of a biomass energy supply chain through SimPy simulation package. *Applied Computing and Informatics*.

- Poonia, R. C., Bhargava, D., 2016. A Review of Coupling Simulator for Vehicular Ad-hoc Networks. *International Journal Information Technology and Computer Science* 5, 44–51.
- Pourghebleh, B., Jafari Navimipour, N., 2019. Towards efficient data collection mechanisms in the vehicular Ad-Hoc networks. *International Journal of Communication Systems*, e3893.
- Protzmann, R., Schünemann, B., Radusch, I., 2017. Simulation of convergent networks for intelligent transport systems with VSIMRTI. *Networking Simulation for Intelligent Transportation Systems : High Mobile Wireless Nodes*, 1–28.
- Punjani, M., Dixith, M., Aug. 31 2017. Traffic management system. US Patent App. 15/055,597.
- Purtoosi, R., Taheri, H., Mohammadi, A., Foroozan, F., 2004. A light-weight contention-based clustering algorithm for wireless Ad-Hoc networks. In : *Fourth International Conference on Computer and Information Technology, 2004. CIT'04. The. IEEE*, pp. 627–632.
- Ramesh, R., Kamalavathi, E., 2017. Real-Time Fair Sharing Bandwidth analysis using Energy Efficient Scheduling in VANET. *Software Engineering and Technology* 9 (4), 65–71.
- Ramteke, M. A., Krishna, R., 2012. Realistic simulation for vehicular ad-hoc network using ZigBee technology. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* 1 (10).
- Rehman, O. M. H., Bourdoucen, H., Ould-Khaoua, M., 2013. Efficient Alert Messages Dissemination in VANETs using Single-Hop Distributed Protocols. In : *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*. pp. 1–4.
- Remy, G., Senouci, S.-M., Jan, F., Gourhant, Y., 2011. LTE4V2X : LTE for a centralized VANET organization. In : *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), 2011 IEEE*. IEEE, pp. 1–6.
- Riess, E., Kotzer, I., Tsimhoni, O., Wazir, M., Jul. 26 2018. Selective antenna allocation. US Patent App. 15/413,800.

- Rondinone, M., Maneros, J., Krajzewicz, D., Bauza, R., Cataldi, P., Hrizi, F., Gozalvez, J., Kumar, V., Röckl, M., Lin, L., et al., 2013. iTETRIS : a modular simulation platform for the large scale evaluation of cooperative ITS applications. *Simulation Modelling Practice and Theory* 34, 99–125.
- Salman, O., Morcel, R., Al Zoubi, O., Elhajj, I., Kayssi, A., Chehab, A., 2016. Analysis of topology based routing protocols for VANETs in different environments. In : 2016 IEEE International Multidisciplinary Conference on Engineering Technology (IMCET). IEEE, pp. 27–31.
- Santa, J., Gómez-Skarmeta, A. F., Sánchez-Artigas, M., 2008. Architecture and evaluation of a unified V2V and V2I communication system based on cellular networks. In : *Computer Communications*. Vol. 31. pp. 2850–2861.
- Santamaria, A. F., Tropea, M., Fazio, P., De Rango, F., 2018. Managing Emergency Situations in VANET Through Heterogeneous Technologies Cooperation. *Sensors* 18 (5), 1461.
- Sarakis, L., Orphanoudakis, T., Leligou, H. C., Voliotis, S., Voulkidis, A., 2016. Providing entertainment applications in VANET environments. *IEEE Wireless Communications* 23 (1), 30–37.
- Schoch, E., Kargl, F., Weber, M., Leinmuller, T., 2008. Communication patterns in VANETs. *IEEE Communications Magazine* 46 (11), 119–125.
- Schubert, R., Schlingelhof, M., Cramer, H., Wanielik, G., 2007. Accurate positioning for vehicular safety applications-the safespot approach. In : 2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference-VTC2007-Spring. IEEE, pp. 2506–2510.
- Schulze, M., Mäkinen, T., Irion, J., Flament, M., Kessel, T., 2008. PReVENT-Preventive and Active Safety Applications Integrated Project. PRevent Final Report (IP\_D15).
- Sedjelmaci, A., Didi, F., Abdul Rahuman, A., 2018. An Opportunistic Dissemination Protocol for VANETs. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED COMPUTER SCIENCE AND APPLICATIONS* 9 (5), 80–87.

- Sehgal, R., Nehra, V., Dahiya, P., 2018. Routing Issues and Related Routing Protocols in VANETs : A Review. *IUP Journal of Computer Sciences* 12 (3).
- Seredynski, M., Khadraoui, D., Viti, F., 2015. Signal phase and timing (SPaT) for cooperative public transport priority measures. In : *Proc. 22nd ITS World Congress*.
- Sharma, S., Kaul, A., 2018. A survey on Intrusion Detection Systems and Honeypot based proactive security mechanisms in VANETs and VANET Cloud. *Vehicular Communications*.
- Sheikh, S. M., Ali, H. R., Asif, H. M., Baig, S., Khan, A. A., 2018. Design of NS3 VLC module and performance analysis of Ad-Hoc network under VLC and Wi-Fi layers. *International Journal of Communication Systems* 31 (14), e3764.
- Shree, K. L., Penubaku, L., Nandihal, G., 2016. A novel approach of using security enabled Zigbee in vehicular communication. In : *Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC), 2016 IEEE International Conference on*. IEEE, pp. 1–5.
- Silva, F. A., Boukerche, A., Silva, T. R., Ruiz, L. B., Loureiro, A. A., 2015. A novel macroscopic mobility model for vehicular networks. *Computer Networks* 79, 188–202.
- Singh, S., Negi, S., Verma, S. K., Panar, N., 2018. Comparative Study of Existing Data Scheduling Approaches and Role of Cloud in VANET Environment. *Procedia Computer Science* 125, 925–934.
- Sood, M., Kanwar, S., 2014. Clustering in MANET and VANET : A survey. In : *IEEE, International Conference on Circuits, Systems, Communication and Information Technology Applications (CSCITA)*. pp. 375–380.
- Soua, A., Shagdar, O., Lasgouttes, J.-M., 2018. Toward Efficient Simulation Platform for Platoon Communication in Large Scale C-ITS Scenarios. In : *2018 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*. IEEE, pp. 1–6.
- Souza, E., Nikolaidis, I., Gburzynski, P., 2001. A mobility based metric for clustering in mobile Ad-Hoc networks. In : *2001 International Conference on Distributed Computing Systems Workshop*. pp. 413–418.

- Souza, E., Nikolaidis, I., Gburzynski, P., 2010. A new aggregate local mobility(ALM) clustering algorithm for VANETs. In : IEEE International Conference on Communications ICC. pp. 1–5.
- Ström, E. G., 2011. On medium access and physical layer standards for cooperative intelligent transport systems in Europe. *Proceedings of the IEEE* 99 (7), 1183–1188.
- Sun, Y.-P., Liang, Y.-C., 2018. Autopilot system design and practice of an unmanned ground vehicle. In : 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI). IEEE, pp. 490–493.
- Sutariya, D., Pradhan, S., 2010. Data dissemination techniques in vehicular Ad-Hoc networks. *International Journal of Computer Applications* 8 (10), 35–39.
- Taleb, T., Sakhaee, E., Jamalipour, A., Hashimoto, K., Kato, N., Nemoto, Y., 2007. A Stable Routing Protocol to Support ITS Services in VANET Networks. In : *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Vol. 56. pp. 3337–3347.
- Tarapiah, S., Aziz, K., Atalla, S., 2017. Analysis the performance of vehicles Ad-Hoc network. *Procedia Computer Science* 124, 682–690.
- The European Telecommunications Standards Institute ETSI, 1999. 3rd Generation Partnership Project ; Technical Specification Group Terminals ; Technical Realization of Cell Broadcast Service (CBS). Tech. rep., 3G TS 23.041 version 2.2.0.
- The European Telecommunications Standards Institute ETSI, 2010. ETSI TS 102 637-2 v1.1.1 - Intelligent Transport Systems (ITS) - Vehicular Communications - Basic Set of Applications - Part 2 : Specifications of Cooperative Awareness Basic Service. Draft ETSI TS 20, 448–451.
- The European Telecommunications Standards Institute ETSI, 2010. ETSI TS 102 637-3 v1.1.1 - Intelligent Transport Systems (ITS) - Vehicular Communications - Basic Set of Applications - Part 3 : Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service. European Telecommunications Standards Institute ETSI.

- The European Telecommunications Standards Institute ETSI-TCITS, 2013. Intelligent Transport Systems (ITS); vehicular communications; GeoNetworking; Part 4 : geographical addressing and forwarding for point-to-point and point-to-multipoint communications; Sub-part 2 : Media-dependent functionalities for ITS-G5. ETSI TS 102, 636–4.
- Tomandl, A., Herrmann, D., Fuchs, K.-P., Federrath, H., Scheuer, F., 2014. VANETsim : An open source simulator for security and privacy concepts in VANETs. In : 2014 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS). IEEE, pp. 543–550.
- Tomar, R. S., Sharma, M. S. P., Jha, S., Sharma, B., 2019. Vehicles Connectivity-Based Communication Systems for Road Transportation Safety. In : Soft Computing : Theories and Applications. Springer, pp. 483–492.
- Tonguz, O., Wisitpongphan, N., Bait, F., Mudaliget, P., Sadekart, V., 2007. Broadcasting in VANET. In : Mobile networking for vehicular environments. IEEE, pp. 7–12.
- Tsu-Wei, C., Mario, G., 1998. Global State Routing : A New Routing Scheme for Ad-hoc Wireless Networks. In : Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC). Vol. 1. Atlanta, GA, pp. 171–175.
- Ucar, S., Ergen, S. C., Ozkasap, O., 2016. Multihop-cluster-based IEEE 802.11 p and LTE hybrid architecture for VANET safety message dissemination. IEEE Transactions on Vehicular Technology 65 (4), 2621–2636.
- Ul Amin, R., 2015. Cooperative & cost-effective network selection : a novel approach to support location-dependent & context-aware service migration in VANETs. Ph.D. thesis, University of Glasgow.
- Umer, T., Afzal, M. K., Ishmanov, F., 2018. Performance Analysis of TETRA Technology under Heterogeneous Traffic Flow in VANETs. IEEE Transactions on Smart Processing & Computing 7 (1), 16–21.
- Urquiza-Aguiar, L., Tripp-Barba, C., Muir, Á. R., 2016. Mitigation of packet duplication in VANET unicast protocols. Ad Hoc Networks 52, 63–77.

- Vaughan-Nichols, S. J., 2008. Mobile WiMAX : The next wireless battle ground. *computer* 41 (6).
- Velmurugan, V., Manickam, J. M. L., 2018. A efficient and reliable communication to reduce broadcast storms in VANET protocol. *Cluster Computing* 21, 1–7.
- Wang, C.-X., Cheng, X., Laurenson, D. I., 2009. Vehicle-to-vehicle channel modeling and measurements : recent advances and future challenges. *IEEE Communications Magazine* 47 (11).
- Wang, Z., Liu, L., Zhou, M., Ansari, N., 2008. A position-based clustering technique for Ad-Hoc intervehicle communication. In : *IEEE Transactions on Systems*. pp. 201–208.
- Westhoff, D., Roessler, B., 2010. INTERSAFE-2 : Intersection reconstruction for on-board intersection safety systems. In : *Proceedings of the 2010 IEEE 6th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing*. IEEE, pp. 387–392.
- Whaiduzzaman, M., Sookhak, M., Gani, A., Buyya, R., 2014. A survey on Vehicular Cloud Computing. *Journal of Network and Computer Applications* 40, 325–344.
- Wiedersheim, B., Sall, M., Reinhard, G., 2009. SeVeCom—Security and privacy in Car2Car Ad-Hoc networks. In : *2009 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications,(ITST)*. IEEE, pp. 658–661.
- Wolfson, O., Xu, B., Cho, H. J., 2009. Multimedia traffic information in vehicular networks. In : *Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*. ACM, pp. 480–483.
- Wolfson, O., Xu, B., Yin, H., Cao, H., 2006. Search-and-Discover in Mobile P2P Network Databases. In : *Proceedings of the 26<sup>th</sup> IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'06)*. IEEE Computer Society Washington, DC, USA, pp. 65–74.
- Xeros, A. G., Ξερός, A. G., 2013. Information dissemination in vehicular Ad-Hoc networks. Ph.D. thesis, University of Cyprus, Faculty of Pure and Applied Sciences.

- Xu, C., Lu, R., Wang, H., Zhu, L., Huang, C., 2017. PAVS : a new privacy-preserving data aggregation scheme for vehicle sensing systems. *Sensors* 17 (3), 500.
- Xu, Q., Jiang, D., 2003. Design and analysis of highway safety communication protocol in 5.9 GHz dedicated short range communication spectrum. In : the 57<sup>th</sup> IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, 2003. Vol. 4. pp. 2451–2455.
- Xylomenos, G., Vogkas, V., Thanos, G., 2008. The multimedia broadcast/multicast service. *Wireless Communications and Mobile Computing* 8 (2), 255–265.
- Yang, X., Huang, L., Wang, Y., Du, R., Wang, J., Yang, F., 2012. A prototype of a cooperative vehicle infrastructure system : Proof of concept-case study in Tongji University. Tech. rep.
- Yi, S., Chun, S., Lee, Y., Park, S., Jung, S., 2012. Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS). *Radio Protocols for LTE and LTE-Advanced*, 217–235.
- Yusuf, T. A., Altılar, D., 2017. Impact on Inter-Vehicular Communication Performance on Different Traffic Mobility Model : A Case Study of Ad-Hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol. In : *Proceedings of the International Conference on Computing for Engineering and Sciences*. ACM, pp. 6–12.
- Zaidi, K., Milojevic, M. B., Rakocevic, V., Nallanathan, A., Rajarajan, M., 2016. Host-based intrusion detection for vanets : a statistical approach to rogue node detection. *IEEE transactions on vehicular technology* 65 (8), 6703–6714.
- Zhao, J., Cao, G., 2008. VADD : Vehicle-Assisted Data Delivery in Vehicular Ad Hoc Networks. *IEEE Vehicular Technology* 57, 1910–1922.
- Zhong, T., Xu, B., Wolfson, O., 2008. Disseminating real-time traffic information in Vehicular Ad-Hoc networks. In : *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. pp. 1056–1061.
- Zhu, H., Lin, X., Lu, R., Ho, P.-H., Shen, X., 2008. AEMA : an Aggregated Emergency Message Authentication Scheme for Enhancing the Security of Vehicular Ad-Hoc Networks. In : *IEEE International Conference on Communications (ICC'08)*. IEEE Communication Society, Beijing, China, pp. 1436 – 1440.

Zulkefli, M. A. M., Zheng, J., Sun, Z., Liu, H. X., 2014. Hybrid powertrain optimization with trajectory prediction based on inter-vehicle-communication and vehicle-infrastructure-integration. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies* 45, 41–63.