

Méthodes utilisant des fonctions de croyance pour la gestion des informations imparfaites dans les réseaux de véhicules

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement le 2 décembre 2014
en vue de l'obtention du

Doctorat de l'Université d'Artois

Spécialité : Génie Informatique et Automatique

par

Mira BOU FARAH

Composition du jury :

M.	Bertrand DUCOURTHIAL	Professeur, Université de Technologie de Compiègne	président
Mme.	Véronique CHERFAOUI	Maître de Conférences (HDR), Université de Technologie de Compiègne	rapporteur
M.	Alain LAMBERT	Maître de Conférences (HDR), Université Paris Sud	rapporteur
M.	Gilles GONCALVES	Professeur, Université d'Artois	examineur
M.	Éric LEFÈVRE	Professeur, Université d'Artois	examineur
M.	Arnaud MARTIN	Professeur, Université de Rennes 1	examineur
M.	François DELMOTTE	Professeur, Université d'Artois	directeur
M.	David MERCIER	Maître de Conférences, Université d'Artois	co-encadrant



Thèse préparée au
Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois
Université d'Artois
Faculté des sciences appliquées
Technoparc Futura
62 400 Béthune

Résumé

La popularisation des véhicules a engendré des problèmes de sécurité et d'environnement. Des projets ont été lancés à travers le monde pour améliorer la sécurité sur la route, réduire l'encombrement du trafic et apporter plus de confort aux conducteurs. L'environnement des réseaux de véhicules est complexe et dynamique, les sources sont souvent hétérogènes, de ce fait les informations échangées peuvent souvent être imparfaites. La théorie des fonctions de croyance modélise souplement les connaissances et fournit des outils riches pour gérer les différents types d'imperfection. Elle est utilisée pour représenter l'incertitude, gérer les différentes informations acquises et les fusionner. Nous nous intéressons à la gestion des informations imparfaites échangées entre les véhicules concernant les événements sur la route. Les événements locaux et les événements étendus n'ayant pas les mêmes caractéristiques, les travaux réalisés les distinguent. Dans un environnement sans infrastructure où chaque véhicule a son propre module de fusion, l'objectif est de fournir aux conducteurs la synthèse la plus proche possible de la réalité. Différents modèles fondés sur des fonctions de croyance sont proposés et différentes stratégies sont étudiées : affaiblir ou renforcer vers l'absence de l'événement pour prendre en compte le vieillissement des messages, garder les messages initiaux ou seulement le résultat de la fusion dans la base des véhicules, considérer la mise à jour du monde, prendre en compte l'influence du voisinage pour gérer la spatialité des embouteillages. Les perspectives restent nombreuses, certaines sont développées dans ce manuscrit comme la généralisation des méthodes proposées à tous les événements étendus tels que les brouillards.

Mots-clés : Réseau ad hoc inter-véhicules (VANET), Théorie des fonctions de croyance, Modèle des Croyances Transférables (MCT), Fusion de données, Événements sur la route, Architecture décentralisée.

METHODS USING BELIEF FUNCTIONS TO MANAGE IMPERFECT INFORMATION IN VEHICULAR NETWORKS

Abstract

The popularization of vehicles has created safety and environmental problems. Projects have been launched worldwide to improve road safety, reduce traffic congestion and bring more comfort to drivers. The vehicle network environment is dynamic and complex, sources are often heterogeneous, and therefore the exchanged information may be imperfect. The theory of belief functions offers flexibility in uncertainty modeling and provides rich tools for managing different types of imperfection. It is used to represent uncertainty, manage and fuse the various acquired information. We focus on the management of imperfect information exchanged between vehicles concerning events on the road. The carried work distinguishes local events and spatial events, which do not have the same characteristics. In an environment without infrastructure where each vehicle is a fusion center and creates its own vision, the goal is to provide to each driver the synthesis of the situation on the road as close as possible to the reality. Different models using belief functions are proposed. Different strategies are considered: discount or reinforce towards the absence of the event to take into account messages ageing, keep the original messages or just the fusion result in vehicle database, consider the world update, manage the spatiality of traffic jam events by taking into account neighborhood. Perspectives remain numerous; some are developed in the manuscript as the generalization of proposed methods to all spatial events such as fog blankets.

Keywords : Vehicular Ad-hoc Networks (VANET), Theory of belief functions, Transferable Belief Model (TBM), Data fusion, Events on the road, Decentralized architecture.

Remerciements

*« Tu me consacres du temps,
c'est le plus généreux de tous les cadeaux. »
Annelou Dupuis.*

Tout d'abord, je remercie mon directeur de thèse François Delmotte, mon co-encadrant David Mercier et Éric Lefèvre pour m'avoir proposé un sujet aussi intéressant. C'est à eux que je dois d'avoir mené ce travail à son terme. J'espère avoir de nouveau l'occasion par la suite de travailler à leurs côtés. Je remercie François pour son orientation, Éric pour sa disponibilité et son optimisme. Merci à David pour m'avoir accompagné de très près dans mes travaux, pour nos discussions scientifiques enrichissantes, ses conseils et ses encouragements.

Je tiens à remercier Daniel Joly et Gilles Goncalves d'avoir accepté de m'accueillir au sein du laboratoire LGI2A.

Mes profonds remerciements s'adressent aux membres du jury Véronique Cherfaoui, Alain Lambert, Bertrand Ducourthial et Arnaud Martin pour avoir accepté de prendre de leur temps pour rapporter et examiner ce mémoire. La version finale de ce mémoire a bénéficié de leur lecture très attentive et de leurs remarques précieuses.

Je remercie tous les membres du laboratoire côtoyés pendant cette thèse pour leur accueil très chaleureux.

Enfin, j'adresse ma profonde gratitude et ma reconnaissance à ma famille, mes belles-familles et mes amis, pour leur soutien au cours de ces années. À mon mari et mes enfants, leur présence m'a été nécessaire pour surmonter toutes les difficultés, merci pour leur patience.

Table des matières

Liste des tableaux	9
Liste des figures	12
Introduction générale	16
1 Théorie des fonctions de croyance et réseaux de véhicules	20
1.1 Théorie des fonctions de croyance	21
1.1.1 Partie statique du niveau crédal : représentation des informations . .	22
1.1.2 Partie dynamique du niveau crédal : manipulation des informations .	24
1.1.3 Niveau pignistique : prise de décision	29
1.2 Réseaux ad hoc de véhicules	30
1.2.1 Les catégories d'applications	31
1.2.2 Les caractéristiques et problématiques des VANET	31
1.2.3 Les architectures de communication	35
1.2.4 Les projets de recherche dans les VANET	40
1.3 Fusion de données dans les réseaux ad hoc de véhicules	45
1.3.1 Intérêt de la fusion de données	45
1.3.2 Fondamentaux de la fusion de données	46
1.3.3 Travaux utilisant des fonctions de croyance dans les véhicules intelligents	50
1.4 Conclusions	53
2 Modèles pour gérer les événements locaux	55
2.1 Méthodes proposées	56

2.1.1	Description générale des méthodes	56
2.1.2	Choix des messages gardés dans la base des véhicules	60
2.1.3	Emploi de la mise à jour du monde	67
2.1.4	Vieillessement des messages	69
2.1.5	Différences entre les méthodes proposées et celles connues précédemment	70
2.2	Expérimentations	71
2.2.1	Simulateur	71
2.2.2	Adéquation à la réalité	73
2.2.3	Scénarios	75
2.3	Conclusions	94
3	Modèles pour gérer les événements étendus : le cas des embouteillages	95
3.1	Méthodes proposées	96
3.1.1	Description générale des méthodes	96
3.1.2	Gestion de la dynamique des embouteillages	98
3.1.3	Choix des messages gardés dans la base des véhicules	98
3.1.4	Différences entre les méthodes proposées et celles connues précédemment	103
3.2	Simulations	103
3.2.1	Simulateur	104
3.2.2	Adéquation à la réalité	105
3.2.3	Scénarios	105
3.3	Conclusions	121
4	Améliorations des méthodes proposées et perspectives développées	122
4.1	Résistance des méthodes proposées aux fausses informations	123
4.2	Améliorer le vieillissement des messages informant des événements locaux . .	124
4.3	Méthodes pour gérer d'autres événements étendus : les travaux et les brouillards	125
4.3.1	Rappel des méthodes proposées pour gérer les embouteillages	127
4.3.2	Méthodes pour gérer les travaux	128
4.3.3	Méthodes pour gérer les brouillards	131

4.3.4	Généralisation du mécanisme d'influence	134
4.4	Améliorer le résultat affiché au conducteur des méthodes gérant les embouteillages	135
4.5	Adaptabilité des méthodes proposées au mode centralisé dans les VANET . .	138
4.6	Conclusions	139
	Conclusion et perspectives	140
	Publications	143
	Bibliographie	145
A	Exemple d'implémentation dans des Smartphones	157

Liste des tableaux

1.1	Technologies de communication dans les VANET.	37
2.1	Attributs des messages créés.	57
2.2	Résumé des méthodes proposées pour gérer les événements locaux.	60
2.3	Exemple comparant l'affaiblissement et le renforcement vers l'absence de l'événement (« n'existe pas »).	70
2.4	Scénario n°1 : espérance et écart type de l'adéquation à la réalité de la distribution d'échantillonnage pour chaque méthode testée.	79
2.5	Scénario n°2 (première partie) : espérance et écart type de l'adéquation à la réalité de la distribution d'échantillonnage pour chaque méthode testée.	82
2.6	Scénario n°2 (deuxième partie) : espérance et écart type de l'adéquation à la réalité de la distribution d'échantillonnage pour chaque méthode testée.	87
2.7	Scénario n°3 : espérance et écart type de l'adéquation à la réalité de la distribution d'échantillonnage pour chaque méthode testée.	91
2.8	Scénario n°4 : moyennes de l'adéquation à la réalité.	93
3.1	Résumé des méthodes proposées pour gérer les embouteillages.	97
3.2	Scénario n°1 : moyenne de l'adéquation à la réalité du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.	109
3.3	Scénario n°2 : moyenne de l'adéquation à la réalité du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.	110
3.4	Scénario n°3 : moyenne de l'adéquation à la réalité du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.	112
3.5	Scénario n°4 : moyenne de l'adéquation à la réalité du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.	115

3.6	Scénario n°3 et n°4 : moyenne de l'adéquation à la réalité du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées prenant en compte toutes les briques de la voie de circulation.	115
3.7	Scénario n°5 : moyenne de l'adéquation à la réalité du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.	118
4.1	Scénario testé pour étudier la résistance des méthodes aux fausses informations : moyenne de l'adéquation à la réalité pour chacun des sous-scénarios et chacune des méthodes testées.	124
4.2	Scénario illustrant l'amélioration du vieillissement des messages informant des événements locaux : adéquation à la réalité moyenne de chaque méthode.	127
4.3	Méthodes proposées.	141

Liste des figures

1	Gestion des informations imparfaites concernant les événements sur la route.	18
1.1	Illustration des deux niveaux du Modèle des Croyances Transférables.	21
1.2	Raffinement de cadre de discernement.	26
1.3	Modes de communication dans les VANET.	36
1.4	Projets de recherche dans les VANET.	41
1.5	Illustration des relations entre les différents termes employés pouvant conduire à une confusion avec la fusion de données.	47
1.6	Fusion de données centralisée.	48
1.7	Fusion de données décentralisée.	49
1.8	Illustration de la dispersion des localisations des sources.	51
2.1	Illustration de l'environnement : sans infrastructure, chaque véhicule possède une base de données de messages et son propre module de fusion.	56
2.2	Exemple d'interface de saisie des événements.	58
2.3	Exemple de découpage d'une carte.	59
2.4	Base interne de messages d'un véhicule.	61
2.5	Illustration de l'envoi et du transfert d'un message.	61
2.6	Gestion des messages reçus quand les messages initiaux sont gardés dans la base des véhicules.	62
2.7	Mise à jour d'un message envoyé.	63
2.8	Fusion de données : donner un aperçu de la situation de la route au conducteur.	64
2.9	Synthèse des deux stratégies proposées : garder les messages initiaux dans la base des véhicules ou uniquement le résultat de la fusion pour chaque événement.	67
2.10	Exemple illustrant l'intérêt de la mise à jour du monde.	68

2.11	Exemple de l'affaiblissement d'une information concernant un accident sur la route.	69
2.12	Exemple du renforcement d'une information concernant un accident sur la route.	69
2.13	Exemple d'une carte du simulateur, de la réalité terrain et d'une trajectoire d'un véhicule.	73
2.14	Exemple de plus petites briques communes utilisées pour calculer l'adéquation à la réalité.	74
2.15	Description du scénario n°1 pour un exemple d'accident.	77
2.16	Scénario n°1 : adéquation à la réalité par méthode pour un exemple d'accident.	78
2.17	Scénario n°1 : adéquation à la réalité moyenne.	79
2.18	Description du scénario n°2 pour un exemple d'accident.	81
2.19	Scénario n°2 (première partie) : adéquation à la réalité par méthode pour un exemple d'accident.	82
2.20	Scénario n°2 (première partie) : adéquation à la réalité moyenne.	83
2.21	Scénario n°2 (deuxième partie) : adéquation à la réalité par méthode pour un exemple d'accident.	84
2.22	Scénario n°2 (deuxième partie) : adéquation à la réalité moyenne.	86
2.23	Description du scénario n°3 pour un exemple d'accident.	88
2.24	Scénario n°3 : adéquation à la réalité par méthode pour un exemple d'accident.	89
2.25	Scénario n°3 : adéquation à la réalité moyenne.	90
2.26	Description du scénario n°4 : représentation de la carte.	92
2.27	Description du scénario n°4 : instants d'apparition des trois accidents.	93
3.1	Exemple où la base du véhicule ne connaît qu'une partie de la réalité terrain.	100
3.2	Influences d'une fonction de masse.	102
3.3	Exemple de fusion du résultat des messages reçus et des influences.	103
3.4	Zones sur lesquelles les véhicules sont ralentis à cause des ronds-points.	104
3.5	Description de la réalité terrain des scénarios n°1 et n°2 pour le type d'événement « embouteillage ».	106
3.6	Scénario n°1 : résultat donné au conducteur du véhicule v pour chacune des méthodes testées.	107

3.7	Scénario n°1 : adéquation à la réalité dans le véhicule v du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.	108
3.8	Scénario n°2 : résultat donné au conducteur du véhicule v pour chacune des méthodes testées.	110
3.9	Scénario n°2 : adéquation à la réalité dans le véhicule v du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.	110
3.10	Description de la réalité terrain du scénario n°3 pour le type d'événement « embouteillage ».	111
3.11	Scénario n°3 : résultat donné au conducteur du véhicule v pour chacune des méthodes testées.	112
3.12	Scénario n°3 : adéquation à la réalité dans le véhicule v du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.	113
3.13	Scénario n°4 : résultat donné au conducteur du véhicule v pour chacune des méthodes testées.	114
3.14	Scénario n°4 : adéquation à la réalité dans le véhicule v du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.	114
3.15	Description de la réalité terrain du scénario n°5 pour le type d'événement « embouteillage ».	116
3.16	Scénario n°5 : résultat donné au conducteur du véhicule v pour chacune des méthodes testées.	117
3.17	Scénario n°5 : adéquation à la réalité dans le véhicule v du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.	118
3.18	Description de la réalité terrain du scénario n°6 pour le type d'événement « embouteillage ».	119
3.19	Description du scénario n°6 : création et échange des messages entre les véhicules communicants.	120
3.20	Scénario n°6 : adéquation à la réalité dans le véhicule v du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.	120
4.1	Description du scénario illustrant l'amélioration du vieillissement des messages informant des événements locaux.	125
4.2	Scénario illustrant l'amélioration du vieillissement des messages informant des événements locaux : adéquation à la réalité de chaque méthode.	126
4.3	Influences d'une fonction de masse informant de la présence ou de l'absence de travaux.	128

4.4	Exemple illustrant l'intérêt du mécanisme d'influence proposé pour gérer les travaux sur la route : réalité terrain.	129
4.5	Exemple illustrant l'intérêt du mécanisme d'influence proposé pour gérer les travaux sur la route : base du véhicule suite à la réception de messages confirmant la présence des travaux.	130
4.6	Exemple illustrant l'intérêt du mécanisme d'influence proposé pour gérer les travaux sur la route : base du véhicule suite à la réception de messages niant la présence des travaux après leur disparition.	130
4.7	Description du scénario comparant les deux stratégies proposées pour générer les influences du type d'événement « brouillards ».	132
4.8	Résultat du scénario avec l'emploi de la stratégie de génération d'influence inspirée des travaux de Lang et Muller.	133
4.9	Résultat du scénario avec l'emploi de la stratégie de génération d'influence proposée pour garantir au mieux l'adéquation des influences à la réalité. . . .	134
4.10	Illustration de certains paramètres de la carte pouvant être utilisés pour prédire la résorption des embouteillages.	135
4.11	Exemple illustrant l'amélioration des méthodes proposées pour gérer les embouteillages avec le transfert du trafic.	137
4.12	Fusion de données centralisée.	138
A.1	Application smartphone : création d'un message informant de la présence d'un accident.	158
A.2	Application smartphone : synthèse des événements sur la route donnée au conducteur.	158

Introduction générale

Contexte

De nos jours, les voitures sont de loin le moyen de transport le plus utilisé, leur popularisation a engendré des problèmes de sécurité et d'environnement. Dans le monde, plus d'un million de personnes décèdent par an sur la route et 20 à 50 millions d'autres sont blessées, l'insécurité routière est aujourd'hui la première cause de mortalité des jeunes âgés de 15 à 29 ans [5].

L'amélioration de la sécurité routière est devenue une priorité gouvernementale dans la majorité des pays développés, les projets financés par l'union européenne [28], le département des transports américain [172, 169] et le ministère du transport japonais [16] sont nombreux. En outre, avec l'avancement technologique, les conducteurs sont devenus de plus en plus exigeants et requièrent davantage de services. Les constructeurs automobiles ont ainsi été conduit à miser fortement sur l'innovation dans leur développement afin de proposer des véhicules sûrs, économiques et confortables. D'où le terme « véhicule intelligent » ou « véhicule connecté », qui englobe un ensemble de technologies, comme les caméras et les capteurs, permettant d'assister les conducteurs dans leur conduite et de leur proposer des solutions de sécurité et de confort, comme les radars anticollision, la détection du franchissement de lignes blanches, ou encore l'émission d'un appel d'urgence en cas d'accident.

Plusieurs travaux de recherche ont été menés dans ce cadre. Leurs objectifs sont de réduire le nombre d'événements indésirables comme le nombre d'accidents mortels sur la route, de faciliter la circulation dans les situations difficiles en communiquant des informations utiles aux conducteurs, de réduire l'encombrement du trafic et ses conséquences écologiques, sans oublier les applications de confort qui sont très attendues pour les conducteurs.

Nos travaux se situent dans le cadre du projet PLAiMOB (Plate-forme de simulation dédiée aux services de mobilité) du contrat de projets état-région CISIT (*International Campus on Safety and Intermodality in Transportation*) [33] qui a duré de 2007 à 2013, dont les objectifs sont de disposer de véhicules intelligents, fiables et propres, et de développer les recherches afin de les mener à l'industrialisation. Un des axes stratégiques de CISIT est la « mobilité intelligente, sûre et sécurité », dans lequel nos travaux s'inscrivent. Il est scindé en deux parties : la première est intitulée « sécurité et intégration des systèmes », son

objectif est d'établir une approche d'ingénierie des exigences de sécurité et de développer de nouveaux modèles pour la sécurité des réseaux de transports, afin de prendre en considération l'interaction entre les différents acteurs du système ; la seconde partie concerne les « infrastructures et véhicules intelligents », elle vise à proposer de nouveaux systèmes fiables et sûrs de télécommunication, de localisation et de surveillance qui peuvent être appliqués en temps réel et dans des environnements hétérogènes de transport.

Problématiques et contributions

Dans la communication inter-véhicules, les informations échangées peuvent souvent être imparfaites, du fait de la nature hétérogène des sources et de l'environnement complexe et dynamique. Notons également que la gestion du temps réel dans les applications liées à la sécurité routière demeure essentielle.

Différents types d'informations imparfaites sont définis dans la littérature [55] : l'imprécision qui est relative au contenu de l'information, l'incertitude qui concerne la réalité de l'information, l'inconsistance qui caractérise le conflit, l'incomplétude mesurant l'absence d'une partie de l'information et l'ambiguïté caractérisant les différentes interprétations possibles. Ci-dessous quelques exemples illustrant l'utilité de la prise en compte de l'imperfection dans les réseaux de véhicules.

- Imprécision : certaines informations peuvent être imprécises telles que « il y a des embouteillages », qui peut être traduite par un état du trafic plus ou moins congestionné.
- Incertitude : une information donnée par un conducteur ou par des capteurs des véhicules intelligents peut être incertaine. Par exemple un conducteur peut informer qu'un accident est présent sur la route avec une certaine confiance relative à cette information.
- Inconsistance : une situation sur la route peut être interprétée différemment selon la source, par exemple la situation météorologique peut être jugée pluvieuse par une source et nuageuse par une autre.
- Incomplétude : dans la communication inter-véhicules, les informations échangées peuvent parfois être très riches. Un message peut donc être reçu incomplet et suivi éventuellement de sa deuxième partie. Notons par exemple le cas dans des applications nécessitant un transfert de données volumineuses. Un autre exemple conduisant à la réception de messages incomplets dans ces communications est la perte de paquets.
- Ambiguïté : certaines informations en provenance de caméras par exemple peuvent être bruitées et interprétées de différentes façons. Dans ce cas la fusion d'informations est utilisée pour résoudre certaines ambiguïtés.

La théorie des fonctions de croyance [44, 146] modélise souplement les connaissances et fournit des outils riches permettant de gérer les différents types d'imperfection et de fusionner ces connaissances. La décision se fait en transformant les résultats obtenus de la fusion en

mesure de probabilité. Pour ces raisons, cette théorie est adaptée aux problématiques de l'environnement des réseaux de véhicules. Elle est choisie dans les travaux réalisés dans cette thèse pour représenter les informations, les fusionner et prendre les décisions.

Cet environnement étant très dynamique et très dense dans certains milieux comme celui urbain, les véhicules peuvent recevoir une grande quantité d'informations de la part de sources hétérogènes, qui peuvent être redondantes, contradictoires ou complémentaires.

Nous nous intéressons à la gestion des informations imparfaites échangées entre les véhicules concernant les événements sur la route comme l'illustre la figure 1. L'environnement est sans infrastructure de communication. Chaque véhicule gère localement la fusion de données et communique les connaissances acquises à ses voisins.

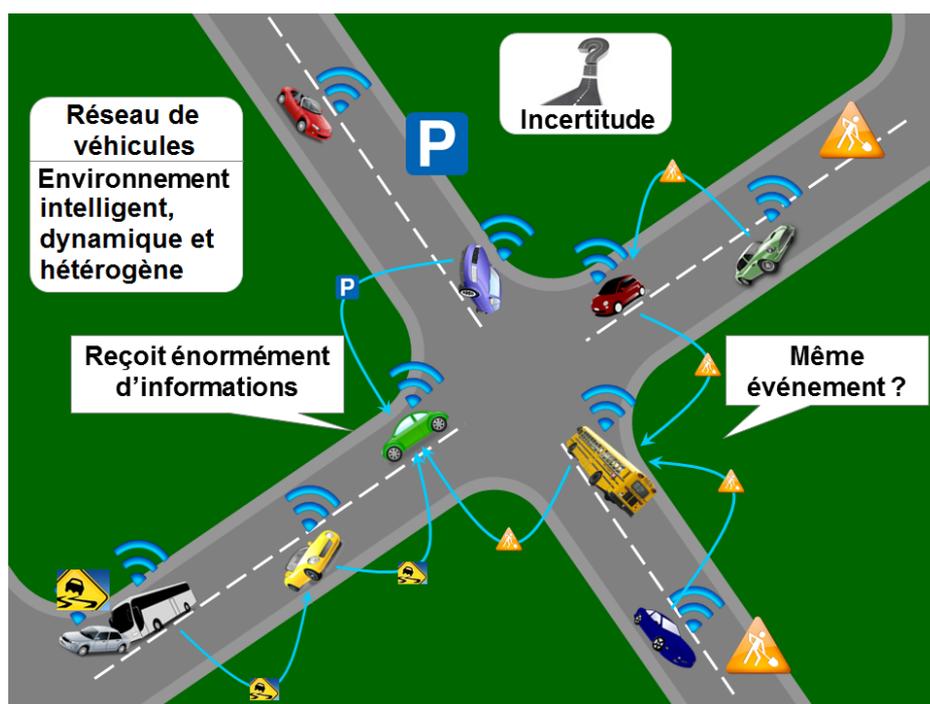


FIGURE 1 – Gestion des informations imparfaites concernant les événements sur la route.

Chaque type d'événement a ses spécificités. Un accident est un événement local, situé sur un point précis de la carte et ne se déplace pas. Une zone de travaux est un événement étendu, fixe géographiquement et qui a une durée de vie souvent connue par les autorités routières. Un embouteillage est un événement étendu qui peut croître ou se résorber, il a une durée de vie dépendante des autres événements présents et du débit des véhicules dans les rues. Un brouillard est également un événement étendu, mais contrairement aux embouteillages il n'évolue pas selon les rues et leurs sens de circulation, il dépend uniquement des conditions météorologiques.

La spatialité d'un événement est donc plus ou moins importante, on appelle un événement local un événement qui a une spatialité restreinte et un événement étendu un événement

qui a une spatialité importante.

Afin de gérer au mieux les informations incertaines concernant les événements sur la route, plusieurs méthodes utilisant des fonctions de croyance sont proposées et comparées. Certaines sont spécifiques aux événements locaux et d'autres adaptées aux événements étendus et gérant en particulier le cas des embouteillages.

Pour prendre en compte le vieillissement des messages, deux mécanismes sont étudiés. Le premier consiste à ignorer la présence des événements avec le temps, le deuxième considère que les événements disparaissent avec le temps.

Deux stratégies de gestion des messages sont proposées. Elles diffèrent par le choix de garder les messages initiaux ou uniquement le résultat de la fusion pour chaque événement dans la base des véhicules.

Un mécanisme d'influence est proposé pour gérer l'étendue des embouteillages. Il prend en compte le sens de circulation des rues et les événements ralentissants.

Les perspectives sont nombreuses, certaines sont développées telles que la généralisation du mécanisme d'influence à tous les événements étendus.

Organisation du mémoire

Ce présent mémoire est composé de quatre chapitres.

Le premier chapitre expose un état de l'art de la théorie des fonctions de croyance et des réseaux de véhicules. Les fondamentaux de la fusion de données sont présentés, ainsi que les principaux travaux réalisés dans les réseaux de véhicules utilisant des fonctions de croyance.

Dans le chapitre 2, plusieurs méthodes fondées sur des fonctions de croyance permettant de gérer les événements locaux sont proposées et testées. Plusieurs stratégies sont étudiées concernant les informations gardées dans la base des véhicules et la prédiction de la disparition des événements.

Le chapitre 3 est dédié aux événements géographiquement étendus et dynamiques, il traite en particulier le cas des embouteillages. Un mécanisme d'influence est proposé afin de gérer au mieux l'étendue de cet événement.

Le quatrième et dernier chapitre expose des améliorations possibles des méthodes proposées et quelques perspectives développées.

Une synthèse globale des travaux réalisés et quelques perspectives clôturent ce mémoire dans la conclusion.

En annexe A une implémentation avec des smartphones dont le système d'exploitation est Android est présentée.

Chapitre 1

Théorie des fonctions de croyance et réseaux de véhicules

Sommaire

1.1	Théorie des fonctions de croyance	21
1.1.1	Partie statique du niveau crédal : représentation des informations	22
1.1.2	Partie dynamique du niveau crédal : manipulation des informations	24
1.1.3	Niveau pignistique : prise de décision	29
1.2	Réseaux ad hoc de véhicules	30
1.2.1	Les catégories d'applications	31
1.2.2	Les caractéristiques et problématiques des VANET	31
1.2.3	Les architectures de communication	35
1.2.4	Les projets de recherche dans les VANET	40
1.3	Fusion de données dans les réseaux ad hoc de véhicules	45
1.3.1	Intérêt de la fusion de données	45
1.3.2	Fondamentaux de la fusion de données	46
1.3.3	Travaux utilisant des fonctions de croyance dans les véhicules intelligents	50
1.4	Conclusions	53

Ce chapitre est composé de trois parties. La première expose les principaux concepts de la théorie des fonctions de croyance, permettant la représentation des informations imparfaites, leur manipulation et la prise de décision. La deuxième partie donne une vue d'ensemble des réseaux ad hoc de véhicules ; nous y présentons leurs différentes catégories d'applications, leurs principales caractéristiques et problématiques, leurs architectures et technologies de communication, ainsi que les projets de recherche les plus significatifs menés dans ce domaine. La troisième partie est dédiée aux travaux de fusion d'informations dans les réseaux de véhicules, avec une focalisation sur ceux utilisant des fonctions de croyance.

1.1 Théorie des fonctions de croyance

Les travaux d'Arthur Pentland Dempster sur les bornes inférieures et supérieures des probabilités à la fin des années 1960 [44, 45] ont permis à Glenn Shafer d'établir les bases des fonctions de croyance et de montrer leurs intérêts dans son livre de 1976, *A Mathematical Theory of Evidence* [146]. Pour cela, nous appelons souvent la théorie des fonctions de croyance la théorie de Dempster-Shafer, elle est également appelée la théorie des croyances ou encore la théorie de l'évidence.

La théorie des fonctions de croyance est un cadre riche et flexible généralisant l'inférence Bayésienne au traitement de l'incertain, elle permet de représenter explicitement l'incertitude sur un événement : exprimer parfaitement ce qui est déjà connu et prendre en compte ce qui reste inconnu. Elle a été utilisée dans divers types d'applications. Nombreux sont les travaux qui ont mis en évidence l'intérêt de cette théorie, nous citons les domaines suivants : fusion d'informations [14, 64], résolution de problèmes de diagnostic [150], reconnaissance de formes [47, 46].

Le Modèle des Croyances Transférables (MCT ou en anglais TBM pour *Transferable Belief Model*), une interprétation non probabiliste de la théorie de Dempster-Shafer, a été introduit par Philippe Smets au début des années 1990 pour démontrer l'utilité des fonctions de croyance [147, 151, 156]. Le MCT peut être appliqué dans de nombreux domaines tels que l'analyse de données et l'aide à la décision afin de surveiller, commander à partir d'informations observées et transmettre et enregistrer des connaissances. Pour cela, il faut mettre l'information sous forme utile, la stocker, l'exploiter pour décider et agir, et la communiquer.

Le Modèle des Croyances Transférables différencie deux niveaux de raisonnement : le niveau crédal, du latin *credo* voulant dire « je crois », qui est constitué de la partie statique permettant de représenter les informations et de la partie dynamique permettant de combiner ces connaissances ; et le niveau pignistique, du latin *pignus* qui signifie « pari », appelé également niveau décisionnel, permettant d'évaluer le risque et de prendre la décision. Ils sont illustrés dans la figure 1.1 et décrits plus en détail par la suite de cette section.

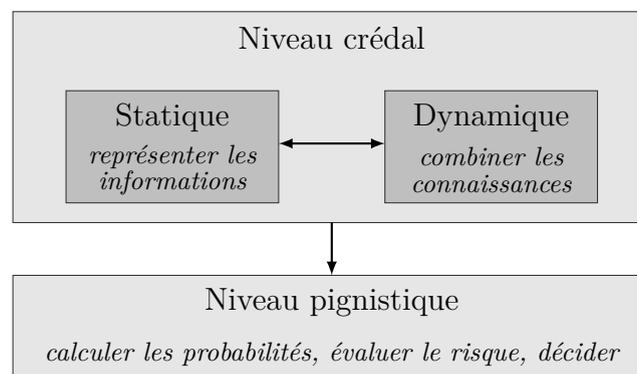


FIGURE 1.1 – Illustration des deux niveaux du Modèle des Croyances Transférables.

1.1.1 Partie statique du niveau crédal : représentation des informations

La partie statique du niveau crédal a pour objectif de représenter les connaissances sous forme de fonctions de croyance qui permettent d'encoder l'imprécision et l'incertitude contenues dans les informations.

Fonction de masse

Soit $\Omega = \{\omega_1, \dots, \omega_k, \dots, \omega_K\} = \bigcup_{k=1}^K \{\omega_k\}$ un ensemble fini, appelé « cadre de discernement », composé de K hypothèses dont l'une d'elles est susceptible d'être la réponse à une question posée. Ces hypothèses sont :

- exhaustives : la réponse est obligatoirement l'une des hypothèses $\{\omega_k\}$;
- exclusives : la réponse est unique, $\{\omega_i\} \cap \{\omega_j\} = \emptyset, \forall i \neq j$.

La connaissance détenue par un agent Ag est représentée par une fonction de masse de croyance m (bba en anglais pour *basic belief assignment*) définie de 2^Ω à valeurs dans $[0, 1]$, où 2^Ω est l'ensemble de tous les sous-ensembles possibles de Ω , vérifiant la condition suivante :

$$\sum_{A \subseteq \Omega} m(A) = 1 . \quad (1.1)$$

Elle est également notée m_{Ag}^Ω , m^Ω ou m_{Ag} en présence d'ambiguïté.

Chaque sous-ensemble $A \subseteq \Omega$ dont la masse est non nulle est appelé élément focal de la fonction de masse. Notons que :

- $m(A)$ est la part de croyance sur le fait que A contienne la réponse à la question posée ;
- $m(\Omega)$ est le degré d'ignorance ;
- $m(\emptyset)$ est le degré de conflit.

Contrairement à l'approche probabiliste, on n'est pas obligé de répartir la masse totale de probabilité sur des singletons, il est possible de l'allouer à des sous-ensembles de Ω . La théorie des fonctions de croyance permet d'avoir une attitude moins arbitraire et une souplesse permettant de représenter facilement l'ignorance totale où $m(\Omega) = 1, m(A) = 0$ pour tout $A \neq \Omega$.

Cas particuliers de fonctions de masse

Quelques cas particuliers de fonctions de masse sont définis ci-dessous.

Fonction de masse certaine Une fonction de masse est dite certaine si $m(\{\omega\}) = 1$ pour un $\omega \in \Omega$.

Fonction de masse catégorique Une fonction de masse catégorique est une fonction telle qu'un seul élément des propositions Ω est un élément focal et donc de masse unitaire, i.e. $m(A) = 1$ pour un $A \subseteq \Omega$. Une fonction de masse catégorique sur A , notée m_A , est une fonction de masse telle que $m(A) = 1$ et $m(B) = 0, \forall B \neq A$.

Fonction de masse vide Une fonction de masse est dite vide lorsque l'information fournie par la source est l'ignorance. C'est une fonction de masse catégorique sur Ω , le cadre de discernement Ω est le seul élément focal, i.e. $m(\Omega) = 1$. Elle est notée m_Ω , et représente l'ignorance totale.

Fonction de masse contradictoire Une fonction de masse contradictoire sur Ω est une fonction de masse catégorique sur \emptyset , i.e. $m(\emptyset) = 1$.

Fonction de masse dogmatique Une fonction de masse dogmatique est une fonction telle que le cadre de discernement Ω n'est pas un élément focal, i.e. $m(\Omega) = 0$.

Fonction de masse simple Une fonction de masse simple est une fonction telle qu'au plus deux éléments des propositions dont Ω sont des éléments focaux, i.e. $m(\Omega) = w$ et $m(A) = 1 - w, A \subset \Omega$, où $w \in [0, 1]$ représente le poids de l'ignorance de m . La fonction de masse vide et la fonction de masse catégorique sont des cas particuliers de la fonction de masse simple.

Fonction de masse normale Une fonction de masse est dite normale si $m(\emptyset) = 0$.

Fonction de masse sous-normale Une fonction de masse sous-normale est une fonction telle que $m(\emptyset) \neq 0$. Le processus de normalisation d'une fonction de masse sous-normale est défini par :

$$m(A) = \frac{m(A)}{1 - m(\emptyset)}, \forall A \subseteq \Omega, A \neq \emptyset, \quad (1.2)$$

$$m(\emptyset) = 0. \quad (1.3)$$

Fonction de masse consonante Une fonction de masse est dite consonante lorsque les éléments focaux sont ordonnés par inclusion, i.e. $\omega_a \subseteq \omega_b \subseteq \omega_c \dots$.

Fonction de masse Bayésienne Une fonction de masse Bayésienne est une fonction de probabilité telle que $m(A) = 0, A \in \Omega$ quand la cardinalité de A est différente de 1.

Fonctions associées aux fonctions de masse

Les fonctions suivantes sont en relation biunivoque avec la fonction de masse. Elles sont toutes définies de 2^Ω vers $[0, 1]$.

Fonction de croyance ou de crédibilité La fonction de croyance ou de crédibilité est la part de croyance spécifiquement allouée à A . Elle est une interprétation pessimiste de la fonction de masse et elle est définie par :

$$bel(A) = \sum_{B \subseteq A, B \neq \emptyset} m(B), \quad \forall A \subseteq \Omega . \quad (1.4)$$

Fonction d'implicabilité La fonction d'implicabilité est définie par :

$$b(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) = bel(A) + m(\emptyset), \quad \forall A \subseteq \Omega . \quad (1.5)$$

Fonction de plausibilité La plausibilité de A est le degré maximal de croyance qui pourrait être attribué à A . C'est une interprétation optimiste de la fonction de masse introduite par Shafer dans [146]. Elle est définie par :

$$pl(A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B), \quad \forall A \subseteq \Omega , \quad (1.6)$$

et vérifie :

$$pl(A) = bel(\Omega) - bel(\bar{A}) . \quad (1.7)$$

Fonction de communalité La fonction de communalité est définie par :

$$q(A) = \sum_{B \supseteq A} m(B), \quad \forall A \subseteq \Omega . \quad (1.8)$$

Les fonctions de croyance sont représentées sous forme matricielle par Smets [152].

1.1.2 Partie dynamique du niveau crédal : manipulation des informations

Affaiblissement

Dans le cadre des fonctions de croyance, l'affaiblissement est la prise en compte de la fiabilité. Le processus consiste à pondérer chaque masse $m(B)$ par un coefficient de fiabilité

$(1 - \alpha)$ où $\alpha \in [0, 1]$ représente le taux d'affaiblissement. Une fonction de masse m affaiblie est notée ${}^\alpha m$, elle est obtenue par :

$$\begin{cases} {}^\alpha m(A) &= (1 - \alpha) m(A) , \forall A \subset \Omega , \\ {}^\alpha m(\Omega) &= (1 - \alpha) m(\Omega) + \alpha . \end{cases} \quad (1.9)$$

Plus simplement :

$${}^\alpha m = (1 - \alpha) m + \alpha m_\Omega . \quad (1.10)$$

Cette opération a été introduite et appelée affaiblissement par Shafer [146, page 252], puis formalisée par Smets [148].

Dé-affaiblissement

Il est parfois nécessaire de retrouver la fonction de masse initiale avant son affaiblissement, pour cela le dé-affaiblissement peut être employé. Il s'agit de l'opérateur inverse de l'affaiblissement, il a été proposé et nommé ainsi (en anglais *de-discounting*) par Dencœux et Smets [50]. La fonction de masse initiale est obtenue par :

$$m = \frac{{}^\alpha m - \alpha m_\Omega}{1 - \alpha} , \quad (1.11)$$

avec $\alpha \in [0, m(\Omega)]$, et $m(\Omega)$ est la plus grande valeur de α telle que l'opération de dé-affaiblissement 1.11 tend vers une fonction de masse.

Le dé-affaiblissement de m avec la valeur maximale est la fonction de masse totalement renforcée notée ${}^{tr}m$ et définie par :

$${}^{tr}m = \begin{cases} \frac{m(A)}{1 - m(\Omega)} & \forall A \subset \Omega , \\ 0 & \text{sinon} . \end{cases} \quad (1.12)$$

Renforcement vers un élément

Un agent peut renforcer une fonction de masse qui ne semble pas assez précise vers un élément A en utilisant le mécanisme de correction suivant [112] :

$${}^\nu m = (1 - \nu) m + \nu m_A , \quad (1.13)$$

où $\nu \in [0, 1]$ est le taux de renforcement et m_A est la fonction de masse catégorique sur un élément A attendue par l'agent quand m doit être totalement renforcée.

Principe du Minimum d'Information

Le Principe du Minimum d'Information (PMI), appelé également le Principe d'Engagement Minimum, est un principe de précaution consistant à choisir la fonction de masse

de croyance la moins informative parmi un ensemble de fonctions de masse possibles, c'est à dire la fonction de masse qui maximise l'incertitude [53, 54]. Une approche quantitative permet de mesurer l'incertitude avec la méthode de non-spécificité :

$$N(m) = \sum_{A \subseteq \Omega, A \neq \emptyset} m(A) \cdot \log_2(|A|) . \quad (1.14)$$

Notons qu'une fonction de masse vide est totalement non-spécifique tandis qu'une fonction de masse Bayésienne est totalement spécifique.

Raffinement et grossissement

Soient Ω et Θ deux cadres de discernement. L'application de raffinement de cadre de discernement Θ associe à chaque hypothèse $\theta_i \in \Theta$ une ou plusieurs hypothèses $\omega_k \in \Omega$. La figure 1.2 montre un exemple de raffinement de cadre de discernement, où $\rho : 2^\Theta \rightarrow 2^\Omega$ est la fonction de raffinement de Θ . Si Ω est un raffinement de Θ , on dit que Θ est un grossissement de Ω . Notons qu'il existe des éléments dans Ω qui ne sont pas l'image d'éléments dans Θ . Par exemple dans la figure 1.2, l'élément $\{\omega_2, \omega_3\}$ n'est pas une image des éléments de Θ .

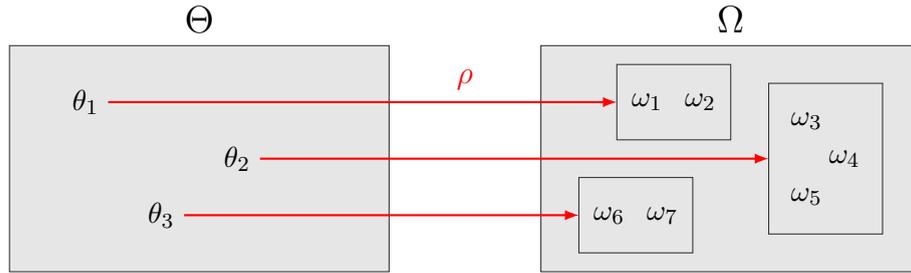


FIGURE 1.2 – Raffinement de cadre de discernement.

Règles de combinaison de fonctions de masses issues de sources distinctes

Deux fonctions de croyance m_1 et m_2 définies sur le même cadre de discernement Ω et issues de deux sources d'information distinctes, peuvent être combinées en utilisant les règles de combinaison conjonctive ou disjonctive.

Règle de combinaison conjonctive Soient m_1 et m_2 deux fonctions de croyance issues de deux sources d'informations distinctes et fiables [146]. La règle de combinaison conjonctive non normalisée est introduite par Smets [151]. Le résultat de la combinaison de m_1 et m_2 est noté \odot et obtenu par :

$$m_{1 \odot 2}(A) = (m_1 \odot m_2)(A) = \sum_{B \cap C = A} m_1(B) \cdot m_2(C) , \forall A \subseteq \Omega . \quad (1.15)$$

Ci-dessous les propriétés de la règle de combinaison conjonctive :

- elle est associative et commutative ;
- elle est linéaire ;
- elle n'est pas idempotente, i.e. $m_1 \odot m_1 \neq m_1$;
- une fonction de masse issue d'elle peut être sous-normale, i.e. $m_1 \odot_2(\emptyset) \neq 0$;
- elle peut représenter un conflit si les sources sont non fiables, non distinctes ou font référence à des phénomènes différents ou si le cadre de discernement n'est pas exhaustif [155, 17].

La règle de combinaison conjonctive pouvant être sous-normale, la règle de Dempster-Shafer, appelée également la sommation orthogonale de Dempster, consiste à sa normalisation afin de masquer le conflit [44, 45, 146]. Elle est représentée par l'opérateur \oplus et définie par :

$$m_{1\oplus 2}(A) = (m_1 \oplus m_2)(A) = \frac{m_1 \odot_2(A)}{1 - m_1 \odot_2(\emptyset)}, \forall A \neq \emptyset. \quad (1.16)$$

Règle de combinaison disjonctive Soient deux fonctions de masse m_1 et m_2 issues de deux sources d'informations distinctes et dont l'une au moins est fiable. La règle de combinaison disjonctive [54, 148] de m_1 et m_2 est notée \odot et définie par :

$$m_{1\odot 2}(A) = (m_1 \odot m_2)(A) = \sum_{B \cup C = A} m_1(B) \cdot m_2(C), \forall A \subseteq \Omega. \quad (1.17)$$

Ci-dessous les propriétés de cette règle de combinaison :

- elle est associative et commutative ;
- elle est linéaire ;
- elle n'est pas idempotente, i.e. $m_1 \odot m_1 \neq m_1$;
- son élément neutre est la fonction de masse $m(\emptyset) = 1$ qui représente le conflit total ;
- elle est un processus de généralisation.

Décomposition canonique

Soient :

- A^w une écriture simplifiée signifiant que la fonction de masse est simple et formée des deux éléments focaux $m(A) = 1 - w$ et $m(\Omega) = w$, par exemple la fonction de masse vide est notée A^1 et celle catégorique est notée A^0 ;
- A_v une écriture simplifiée signifiant que la fonction de masse est formée des deux éléments focaux $m(A) = 1 - v$ et $m(\emptyset) = v$.

La décomposition canonique est introduite par Shafer [146] et consiste à exprimer une fonction de masse non-dogmatique sous la forme d'une combinaison conjonctive de fonctions

de masse.

La méthode proposée par Smets [149] définit une fonction de masse $\mu : 2^\Omega \rightarrow \mathfrak{R}$ simple généralisée vérifiant :

- $\mu(A) = 1 - w$,
- $\mu(\Omega) = w$,
- $\mu(B) = 0, \forall B \in 2^\Omega \setminus \{A, \Omega\}$,

avec $A \neq \Omega$ et $w \in [0, +\infty[$.

La décomposition canonique conjonctive d'une fonction de masse non-dogmatique est donnée par :

$$m = \bigcap_{A \subset \Omega} A^{w(A)} . \quad (1.18)$$

Les poids de cette décomposition canonique sont calculés avec l'équation 1.19.

$$w(A) = \prod_{B \supseteq A} q(B)^{(-1)^{|B|-|A|+1}} , \forall A \subset \Omega , \quad (1.19)$$

où $|A|$ et $|B|$ représentent respectivement la cardinalité de A et celle de B .

La décomposition canonique disjonctive d'une fonction de masse sous-normale est donnée par :

$$m = \bigcup_{A \neq \emptyset} A_{v(A)} , \quad (1.20)$$

où les poids de cette décomposition canonique sont définis par :

$$v(A) = \bar{w}(\bar{A}) , \quad (1.21)$$

et les poids \bar{w} sont calculés avec l'équation 1.19 à partir du complémentaire \bar{m} de la fonction de masse m , et \bar{A} est le complémentaire de A . La définition du complémentaire d'une fonction de masse est donnée par :

$$\bar{m}(A) = m(\bar{A}) , \forall A \subset \Omega . \quad (1.22)$$

Pour plus de détails, des exemples sont présents dans [49].

Règles de combinaison de fonctions de masses issues de sources non distinctes

Les travaux de Smets [149] ont permis à Denœux [48, 49] de proposer les règles de combinaison conjonctive prudente et disjonctive hardie permettant de combiner deux fonctions de croyance m_1 et m_2 définies sur le même cadre de discernement Ω et issues de deux sources d'information non distinctes.

Ces règles de combinaison sont basées sur la décomposition canonique des fonctions de masse, elles sont associatives et commutatives. Contrairement aux règles de combinaison conjonctive et disjonctive, ces opérateurs sont idempotents.

Règle de combinaison conjonctive prudente Soient m_1 et m_2 deux fonctions de masse non dogmatiques issues de deux sources d'informations non distinctes et fiables. La règle de combinaison conjonctive prudente de m_1 et m_2 est symbolisée par \otimes et définie par :

$$m_1 \otimes m_2(A) = (m_1 \otimes m_2)(A) = \bigcap_{A \subseteq \Omega} A^{w_1(A) \wedge w_2(A)}, \quad (1.23)$$

où \wedge dénote l'opérateur minimum.

La règle de combinaison conjonctive prudente est commutative, associative et idempotente. L'opérateur \bigcap est distributif par rapport à \otimes : $m \bigcap (m_1 \otimes m_2) = (m \bigcap m_1) \otimes (m \bigcap m_2)$.

Règle de combinaison disjonctive hardie Soient m_1 et m_2 issues de deux sources d'informations non distinctes et dont l'une au moins est fiable. La règle de combinaison disjonctive hardie de m_1 et m_2 est symbolisée par \oplus et définie par :

$$m_1 \oplus m_2(A) = (m_1 \oplus m_2)(A) = \bigcup_{A \neq \emptyset} A^{v_1(A) \vee v_2(A)}. \quad (1.24)$$

Elle est commutative, associative et idempotente. L'opérateur \bigcup est distributif par rapport à \oplus : $m \bigcup (m_1 \oplus m_2) = (m \bigcup m_1) \oplus (m \bigcup m_2)$.

1.1.3 Niveau pignistique : prise de décision

Prise de décision dans le MCT

Soient D l'ensemble des décisions pouvant être prises, $P : 2^\Omega \rightarrow [0, 1]$ une mesure de probabilité et $c : D \times \Omega \rightarrow \mathfrak{R}$ une fonction de coût où $c(d, \omega)$ représente le coût de prendre la décision d sachant que la vérité est ω . Le principe de rationalité [143, 41] consiste à choisir la décision d parmi l'ensemble des décisions possibles D minimisant le risque :

$$\rho(d) = \sum_{\omega \in \Omega} c(d, \omega) \cdot P(\{\omega\}). \quad (1.25)$$

Dans le MCT, la phase de prise de décision porte essentiellement sur la distribution de probabilités pignistiques proposée par Smets et Kennes [156], notée $BetP\{m\}$ ou $BetP$ en l'absence d'ambiguïté. Elle est définie par :

$$BetP(\omega_k) = \sum_{A \subseteq \Omega, \omega_k \in A} \frac{1}{|A|} \frac{m(A)}{1 - m(\emptyset)}, \quad \forall \omega_k \in \Omega, \quad (1.26)$$

où $|A|$ représente la cardinalité de A .

La transformation entre m et $BetP$ est appelée la transformation pignistique. Elle consiste à répartir de manière équiprobable la masse d'une proposition A sur les hypothèses contenues dans A , sa justification est donnée dans [154].

La décision est généralement prise en choisissant l'élément ω_k ayant la plus grande probabilité pignistique. La règle de maximum de plausibilité [14, 34] peut être utilisée pour la prise de décision lorsque l'agent a une attitude plutôt optimiste. La distribution de probabilités sur les singletons $\omega_k \in \Omega$ à partir de laquelle une décision peut être prise est donnée par :

$$PlP(\omega_k) = \frac{pl(\omega_k)}{\sum_{\omega_k \in \Omega} pl(\omega_k)}, \forall \omega_k \in \Omega. \quad (1.27)$$

De la même manière, les crédibilités peuvent être employées lorsque l'agent a une attitude plutôt pessimiste. Notons que $bel(A) \leq BetP(A) \leq pl(A)$ pour tout élément $A \in 2^\Omega$.

Le lecteur intéressé trouvera plus d'informations sur la prise de décision dans [153].

1.2 Réseaux ad hoc de véhicules

Les réseaux ad hoc¹ sont des réseaux sans fil capables d'exister et de s'organiser sans requérir la présence d'infrastructure. Au lieu de communiquer via un point d'accès centralisé, ces réseaux sont formés de nœuds sans fil communiquant entre eux de façon directe pour échanger des informations, et pouvant être autonomes dans la prise de décision en utilisant les informations locales [131]. Dans le contexte de mobilité, ces réseaux sont appelés réseaux ad hoc mobiles MANET (*Mobile Ad hoc NETWORKS*) [36]. Pouvant être déployés rapidement, tout en offrant une bonne tolérance aux pannes, les réseaux ad hoc ont été conçus en 1972 pour une application militaire du département de la défense américaine [91, 70, 90]. C'est seulement dans les années 1990, avec l'avancement des technologies radio, qu'une prise de conscience de l'énorme potentiel de ces réseaux a eu lieu. Ils ont donc suscité un fort intérêt, d'où la création du groupe MANET dans l'IETF (*Internet Engineering Task Force*) [4], dont l'objectif est la normalisation du routage des MANET. Nombreux sont les protocoles de routage proposés dans les réseaux ad hoc mobiles [141], ceux retenus par le groupe MANET de l'IETF (et les plus connus) sont AODV (*Ad hoc On Demand Distance Vector*) [132, 133], DSR (*Dynamic Source Routing*) [88, 89], OLSR (*Optimized Link State Routing*) et TBRPF (*Topology Broadcast based on Reverse-Path Forwarding*). Le lecteur pourra trouver plus d'informations sur les réseaux ad hoc mobiles dans [158, 160, 20].

Les réseaux de communication ad hoc inter-véhicules VANET (*Vehicular Ad hoc NETWORKS*) sont des dérivés des MANET, appliqués à la communication des véhicules les uns avec les autres ou avec des équipements fixes de la route. Ils sont formés de composantes matérielles comportant les véhicules et les infrastructures et de composantes logicielles dont les applications et les technologies de communication.

1. Le terme « ad hoc » vient du latin, voulant dire « allant vers ce vers quoi il doit aller ».

1.2.1 Les catégories d'applications

Les applications des réseaux véhiculaires sont très variées. Elles peuvent être classées en trois grandes catégories [170, 18].

Applications de sécurité routière

La première catégorie est sans aucun doute la catégorie la plus importante, elle concerne les applications qui visent à améliorer la sécurité des passagers sur les routes. En général, il s'agit de communiquer des informations telles que les collisions, les obstacles, les freinages soudains, les changements de voie et les conditions météorologiques, permettant aux véhicules d'éviter les situations dangereuses [180, 178, 61, 139, 162].

Applications de gestion du trafic routier

Ces applications, telles que la surveillance du trafic et la proposition d'itinéraires alternatifs, visent à équilibrer la circulation sur les routes et les croisements afin d'utiliser efficacement leur capacité [13, 124]. Elles permettent de réduire les embouteillages, la durée des voyages, le risque d'accidents et la consommation d'énergie en communiquant aux véhicules des informations leur permettant d'adapter leurs parcours aux conditions du trafic routier.

Applications de confort et de divertissement

Les applications de cette catégorie proposent des services afin de rendre les voyages plus confortables et agréables aussi bien pour les conducteurs que pour les passagers [38, 121, 161]. Nous citons les applications de gestion de parkings, des jeux en réseaux, de chat entre véhicules et celles fournissant des informations utiles telles que les panneaux d'annonces indiquant la présence de stations-service ou les informations touristiques relatives à la localisation du véhicule.

1.2.2 Les caractéristiques et problématiques des VANET

Les VANET ont des caractéristiques les différenciant des autres types de réseaux. Ce sont des réseaux avec une topologie dynamique due à la forte mobilité des véhicules, et dont la trajectoire des nœuds peut être prédite.

Un défi majeur des réseaux véhiculaires est de concevoir une architecture uniformisée permettant la communication entre les véhicules de différents fabricants, adaptée aux spécificités de ces réseaux et qui soit un bon compromis pour répondre à la variabilité de certaines de leurs caractéristiques.

Dans cette section, nous présentons les caractéristiques des VANET ainsi que leurs problématiques et défis majeurs.

Caractéristiques

Caractéristiques liées à l'avancée technologique des véhicules Le système d'alimentation des plateformes embarquées dans les véhicules permet aux réseaux véhiculaires de disposer d'énergie largement suffisante et continue même en cas d'arrêt [181, 84]. En plus, les véhicules sont capables de stocker différents types d'informations en provenance d'autres véhicules ou d'équipements de la route. Ces informations peuvent être régulièrement mises à jour et enrichies afin de permettre au conducteur de prendre une décision. Les réseaux VANET ont également une grande capacité de calcul [122, 125]. Ces avantages permettent de proposer des applications de plus en plus avancées, et même d'embarquer de multiples interfaces de communication à la fois. Notons que les véhicules ne sont pas forcément tous équipés d'un système de communication inter-véhicules.

Caractéristiques liées au comportement des véhicules La forte mobilité des véhicules ainsi que l'hétérogénéité de leur vitesse et la diversité de leurs trajectoires en fonction des environnements et des infrastructures routières sont des caractéristiques spécifiques aux VANET. Les changements de topologies sont très fréquents dans les réseaux véhiculaires, un véhicule peut quitter le réseau en un temps très court [22, 104, 181]. Cependant, les véhicules se déplacent d'une façon organisée. Leurs trajectoires peuvent donc être prédites en utilisant des informations sur les infrastructures routières et sur le comportement du conducteur, comme la zone géographique dans laquelle il se déplace habituellement et ses parcours récurrents du trajet maison-travail [84, 161].

Caractéristiques liées à l'environnement routier Les milieux de déploiement des réseaux véhiculaires sont de diverses caractéristiques liées à leur localisation (urbain, montagneux, etc.) et leurs moyens (route nationale, autoroute, etc.). La vitesse moyenne et la densité des véhicules dans un réseau VANET sont très variables, et dépendent de facteurs temporels et spatiaux [181, 161]. Par exemple, la densité des véhicules pendant les heures de pointes, le jour ou dans un milieu urbain est beaucoup plus importante que pendant les heures creuses, la nuit ou sur les autoroutes; elle est également dense sur les intersections, et quand certains types d'événements sont présents sur la route tels que les accidents et les travaux.

Problématiques et défis

Connectivité et liens du réseau Les terminaux de communication étant installés à l'intérieur des véhicules, cela défavorise la connectivité du réseau et sa continuité même si les trajectoires des véhicules peuvent être prédites dans certains environnements tels que les

autoroutes. La forte mobilité des véhicules et les changements de topologies éloignent les entités communicantes, davantage quand les véhicules sont de directions opposées. En outre, les véhicules échangent des données dans un environnement externe où des obstacles comme les bâtiments, les montagnes et les forêts peuvent être présents. Ces obstacles dégradent fortement la qualité et la puissance des signaux émis. La taille des réseaux VANET est très variable à cause de la diversité de topologies des environnements routiers et des conditions du trafic. Dans le cas des embouteillages, la taille du réseau augmente considérablement. Notons que le changement de ces conditions fait que les réseaux voisins peuvent se raccorder, puis se diviser. Des problèmes de fragmentation du réseau peuvent fréquemment apparaître, essentiellement quand le système de communication inter-véhicules n'est pas largement répandu et équipé dans la majorité des véhicules ou quand la densité du réseau est très faible. Le lecteur peut trouver dans [78, 22, 15] plus d'informations sur ces problématiques et les solutions proposées pour y pallier.

Inondation Quand la densité du réseau véhiculaire est très élevée, un problème d'inondation peut se produire. Les échanges peuvent devenir rapidement redondants et saturer le réseau [108]. Plusieurs travaux ont été menés pour pallier aux limites de ce mécanisme, certains utilisent des mécanismes de contention [73, 79], d'autres considèrent que la dissémination des messages doit être adaptée à la disponibilité des informations dans le réseau [159]. Nous citons également [163] où les auteurs proposent une diffusion probabiliste des messages, et une prise compte de la distance entre les nœuds et de leurs positions.

Sécurité La sécurité dans les réseaux véhiculaires est un défi très important dans les VANET. Il s'agit d'assurer une sécurité optimale dans un intervalle de temps très court, afin de pouvoir utiliser les informations échangées le plus rapidement possible [78, 128]. Cela concerne :

- l'authentification des émetteurs des messages : utiliser des signatures afin d'ignorer les messages en provenance de nœuds malveillants et de s'assurer de la bonne identité des véhicules ;
- la confidentialité : protéger les données personnelles des utilisateurs et assurer l'anonymat des sources ;
- la non répudiation des messages : vérifier l'origine des données en s'assurant que les émetteurs des messages ne peuvent pas nier d'être à la source de l'envoi, cela est indispensable dans certains domaines comme les transactions commerciales ;
- l'intégrité des messages : s'assurer que les messages sont reçus en entier et sans aucune modification accidentelle ou volontaire.

Géolocalisation Certains types d'informations peuvent intéresser uniquement les véhicules présents dans une zone géographique limitée. La géolocalisation est nécessaire pour permettre d'échanger plus efficacement les données. Elle est utilisée dans la plupart des applications du réseau véhiculaire telles que les applications de guidage. La solution la plus utilisée dans les VANET est le système de localisation mondial GPS (*Global Positioning*

System) [80, 92]. Sa précision est essentielle pour le bon fonctionnement des applications surtout celles liées à la sécurité routière telles que le freinage automatique.

Routage Pour que les véhicules communiquent, il leur est nécessaire de faire passer leurs informations par d'autres qui se chargeront de les acheminer. Pour cela, il est primordial que les véhicules soient capables de construire des routes entre eux : c'est le rôle des protocoles de routage, qui permettent un acheminement optimal des informations depuis un émetteur à un destinataire précis [71]. Ils sont davantage importants dans la communication sans infrastructure où l'information peut provenir de multiples sources. Même si les protocoles de routage des MANET ont servi de base pour les VANET, la connectivité instable causée par le mouvement très dynamique des nœuds, la fragmentation du réseau et les contraintes de sécurité rendent la conception des protocoles de routage un véritable défi dans les VANET. La plupart des protocoles de routage du MANET sont inefficaces ou très perfectibles, et l'adaptation de leurs algorithmes est donc nécessaire pour qu'ils soient applicables aux VANET. En plus, leur amélioration est possible dans certains environnement où la trajectoire des nœuds peut être prédite. Plusieurs protocoles ont été proposés dans les VANET [125, 104, 106], nous citons ci-dessous les plus connus :

- GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*) [93] : il utilise les positions pour décider des transmissions des paquets. Il a été prouvé que ce protocole est plus adapté aux VANET que le DSR [72], en plus il est très robuste dans les réseaux à large échelle [145].
- AODV-DFR (*AODV with Directional Forward Routing*) : il s'agit d'une version modifiée du protocole AODV afin d'adapter ce dernier aux VANET, il est proposé dans [30].
- GSPR (*Geographic Secure Path Routing*) [129] : ce protocole traite la sécurité dans les VANET.
- VADD (*Vehicule-Assisted Data Delivery*) [186] : il est proposé pour assister les véhicules à transmettre les informations sur le meilleur chemin dans les réseaux non denses tout en réduisant au maximum le temps de transmission.

Plusieurs travaux ont été menés pour étudier et comparer les protocoles de routage dans les VANET [107, 102, 130] et pour transmettre les messages le plus efficacement possible [177, 10, 58]. Nous citons également d'autres travaux qui ont traité le problème d'évolutivité dans les réseaux de communication inter-véhicules afin de gérer efficacement à la fois les réseaux denses et non denses pour l'envoi d'informations à un endroit précis [98], sachant que dans les zones denses, le contrôle de la charge du réseau est plus compliqué : le nombre de messages envoyés dans le réseau dépend du nombre de véhicules, du nombre d'applications dans les véhicules, du nombre d'événements sur la route et de la durée de validité des messages.

1.2.3 Les architectures de communication

Entités communicantes

L'architecture d'un réseau véhiculaire sans fil est composée d'entités communicantes [28, 125]. Les points d'accès de bord de route RSU (*Road Side Unit*) permettent la communication entre les véhicules et les infrastructures. Les véhicules intelligents sont équipés chacun de plateforme de communication appelée OBU (*On Board Unit*) leur permettant de communiquer ensemble et avec les autres entités du réseau. Les unités d'application AU (*Application Unit*) utilisent les capacités de communication des OBU pour permettre l'utilisation et le fonctionnement des applications VANET. Les AU identifient également tout équipement à l'intérieur des véhicules tel que les téléphones portables. Les entités communicantes créent et échangent des messages permettant la diffusion d'informations utiles aux différentes applications du VANET.

Messages communiqués

Certains messages sont générés à intervalles réguliers et ne sont pas transférés aux autres entités communicantes. C'est le cas des messages de contrôle créés par les véhicules contenant des informations géospatiales (position, vitesse, trajectoire), ils permettent aux véhicules d'être connus par le réseau. D'autres messages peuvent être créés par les entités communicantes et diffusés dans le réseau. C'est le cas par exemple d'un véhicule qui crée un message concernant un accident détecté ou d'une RSU qui crée un message concernant les conditions météorologiques. Il existe également des messages tels que les courriers électroniques qui sont envoyés une seule fois et non transmis dans le réseau.

Modes de communication

Trois modes de communication existent dans les réseaux ad hoc de véhicules [28, 125, 116, 87] afin d'assurer l'échange des messages entre les différentes entités communicantes : communications véhicule-infrastructure, communications véhicule-véhicule et communications hybrides. Notons qu'on peut ajouter également le mode intra-véhicule qui permet les communications à l'intérieur des véhicules [19]. La figure 1.3 illustre ces modes de communication.

Communications véhicule-infrastructure Dans ce mode de communication, les véhicules s'appuient sur les infrastructures de la route RSU pour envoyer, recevoir et relayer des informations du réseau. Les communications V2I (*Vehicule-to-Infrastructure*) permettent aux véhicules d'envoyer des messages aux infrastructures, et les communications I2V (*Infrastructure-to-Vehicle*) permettent les envois dans l'autre direction. Ce mode enrichit les connaissances des véhicules avec des informations centralisées dans les RSU telles

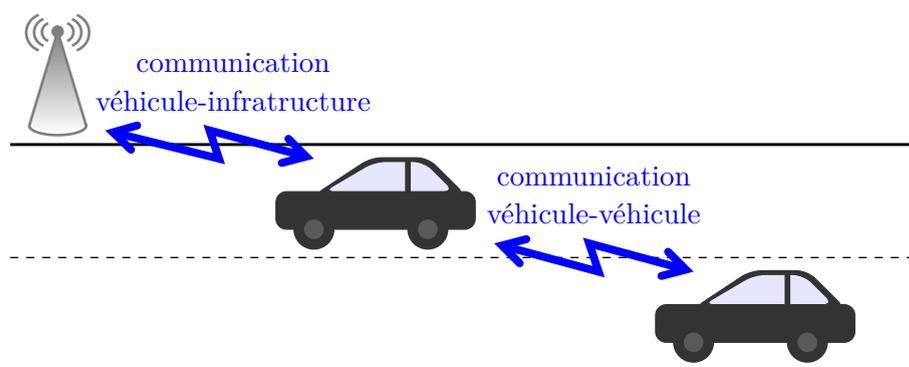


FIGURE 1.3 – Modes de communication dans les VANET.

que les conditions météorologiques (I2V), l'alerte d'accidents (bidirectionnel) et l'accès à des services tels que internet. En revanche, il nécessite une couverture globale d'infrastructures excessivement coûteuses. Pour cela la majorité des travaux repose sur les deux autres modes de communication décrits ci-dessous.

Communications véhicule-véhicule Le mode de communication de véhicules à véhicules V2V (*Vehicle-to-Vehicle*), appelé également IVC (*Inter-Vehicle Communication*), est un mode décentralisé où les véhicules intelligents communiquent les informations, chacun avec les véhicules à portée, d'une façon autonome sans utiliser une quelconque infrastructure. Ces informations peuvent être moins riches que celles du mode véhicule-infrastructure, mais contiennent exactement celles dont le véhicule a besoin. Dans le cas où deux véhicules communicants sont distants de plusieurs sauts l'un de l'autre, les autres véhicules du réseau servent de relais et ces communications se font par multi-sauts. Ce mode favorise la rapidité de la diffusion des messages, pour cela il est beaucoup utilisé dans les applications de la sécurité routière où souvent des messages d'alertes sont communiqués. Nous citons les applications de freinage d'urgence, de ralentissement automatique et de conduite coopérative. Néanmoins, ce mode requiert un nombre de véhicules suffisant pour que les communications se fassent efficacement et sans interruption. Dans cette thèse, ce mode est utilisé pour l'échange des données dans les réseaux véhiculaires.

Communications hybrides Les communications hybrides combinent les modes véhicule-infrastructure et véhicule-véhicule. Ce mode permet de couvrir un maximum d'infrastructures grâce à la communication V2V où les véhicules servent de relais pour étendre les informations. Cela permet d'économiser sur les coûts des infrastructures : un nombre beaucoup moins élevé d'infrastructures peut être suffisant, davantage sur les autoroutes. En plus, ce mode permet de répondre à la problématique de connectivité de longue distance dans les réseaux V2V. Les infrastructures, n'ayant pas des contraintes de mobilité, servent à leur tour de relais fixes afin d'étendre la distance de communication inter-véhicules. Les deux premiers modes se montrent complémentaires, leur combinaison est donc très intéressante.

Elle est très utile dans beaucoup d'applications telles que l'état du trafic.

Les technologies de communication

Pour établir l'échange d'informations dans les réseaux véhiculaires, plusieurs technologies de communication peuvent être utilisées. L'intérêt des unes par rapport aux autres est lié aux types d'applications. Le Tableau 1.1 récapitule les spécifications de ces technologies [42].

Tableau 1.1 – Technologies de communication dans les VANET.

Technologie	Bande passante	Portée	Vitesse supportée	Latence	mode de communication
Bluetooth	24 Mb/s	10 m	négligeable	10 ms	intra-véhicule
3G	42 Mb/s	20 km	350 km/h	200-300 ms	V2I
LTE	73 Mb/s	100 km	350 km/h	100 ms	V2I
WiMax	40 Mb/s	50 km	120 km/h	199 ms	V2I
Wi-Fi	54 Mb/s	400 m	250 km/h	dépend de l'implémentation	V2V et V2I V2V et V2I
DSRC/WAVE	27 Mb/s	1 km	300 km/h	< 5 ms	V2V et V2I
CALM	54 Mb/s	1 km	non connue	10 ms	V2V et V2I

Bluetooth Le Bluetooth [7] consomme très peu d'énergie, il est caractérisé par une très courte portée réseau de 10 m et une bande passante de 3 Mb/s pour le Bluetooth 2.0 et 24 Mb/s pour le Bluetooth 3.0. Il est souvent utilisé dans la communication entre le véhicule et les mobiles intra-véhiculaires, par exemple pour le transfert de fichiers. Quand la mobilité des véhicules est très faible, certaines applications comme le paiement de parking peuvent utiliser cette technologie. Cependant, elle souffre des obstacles qu'elle n'est pas capable de traverser. Nous citons les projets FleetNet et CarTalk, décrits dans la section 1.2.4, qui ont utilisé cette technologie dans leurs travaux.

Technologies cellulaires Les technologies cellulaires sont également utilisées dans les communications véhiculaires. Elles ont une latence peu élevée, ce qui permet leur utilisation dans certaines applications de sécurité. Nous citons les technologies suivantes :

- La génération de normes 3G : elle est représentée principalement par la norme UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), et peut être utilisée dans diverses applications. Par contre, la bande passante est partagée avec les appels téléphoniques, cela peut saturer le réseau téléphonique et provoquer des délais d'établissement de connexion défavorables aux applications de sécurité. Elle est adaptée aux communications V2I, et caractérisée par une latence comprise entre 200 et 300 ms et une bande passante de 42 Mb/s. Sa portée est de 20 km et elle supporte des vitesses très importantes.

- La génération de normes 4G (successeur de la 3G) : résout le problème de la 3G grâce à son délai de communication et sa capacité très optimisés par rapport à la 3G. Elle est principalement utilisée dans la communication véhicule-infrastructure, ses normes les plus connues sont :
 - LTE (*Long Term Evolution*) : la vitesse supportée par le LTE peut aller jusqu'à 350 km/h et sa portée maximale est de 100 km.
 - WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) : régit par la norme IEEE 802.16e, sa portée maximale est de 50 km, mais il est surtout utilisé en zones urbaines car la vitesse maximale supportée est de 120 km/h.

WLAN ou Wi-Fi Le WLAN (*Wireless Local Area Network*) ou Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) est un ensemble de protocoles adressés par le standard IEEE 802.11. Il est adapté à la mobilité des véhicules, aussi bien dans les communications véhicule-véhicule que dans les communications véhicule-infrastructure. Le Wi-Fi peut supporter des vitesses allant jusqu'à 250 km/h, et une portée maximale de 400 m. Néanmoins, cette technologie n'est pas adaptée aux changements de topologies et aux environnements de faible densité, sachant que la couverture des points d'accès Wi-Fi n'est pas encore suffisante malgré son augmentation importante ces dernières années. Les connexions peuvent donc être intermittentes et par conséquent certaines applications, surtout celles liées à la sécurité routière, ne peuvent pas utiliser cette technologie.

DSRC ou WAVE Afin de surmonter les problèmes du Wi-Fi, les communications à courte portée DSRC (*Dedicated Short-Range Communications*) [87, 86] ont été spécialement conçues pour les communications véhiculaires V2V et V2I. La nouvelle norme DSRC est basée sur une variante du standard IEEE 802.11 dite IEEE 802.11p ou WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environments*) [176], elle est adaptée à la mobilité avec un temps d'établissement de connexion très court, inférieur à 5 ms. En 1999, la fréquence de communication a été allouée à 5.9 GHz aux États-Unis ; plus tard en 2004, elle a été allouée à 5.8 GHz en Europe et au Japon [161]. Le DSRC est caractérisé par une portée qui peut atteindre 1 km, il peut résister à des vitesses allant jusqu'à 300 km/h. Cette technologie de communication est considérée aujourd'hui comme le standard le plus approprié aux VANET. Elle peut être utilisée : dans des applications de sécurité routière comme la prévention des collisions ; dans des applications de gestion de trafic afin d'échanger des informations telles que les bouchons, les travaux et les accidents ; dans des applications de confort comme le télépéage. Cette dernière était l'application principale de l'ancienne norme DSRC à 915 MHz, notons que la portée de cette norme est inférieure à 30 m, ce qui explique le nom de cette technologie.

CALM Les travaux sur les normes CALM (*Communication Architecture for Land Mobile* ou précédemment *Continuous Air-interface for Long and Medium distance*) [37] ont débuté en 2001 pour définir une architecture de communication V2I et V2V compatible avec les autres technologies de communication : Bluetooth, technologies cellulaires, Wi-Fi et DSRC. Entre 2006 et 2011, les projets européens CVIS, SafeSpot, GeoNet, COMeSafety et COMe-

Safety2, décrits dans la section 1.2.4, ont complété ces travaux, ce qui a donné lieu à la création d'un nouveau groupe de normalisation *Cooperative ITS*. Les normes CALM permettent une portée de 1 km, une latence de 10 ms et un débit de 54 Mb/s, ce qui est très adapté aux communications V2V et V2I. Le seul point critique soulevé est le prix, qui est dix fois plus élevé que celui de DSRC [63].

Simulateurs des VANET

Il est nécessaire de tester, dans des conditions réelles, les applications proposées et développées par les différents projets. Ces expérimentations sont difficilement réalisables dans la vraie vie pour des raisons de coûts et de complexités liés aux spécificités des réseaux de véhicules : forte mobilité, diversité des environnements, etc. Pour cela, les simulateurs ont un rôle primordial dans les VANET. Ils sont classés en trois catégories [18], décrites dans cette section.

Générateurs de mobilité véhiculaire L'objectif des générateurs de mobilité véhiculaire est de s'approcher le plus possible de la réalité pour simuler la mobilité véhiculaire. Nous citons SUMO (*Simulation of Urban MObility*) [99], qui est sans doute le générateur de mobilité le plus connu. Il est capable de gérer des environnements très étendus de l'ordre de 10000 rues.

Simulateur réseau Cette catégorie de simulateurs implémente la couche protocolaire des réseaux ad hoc de véhicules. Il s'agit par exemple de simuler les sources, les destinataires, les messages échangés ainsi que leurs chemins. La majorité de ces simulateurs, comme ns-2 (*Network Simulator 2*) [65] par exemple, sont basés sur des simulateurs MANET existants, et adaptés à la mobilité et la diffusion d'informations dans les VANET.

Simulateur VANET Les simulateurs VANET sont conçus spécifiquement pour les réseaux de véhicules. Ils fournissent à la fois la couche de mobilité véhiculaire et celle protocolaire. TraNS (*Traffic and Network Simulation Environment*) [136] est un exemple de simulateur VANET combinant SUMO et NS-2. Sa seule limitation est l'incapacité de NS-2 d'envoyer à SUMO des informations comme les obstacles imprévus tels que les accidents, ce qui rend ce simulateur irréaliste dans certaines situations. Nous citons également NCTUns (*National Chiao Tung University Network Simulator*) [175] qui a l'avantage par rapport à TraNS de combiner dans un seul module les simulations de la mobilité et du réseau, il est cependant limité à 4096 véhicules.

1.2.4 Les projets de recherche dans les VANET

Un grand nombre de projets de recherche européens, américains et japonais existent dans le domaine des réseaux véhiculaires [167]. Les premiers travaux sont apparus au début des années 1980 au Japon, ensuite plusieurs travaux ont été lancés à travers le monde. Leurs principaux objectifs sont le développement des architectures et protocoles de communication, la standardisation et la mise en place d'applications pour améliorer la sécurité routière, la gestion du trafic et la sécurisation des données. Les applications de confort sont également traitées sans aucune négligence, leur aboutissement peut être une exigence importante pour la commercialisation des solutions de communication véhiculaire par les constructeurs automobiles.

Les consortiums les plus connus sont C2C-CC en Europe, VSCC et VIIC aux États-Unis et ASV au Japon. Nombreux sont leurs projets financés totalement ou en partie par l'Union européenne, par le département des transports américain et par le ministère de transport du Japon. Dans cette section, nous présentons les plus grands projets terminés ou en-cours [184] (figure 1.4).

Projets européens

Le consortium C2C-CC (*Car to Car Communication Consortium*) [28, 19] a été lancé par six constructeurs automobile européens en 2000. Sans aucun but économique, il est ouvert à d'autres partenaires afin de les regrouper et permettre un déploiement rapide des réseaux VANET.

En 2001, il a réalisé une démonstration utilisant le Wi-Fi pour la communication intervéhicules. Et il a démontré en 2012 lors du congrès ITS à Vienne [82] dans des conditions de circulation réelles, comment les systèmes coopératifs assistent le conducteur et conduisent à la plus grande sécurité et au confort.

L'objectif de ce consortium est d'améliorer la sécurité routière et la gestion du trafic, de développer un standard européen V2V adapté aux équipements de tous les constructeurs automobiles (WAVE), de participer à la conception d'autres standards de communication et à la validation de processus de communication, et de démontrer la faisabilité commerciale des solutions proposées.

Nombreux sont les projets liés à ce consortium, nous classons et décrivons dans cette section les projets les plus significatifs selon leurs objectifs principaux.

Proposer des applications Plusieurs travaux ont prouvé la faisabilité des applications de sécurité et de gestion de trafic dans la communication véhiculaire. Le projet CarTalk [29, 115] (2001-2004), coordonné par Daimler Chrysler, a contribué au développement d'applications sur trois axes : les fonctions d'informations et d'alertes, le contrôle des lignes longitudinales basé sur la communication et les systèmes d'assistance coopérative d'aide à la conduite.

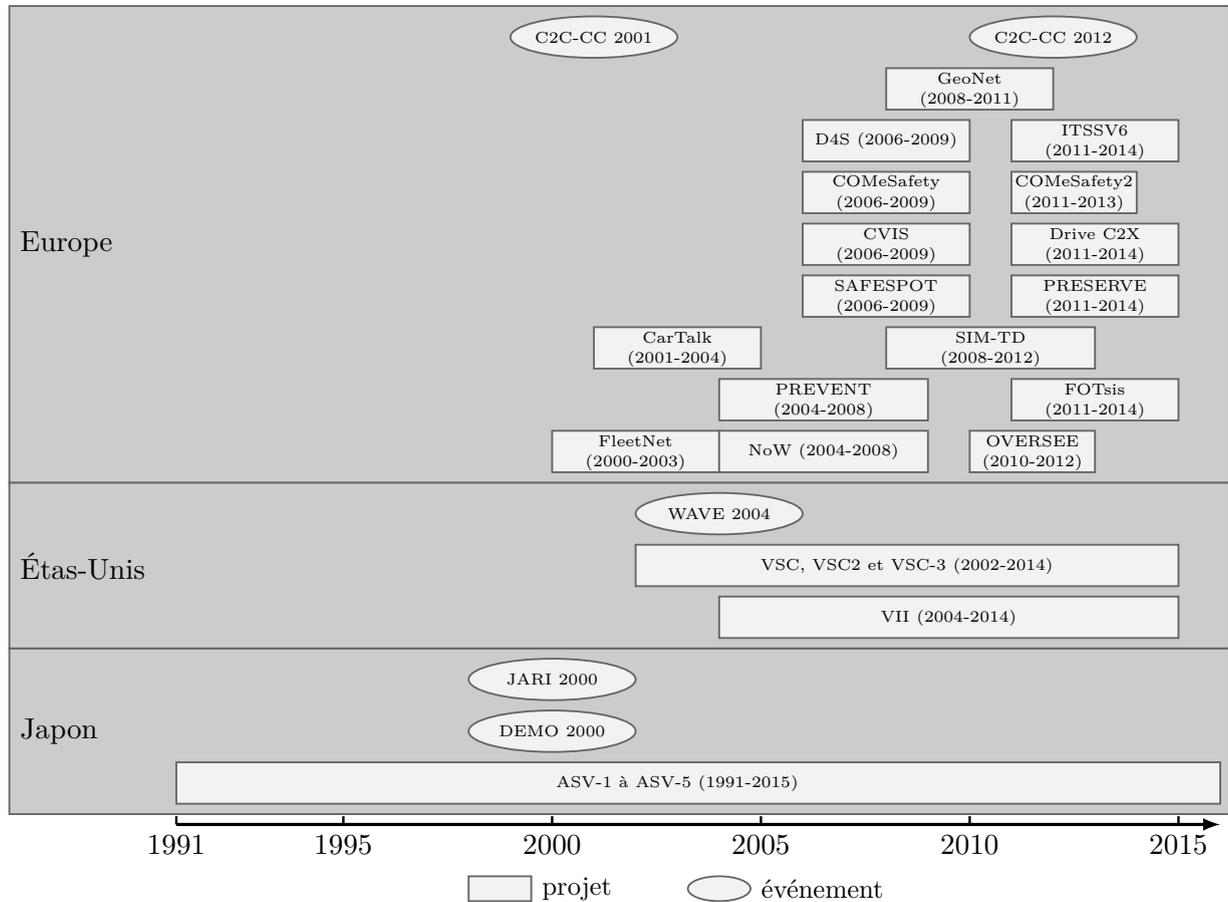


FIGURE 1.4 – Projets de recherche dans les VANET (vue d’ensemble non exhaustive inspirée de [78]).

Plus tard, le projet PReVENT (*PReVENTive and Active Safety Applications*) [138] (2004-2008), qui est un projet R&D, a mis en place plusieurs applications de sécurité routière. Son objectif est d'éviter les accidents en alertant les conducteurs des situations dangereuses et en améliorant la sécurité sur les croisements. Il a également aidé à la baisse des coûts des composants afin d'introduire les solutions proposées rapidement dans le marché. Nous citons également le système VESPA (*Vehicular Event Sharing with a mobile P2P Architecture*) [168, 40, 43], initié dans le cadre du projet D4S (*Design for Safety*) (2006-2009), il permet l'échange de différents types d'événements, afin de guider les conducteurs pour trouver une place de parking ou pour connaître l'état du trafic, ensuite le calcul d'une probabilité de rencontre permet de déterminer si un véhicule va rencontrer un événement.

Créer une architecture de communication Le premier projet européen FleetNet (*Internet on the Road*) [69, 66] (2000-2003) est un projet allemand qui a développé une plateforme pour permettre la communication véhiculaire par la technologie UMTS, l'accès à internet (V2I) qui est l'application principale de ce projet et la standardisation des solutions proposées. Le projet NoW (*Network on Wheels*) [123, 67] (2004-2008), successeur de FleetNet, a coopéré avec le consortium C2C-CC pour améliorer la sécurité des données et mettre en place des protocoles de communication véhicule-véhicule et véhicule-infrastructure basés sur les normes IEEE 802.11. Dans le projet CVIS (*Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems*) [37] (2006-2009), une solution technique permettant à tous les véhicules et les infrastructures de communiquer d'une manière continue et transparente avec une portée importante a été mise en place. Il s'agit de développer et de valider les normes de communication CALM, dans l'ambition de créer une architecture unique de communication, fournissant une interopérabilité totale, les développements réalisés se focalisent principalement sur les communications V2I. Des applications de toutes les catégories ont été également réalisées dans le cadre de ce projet, elles sont basées sur des standards ouverts, ce qui facilite leur installation et leur mise à jour. Le projet SAFESPOT (*Smart Vehicles on Smart Roads*) [142] (2006-2009) est l'homologue de CVIS pour les communications V2V. Il a développé une plateforme permettant le partage des informations concernant les événements de sécurité sur la route, les informations acquises donnent une vue d'ensemble au véhicule des événements l'entourant. L'objectif du projet GeoNet [75, 76] (2008-2011) est de développer une architecture de communication permettant l'envoi de messages en multi-sauts en V2V, et l'accès à internet et l'acquisition d'informations en V2I. Concernant la gestion de la mobilité, nous citons le projet ITSSv6 (*IPv6 ITS Station Stack*) [83] (02/2011-01/2014) dont l'objectif est de fournir une plateforme IPv6 basée sur les normes existantes développées dans les projets CVIS, SafeSpot et GeoNet. Cette plateforme est configurée différemment en fonction du type de l'entité communicante dans laquelle elle est déployée. Des travaux de standardisation européenne ont été réalisés par les projets COMeSafety (*Communication for eSafety*) (2006-2009) et son successeur COMeSafety2 [35] (2011-2013). Ces derniers ont consolidé les différents travaux européens afin de prendre en compte leurs diverses exigences comme base pour la normalisation européenne.

Tester dans des conditions réelles les solutions proposées À partir de 2010, il est devenu primordial de tester dans des conditions réelles les différentes solutions proposées dans les travaux existants. Plusieurs projets ont été lancés pour avancer sur le déploiement des services de communication véhiculaire en se basant sur l'existant. Le projet Drive C2X [51] (2011-2014) traite la sécurité et l'efficacité des réseaux véhiculaires sans négliger la durabilité et le confort. Il évalue les technologies de conduite coopérative en testant dans des conditions réelles l'interopérabilité des systèmes nationaux (tests dans divers sites en Europe) et en prenant en compte les travaux de standardisation européenne réalisés par les projets COMeSafety et COMeSafety2. L'objectif du projet PRESERVE (*Preparing Secure Vehicle-to-X Communication Systems*) [137] (2011-2014) est de rapprocher de la réalité la communication véhiculaire en proposant et testant des solutions de communication V2V et V2I de sécurité routière et de confidentialité des données. Il s'agit d'emmener ces solutions en phase de pré-déploiement en améliorant leur durabilité et réduisant leurs coûts. En plus de la sécurité de la route et la gestion du trafic, le projet allemand SIM-TD (*Safe and Intelligent Mobility - Test Field Germany*) (2008-2012) propose des services d'accès à internet et des applications liées à la position du véhicule basées sur les travaux existants, et les teste avec des scénarios réalistes. Le projet FOTsis (*European Field Operational Test on Safe, Intelligent and Sustainable Road Operation*) [68] (2011-2014) teste la capacité des infrastructures des routes sur 9 sites dans 4 pays européens (Espagne, Portugal, Allemagne et Grèce) pour le déploiement des services proposés dans les travaux existants comme la gestion des urgences et de la sécurité en cas d'incidents, le contrôle intelligent de la congestion, la planification dynamique des routes et l'évaluation de la sécurité des infrastructures. Nombreuses sont les applications proposées par tous les projets européens. Afin de les protéger des attaques actives et passives, la plateforme OVERSEE (*Open Vehicular Secure Platform*) [126] (2010-2012) agit comme un point d'accès ouvert à ces applications.

L'objectif étant d'assurer le déploiement généralisé en 2017, une phase d'expérimentation (Pilot) en grandeur réelle devrait débuter en 2014 et se terminer fin 2016. Nous citons le projet français SCOOP@F (French Cooperative System Pilot) [144] qui permettra le déploiement de 2000 véhicules et une centaine de bornes de route dans une ou deux zones très ciblées.

Projets américains

Une démonstration de WAVE a eu lieu en 2004 utilisant les communications V2V et V2I, elle a servi ensuite de base aux travaux réalisés dans les consortiums VSCC et VIIC.

Consortium VSCC Entrepris par le département des transports Américain USDOT (*US Department of Transportation*) [165], l'objectif du consortium VSCC (*Vehicle Safety Communications Consortium*) est d'évaluer les applications de sécurité dans les réseaux véhiculaires. Il a initié trois projets successifs nommés VSC [171] (2002-2005), VSC-2 [172] (ou VSC-A pour *Vehicle Safety Communications - Applications*) (2006-2009) et VSC-3 (2010-2014) et participé à la définition des exigences de sécurité et leur prise en compte dans le

DSRC. Il a estimé les bénéfices potentiels des applications de sécurité et leur faisabilité, il a fourni les données et les contributions nécessaires à l'élaboration de la normalisation. Un rapport [170] qui liste plus de 75 applications de communications véhiculaires a été établi, il a permis de classer les applications en trois catégories (section 1.2.1). Le projet VSC-3 a réuni huit fabricants automobiles pour le développement de technologies permettant : les feux de freinage électroniques d'urgence ; l'avertissement des collisions situées sur la trajectoire des véhicules, d'angles morts et des changements de voie ; la prévention qu'il ne faut pas passer ; l'assistance de circulation sur les croisements et aux virages à gauche.

Consortium VIIC Le consortium VIIC (*Vehicle Infrastructure Integration Consortium*) [169] a été formé en 2004 par des constructeurs automobiles et le USDOT. Ils ont évalué les faisabilités techniques, économiques et sociales pour le développement d'une infrastructure permettant les communications V2V et V2I, afin d'améliorer la sécurité, l'efficacité des routes et la maintenance. Ces applications sont majoritairement basées sur le DSRC. La sécurité est la priorité de ce consortium, ses applications sont variées, nous citons les systèmes de sécurité active (alertes), de réaction suite aux accidents et incidents, d'avertissement des dangers et de collecte de données pour améliorer le trafic et la sécurité des routes. Par ailleurs, ce projet fournit aux gestionnaires de la circulation les données de vitesse qu'ils peuvent utiliser pour connaître les conditions de trafic sur les autoroutes et les grands axes. Le partage de ces données aux conducteurs et la gestion du trafic peuvent augmenter considérablement l'efficacité des infrastructures routières. Et pour mieux gérer la maintenance des routes, ce projet fournit aux responsables de cette maintenance les données des capteurs telles que le niveau de lumière, la température, l'activation des essuie-glaces et le contrôle ABS (*Anti-lock Braking System*).

Projets japonais

ASV Le programme ASV (*Advanced Safety Vehicle*) [16] est une série de projets successifs soutenus par le ministère de transport du Japon, des industriels et des universitaires. Les travaux et les tests ont porté sur : les systèmes de sécurité active qui concerne l'inattention et les erreurs du conducteur tels que les systèmes d'alerte de somnolence et d'évitement automatique de collision ; les systèmes de sécurité passive tels que la protection des piétons. Ci-dessous les objectifs des différentes phases du programme ASV :

- ASV-1 (1991-1995) : étude de faisabilité technique ;
- ASV-2 (1996-2000) : recherche et développement pour l'introduction sur le marché ;
- ASV-3 (2001-2005) : développement de nouvelles technologies et popularisation des applications VANET ;
- ASV-4 (2006-2010) : défis et contributions futures à la réduction du nombre d'accidents ;
- ASV-5 (2011-2015) : poursuite des développements pour l'amélioration de la performance de la sécurité active, la conception des technologies de sécurité active et la communication des informations nécessaires pour la réceptivité sociale du projet.

DEMO 2000 DEMO 2000 [164] est une démonstration significative du 22 au 27 novembre 2000 de la conduite coopérative. L'objectif était d'évaluer la faisabilité des communications véhiculaires et de montrer la nécessité de ces technologies. La démonstration a consisté de démarrage et d'arrêt de peloton, de division de peloton, de fusion de pelotons, de détection d'obstacles et leur évitement en changeant de voie de circulation et de parcours sinueux de peloton.

JARI JARI (*Japan Automobile Research Institute*) [85, 179] est un organisme japonais sans profit, soutenu par plus de 200 industries automobiles, électriques et d'autres domaines. Ses objectifs sont d'investiguer dans la sécurité, de réaliser des recherches dans les domaines de l'automobile tels que les systèmes de transport intelligents ITS (*Intelligent Transportation System*), et de répandre les nouvelles technologies aux industries (ses membres) et à la société. Il a également participé à la normalisation internationale. Notons qu'une démonstration a eu lieu en 2000 des véhicules intelligents et des systèmes de sécurité développés.

DSSS Les systèmes DSSS (*Driving Safety Support Systems*) [52] font partie des activités de la police nationale. Leur objectif est d'avoir des rues sûres, confortables et respectueuses de l'environnement, en utilisant des technologies avancées de communication d'informations. Les systèmes principaux développés permettent d'alerter les véhicules des signaux d'arrêt en leur fournissant les positions de ces signaux et des lignes d'arrêt. Ils permettent de détecter la fin de file de véhicules circulant à une vitesse très faible, de prévenir des collisions sur les intersections non signalées et de fournir aux véhicules qui s'approchent des intersections l'état des feux de signalisation.

1.3 Fusion de données dans les réseaux ad hoc de véhicules

1.3.1 Intérêt de la fusion de données

Historiquement utilisée dans le domaine militaire, la fusion de données prend une place importante aujourd'hui dans de multiples domaines, dont celui des réseaux véhiculaires.

Elle est utilisée pour améliorer la fiabilité d'un jugement par l'apport d'une information redondante, ou pour améliorer la capacité d'interprétation par l'apport d'une information complémentaire. Elle permet de combiner des informations en provenance de sources hétérogènes, dans l'objectif d'obtenir un résultat précis et fiable et une image unifiée. La considération de multiples sources diminue la probabilité d'erreur et améliore le résultat.

L'amélioration de la performance apportée par la fusion de données se résume à quatre différentes manières d'après Mitchell [114] : améliorer la granularité dans la représentation des informations, réduire l'incertitude, augmenter la précision en éliminant les erreurs et le

bruit et permettre une vision plus complète de l'environnement.

Dans les réseaux de véhicules, les sources possibles sont diverses, par exemple les caméras, le GPS et les téléphones mobiles. En plus des intérêts cités plus haut, la fusion de données permet dans les VANET de réduire le volume des informations échangées et la consommation d'énergie. Elle est davantage importante pour les applications de sécurité, où la rapidité de calcul est essentielle pour leur bon fonctionnement. Pour toutes ces raisons, nombreuses sont les applications fusionnant des informations en provenance de diverses sources, par exemple pour assister les véhicules [118] ou éviter les collisions [110].

1.3.2 Fondamentaux de la fusion de données

Définition de la fusion de données

Plusieurs définitions de la fusion de données existent dans la littérature, celle de Wald [173] est sans doute la plus citée : « La fusion de données est un cadre formel dans lequel s'expriment les outils et les moyens permettant l'alliance des données provenant de sources diverses. Son objectif est d'obtenir des informations de qualité accrue ; la définition exacte de *qualité accrue* dépendra de l'application. ».

Différents termes sont employés dans la littérature conduisant souvent à une confusion avec la fusion de données : la fusion d'information [39] porte la même signification que la fusion de données ; les termes « fusion multi-capteurs » ou « fusion de capteurs », utilisés dans les ouvrages [174, 77, 114, 105], sont un cas particulier de la fusion de données où les informations fusionnées proviennent des capteurs ; l'agrégation de données fait référence à la capacité de résumer les informations [166] ; l'intégration de données [109] est employée pour indiquer une interaction des données fusionnées avec l'environnement. Le schéma 1.5, extrait de [120], synthétise la relation entre les différents termes employés.

Classification des données fusionnées

Dans la fusion de données, les informations peuvent être classées en trois catégories selon les relations entre les sources [59, 114] : complémentaires, redondantes ou coopératives.

Elles sont **complémentaires** si les sources sont indépendantes, et informent de différentes parties de la situation globale. En général, le résultat obtenu donne une information plus complète de l'image observée. Par exemple, une source peut informer d'un embouteillage sur une première portion de la route et une autre source complète avec l'information concernant une deuxième portion de la route, la fusion de ces données emmène à une vue globale plus complète de cette situation.

Les informations sont considérées **redondantes** quand des sources distinctes avertissent de la même propriété. La fusion de ces données permet d'améliorer la confiance associée à cette information et de réduire l'incertitude et la probabilité d'erreur. Dans les

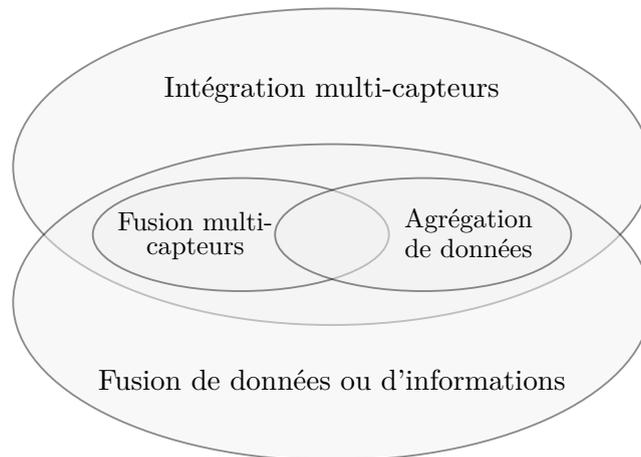


FIGURE 1.5 – Illustration des relations entre les différents termes employés pouvant conduire à une confusion avec la fusion de données.

réseaux ad hoc, cela permet d’empêcher la transmission de données redondantes, ce qui peut conduire à la saturation du réseau.

Les informations peuvent être **coopératives** quand la fusion des données en provenance de différentes sources permet d’obtenir une nouvelle information indisponible sinon, plus complète et en général plus complexe. Prenons l’exemple de deux capteurs fournissant chacun une image à deux dimensions avec un angle de vue légèrement différent, la combinaison des deux images permet une vision à trois dimensions plus riche de la scène observée, et indisponible sans l’emploi de la fusion.

Dans cette thèse, nous nous intéressons aux informations redondantes et complémentaires concernant les événements sur la route.

Révision versus mise à jour des croyances

La prise en compte d’une nouvelle information est modélisée par une rectification ou une mise à jour.

La révision des croyances [74, 12] consiste à réviser la connaissance en la corrigeant ou la renforçant avec des nouvelles connaissances.

La mise à jour des croyances [94, 103, 56], également appelée la « mise à jour du monde », indique une évolution du contexte et une possibilité de changement du monde. Toutes les croyances sont donc modifiées en accordant la priorité à l’information la plus récente.

Quand la croyance est réduite à un seul monde possible, la révision et la mise à jour sont équivalentes. Dans les autres cas, elles sont incompatibles. Les différences entre ces deux modélisations complémentaires sont décrites dans [157].

Architectures centralisée et décentralisée de fusion de données

La fusion de données peut être centralisée ou décentralisée [62, 114, 105].

Une architecture **centralisée** possède un seul centre pour la fusion des données, avec une capacité de calcul très importante lui permettant de gérer un très grand nombre d'informations. Dans les réseaux VANET, les véhicules communiquent les données au centre de fusion, qui se charge ensuite de leur gestion afin d'envoyer le résultat obtenu aux véhicules, c'est le cas en général du mode de communication V2I. La figure 1.6 illustre la fusion de données centralisée. Dans cette architecture, les véhicules n'ont pas besoin d'avoir une capacité de calcul importante. L'avantage de cette fusion est la capacité d'obtenir une vue d'ensemble de la situation à partir de toutes les informations disponibles. Par contre, l'utilisation d'un centre unique de fusion peut engendrer une défaillance sur tout le système dès le moindre problème rencontré, cela peut par exemple se produire quand le module de fusion reçoit plus de données qu'il ne peut traiter. La consultation et le transfert de données volumineuses est un exemple d'application pouvant utiliser le mode centralisé, qui peut répondre aux problématiques de perte de paquets, et gérer au mieux les informations incomplètes.

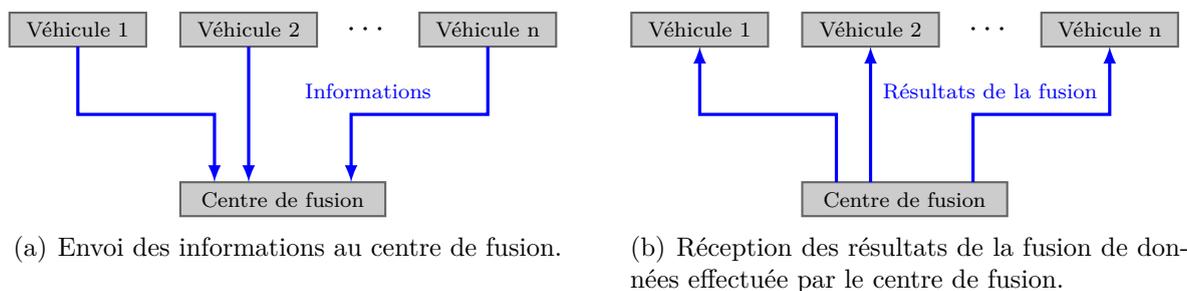


FIGURE 1.6 – Fusion de données centralisée.

Dans la fusion de données **décentralisée** ou **distribuée**, plusieurs modules de fusion peuvent coexister afin de gérer localement la fusion de données. Cette architecture est plus complexe, mais adaptée aux réseaux de véhicules, où les nœuds ont des capacités de calculs individuelles suffisantes leur permettant de gérer localement l'intelligence de la fusion de données. Notons que dans les applications liées à la sécurité routière telle que l'alerte du freinage soudain, ce mode de fusion est incontournable. Cependant, les véhicules reçoivent des informations fusionnées des autres sources pouvant avoir différentes interprétations possibles et conduisant parfois au conflit, en plus des problèmes de redondance peuvent se produire, d'où l'importance des méthodes de fusion dans la gestion des informations.

Méthodes pour fusionner les données

Comme dans la majorité des domaines, les méthodes basées sur l'inférence sont généralement utilisées pour fusionner les informations quand une décision doit être prise dans les réseaux ad hoc de véhicules.

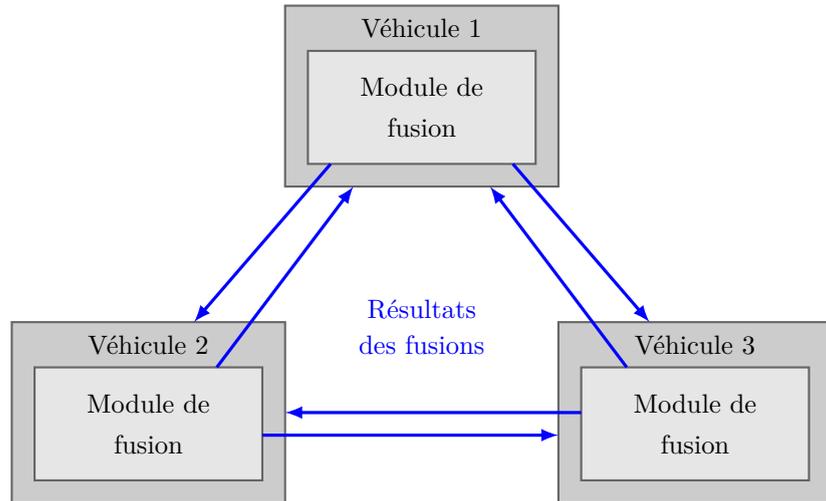


FIGURE 1.7 – Fusion de données décentralisée.

La méthode classique est l'inférence Bayésienne [81] basée sur la théorie des probabilités. Elle permet de combiner les informations en utilisant principalement le théorème de Bayes représentant et traitant des probabilités conditionnelles pour exprimer l'incertitude des données.

Soit $\{H_1, H_2, \dots, H_N\}$ l'ensemble des états possibles d'un système, et $\{E_1, E_2, \dots, E_M\}$ l'ensemble des évidences. Avant qu'au moins une évidence ne soit observée, $P(H_n)$ représente la probabilité a priori de H_n qui est la croyance en H_n en l'absence de toute autre connaissance. Après l'observation d'une évidence, la notation $P(H_n|E_m)$ exprime la probabilité a posteriori de H_n sachant E_m , elle est donnée par le théorème de Bayes :

$$P(H|E) = \frac{P(E|H)P(H)}{P(E)} . \quad (1.28)$$

Notons que les hypothèses sont exclusives et exhaustives.

La théorie de Dempster-Shafer, décrite dans la section 1.1, est de plus en plus utilisée pour la fusion d'information. Ses avantages par rapport à l'inférence Bayésienne sont nombreux. Premièrement, l'inférence Bayésienne nécessite des connaissances a priori $P(E)$ et $P(E|H)$, qui ne sont pas toujours facilement disponibles [21]. La théorie des fonctions de croyance est plus flexible, elle permet aux sources de fournir des informations avec différents niveaux de détail. Contrairement à la théorie des fonctions de croyance, l'inférence Bayésienne ne permet pas de représenter la connaissance partielle, l'ignorance totale est remplacée par l'équiprobabilité ce qui peut engendrer une incohérence dans les résultats. En outre, la théorie des probabilités ne permet pas la modélisation implicite du conflit qui peut être souvent présent dans les informations créés par les sources hétérogènes des VANET et échangées entre les véhicules.

D'autres méthodes existent dans la littérature permettant la fusion des données im-

parfaites et utilisées dans les VANET, comme la logique floue [182] permettant la prise en compte de l'imprécision et la théorie des possibilités [183, 53] modélisant l'imprécision et l'incertitude. Le lecteur intéressé peut consulter [105, 97] pour plus d'informations sur les méthodes employées dans la fusion de données.

1.3.3 Travaux utilisant des fonctions de croyance dans les véhicules intelligents

La théorie des fonctions de croyance est de plus en plus utilisée dans les VANET. Les principaux travaux sont présentés dans cette section.

Gestion des informations concernant des événements sur la route

Dans [32], Cherfaoui et al. ont fait un tour d'horizon sur la gestion des événements incertains sur la route dans les VANET utilisant des fonctions de croyance. Ces travaux supposent que chaque véhicule soit équipé de systèmes permettant de détecter les événements sur la route. Les cartes sont communes à tous les véhicules, elles sont discrétisées en segments de routes, et chaque segment de route a un identifiant unique. Pour un type d'événement, un seul événement peut être considéré sur un segment de route.

Les messages sont créés par les composants intelligents des véhicules (capteurs) pour informer de la présence d'un événement. Un message créé ou échangé comporte principalement le type de l'événement, l'identifiant du segment de route, la localisation GPS, le véhicule source ayant détecté l'événement, la date de perception, la fonction de masse, l'information indiquant si le message est un nouveau message ou s'il résulte d'une fusion de messages, et la date de la dernière mise à jour du message. Les fonctions de masse des messages sont définies sur le cadre de discernement $\{0, 1\}$, où $\{0\}$ signifie que l'événement existe et $\{1\}$ signifie que l'événement n'existe pas.

Les messages sont affaiblis pour prendre en compte leur vieillissement, plus la différence entre la date actuelle et la date de la dernière mise à jour est importante, plus le taux d'affaiblissement est élevé.

Ils sont ensuite combinés en utilisant la règle de Dempster-Shafer s'ils sont indépendants, et la règle de combinaison conjonctive prudente sinon. Deux messages sont considérés indépendants dans les deux cas suivants :

- les véhicules qui ont envoyé les messages sont différents et les messages concernés n'ont pas été modifiés, c'est-à-dire ils sont créés par les sources indiquées dans les messages ;
- les véhicules qui ont envoyé les messages sont identiques mais la date de perception est différente, c'est-à-dire le véhicule a réalisé deux différentes acquisitions.

Concernant la gestion de la spatialité, les premiers travaux utilisant des fonctions de

croissance datent de 2001 [101]. Afin de déterminer la croyance concernant la présence d'un type d'événement sur un point, Lang et Muller considèrent toutes les informations l'entourant (critère de distance, dépend du type d'événement) : ils affaiblissent les informations en fonction de la distance les éloignant du point concerné. Comme le montre la figure 1.8, les événements concernant un événement spatial peuvent porter sur des points plus ou moins distants les uns des autres. Lang et Muller proposent d'affaiblir l'influence sur le point observé des deux points qui sont proches en distance. Dans l'exemple illustré dans la figure 1.8, l'influence des points x_1 et x_2 sur le point o est réduite en utilisant l'affaiblissement. La règle de combinaison de Dempster-Shafer est ensuite utilisée pour combiner toutes les connaissances.

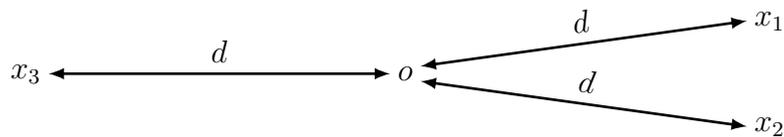


FIGURE 1.8 – Illustration de la dispersion des localisations des sources [101].

Cherfaoui et al. [32] ont repris les travaux de Lang et Muller [101] pour la gestion des événements spatiaux en utilisant la règle de combinaison conjonctive prudente pour combiner deux messages présents sur le même segment de route, et la règle de combinaison de Dempster-Shafer sinon. Dans ces travaux, à chaque instant : pour chaque segment de route, les messages le concernant sont groupés, ils sont affaiblis selon leur âge, leur influence sur les autres segments de route est obtenue et ils sont ensuite combinés.

Détection d'obstacles et d'objets à proximité

Dans beaucoup d'applications comme le freinage automatique et la conduite coopérative, le véhicule reçoit en provenance des capteurs différentes informations concernant la présence d'obstacles qu'il doit analyser afin de prendre une décision. Ces obstacles peuvent être des véhicules, des piétons ou aussi des événements sur la route comme des embouteillages. Plusieurs travaux ont utilisé des fonctions de croyance pour estimer la présence des objets à proximité.

Dans [117], Munz et Dietmayer comparent l'utilisation de la théorie de Dempster-Shafer et celle des probabilités. À chaque instant, le système proposé évalue la probabilité d'existence d'un objet. Avec la théorie de Dempster-Shafer, les auteurs ont modélisé le cadre de discernement avec trois hypothèses possibles : aucun objet, un objet quelconque mais non pertinent et un objet pertinent. Ils ont montré une amélioration significative des résultats avec cette théorie. Cela est dû principalement à la non nécessité de connaissances a priori et à la modélisation explicite de l'ignorance.

Dans l'objectif d'améliorer la robustesse et la fiabilité des systèmes de conduite assistée, l'article [11] propose l'utilisation des fonctions de croyance pour fusionner les données des

capteurs. Afin d'estimer la probabilité d'existence, les états « existe » et « n'existe pas » sont les hypothèses possibles proposées du cadre de discernement. Les auteurs ont montré dans cet article la richesse et la flexibilité des fonctions de croyance pour la représentation et la gestion de l'incertitude.

Les travaux de [185] ont montré la possibilité d'atteindre une bonne détection des embouteillages avec la théorie de Dempster-Shafer, tout en réduisant considérablement la charge du réseau. Des informations en provenance de divers véhicules concernant un avis de congestion (oui ou non) sur une rue sont combinées pour estimer l'état du trafic correspondant.

Construction de carte

Dans [127], Pagac et al. s'intéressent à la construction de carte dans un environnement de véhicules autonomes à partir de données en provenance de différents capteurs. Ils ont comparé et testé avec des données réelles la théorie des fonctions de croyance et l'inférence Bayésienne. Ils ont représenté l'espace par une grille, chaque portion discrétisée de la carte peut être caractérisée en deux états : vide ou plein. La théorie des fonctions de croyance a montré son utilité et ses avantages en fournissant un meilleur résultat, cela pour les raisons suivantes : la possibilité d'avoir plusieurs propositions à la fois et la non nécessité des connaissances a priori.

Ces travaux ont été ensuite développés dans [100], qui distingue les cinq états possibles suivants pour gérer l'environnement dynamique de mobilité dans les VANET : vide, infrastructure (bâtiments), objets en mobilité, objets temporairement immobiles et infrastructure non cartographiée. Kurdej et al. ont montré l'utilité des fonctions de croyance et leur richesse. Notamment, ils ont utilisé l'affaiblissement contextuel introduit et développé dans [113, 111] pour contrôler la rémanence des cellules, c'est-à-dire la variation de l'information avec le temps concernant la présence dans l'environnement.

Détection des menaces

Afin d'éviter l'inondation du réseau par des fausses informations, plusieurs travaux se sont intéressés à la détection de l'intrusion et des véhicules malveillants en utilisant la théorie des fonctions de croyance. Dans [31], des nœuds observateurs associent un degré de confiance à chacun des autres véhicules, le cadre de discernement distingue le véhicule fiable du véhicule non fiable. Les véhicules observateurs communiquent ces informations, le résultat de la fusion est obtenu dans chaque véhicule en combinant avec la règle de Dempster-Shafer les fonctions de masse des différentes observations. Chen et Venkataramanan montrent l'utilité de cette théorie en la comparant au vote majoritaire où l'avis retenu est celui de la majorité, et à la somme pondérée où la moyenne des confiances données par les différents véhicules est retenue. Ils n'ont pas comparé cette théorie à l'inférence Bayésienne, car les connaissances a priori ne sont pas disponibles.

Se basant sur les travaux présentés dans [31], Raya et al. [140] ont proposé une architecture sécurisée pour analyser les menaces dans les VANET. Les auteurs considèrent que la relation de confiance entre les entités est nécessaire mais non suffisante, et proposent d'étendre la notion de confiance aux données, sachant que la confiance ne résulte pas d'une seule source et cela dépend généralement de l'application. En plus, les changements fréquents perçus dans les réseaux sont pris en compte, les auteurs prennent l'exemple d'une alerte comme un accident qui doit être diffusée aux autres nœuds le plus rapidement possible, mais pas plus longtemps que le temps de sa présence dans la réalité. Le système proposé est composé : d'un ensemble de tous les événements possibles dans l'environnement, sachant qu'il peut être différent selon l'application et d'un ensemble de tous les nœuds pouvant signaler des événements, classés selon leur type. Par défaut, une valeur de confiance est définie pour chaque nœud. La confiance d'un rapport donné par un nœud dépend de la confiance que le nœud a attribué à un événement, de la légitimité du nœud et des nouveaux attributs du nœud comme sa localisation. Les auteurs ont implémenté et comparé la théorie de Dempster-Shafer, l'inférence Bayésienne et le vote. Ils ont montré l'utilité des fonctions de croyance pour la gestion de la confiance dans les réseaux de véhicules, qui sont plus adaptées selon les auteurs que l'inférence Bayésienne à ces problématiques, tout en respectant les délais très courts des VANET, même si les deux techniques peuvent être utilisées.

El Zoghby et al. [60] ont développé une approche permettant de détecter les nœuds malveillants dans les réseaux de véhicules. Un véhicule peut évaluer un autre véhicule en tant que faux nœud ou vrai nœud, les informations reçues des différents véhicules sont ensuite combinées. La règle de Dempster-Shafer est utilisée quand le message reçu est indépendant des messages précédents et il ne s'agit pas d'un résultat de fusion. La règle de combinaison conjonctive prudente est employée sinon, cela permet de considérer une seule fois la même information.

Dans [57], Ducourthial et al. ont proposé une méthode de fusion des données en provenance de différents véhicules pour attribuer une confiance aux nœuds voisins et évaluer la pertinence des informations reçues. Les auteurs utilisent la règle de Dempster-Shafer pour fusionner les informations des nœuds qui sont à un seul saut. L'opérateur prudent est employé pour combiner avec les informations des nœuds plus distant car ces derniers ont déjà pris en compte dans la fusion les informations des nœuds qui sont à un seul saut. L'affaiblissement est employé pour prendre en compte la distance entre les nœuds et le vieillissement des messages. Le résultat de la fusion est échangé entre les véhicules.

1.4 Conclusions

Un résumé de la théorie de Dempster-Shafer a été présenté dans ce chapitre. Cette théorie permet la représentation et la fusion des informations imparfaites ; elle comprend plusieurs opérateurs de combinaison permettant de s'adapter à la fiabilité et l'indépendance des informations. Lorsqu'une décision doit être prise, une fonction de probabilité peut être obtenue.

Une vue d'ensemble des réseaux de véhicules a été présentée. Ces réseaux sont très dynamiques, de nature très hétérogène et suscitent un intérêt considérable pour offrir une meilleure sécurité routière et réduire les problèmes d'écologie et d'encombrement de trafic.

Les fondamentaux de la fusion de données ont été présentés, pour finir avec une focalisation sur les travaux utilisant des fonctions de croyance pour fusionner les données dans les VANET.

De nombreux travaux ont comparé la théorie de Dempster-Shafer à d'autres méthodes, principalement à l'inférence Bayésienne, pour la fusion des informations en provenance de sources hétérogènes. Plusieurs différences ont mis en évidence l'intérêt des fonctions de croyance dans l'environnement véhiculaire.

La théorie des fonctions de croyance permet de gérer toutes les sortes d'imperfection, comme le conflit, ce qui est un atout important de cette théorie pour modéliser les informations en provenance de sources distinctes dans la communication inter-véhicules. En plus, contrairement à la théorie des probabilités, utilisée historiquement pour la fusion de données, la théorie de Dempster-Shafer permet de représenter l'incertitude sous la forme d'ignorance partielle ou totale. Les fonctions de croyance permettent aux sources de fournir des informations avec différents niveaux de détail en manipulant des sous-ensembles plutôt que des singletons. Dans l'inférence Bayésienne, pour une information, un nœud doit choisir entre une attitude positive ou une attitude négative, en plus la nécessité de connaissances a priori est très contraignante dans l'environnement des VANET, son utilisation est en conséquence parfois impossible.

Enfin, la flexibilité et la richesse de la théorie de Dempster-Shafer permet de conclure sur son grand potentiel dans les réseaux de véhicules.

Dans cette thèse, cette théorie est utilisée pour gérer au mieux différents types d'événements sur la route dans un environnement sans infrastructure où chaque véhicule possède son propre module de fusion.

Chapitre 2

Modèles pour gérer les événements locaux

Sommaire

2.1	Méthodes proposées	56
2.1.1	Description générale des méthodes	56
2.1.2	Choix des messages gardés dans la base des véhicules	60
2.1.3	Emploi de la mise à jour du monde	67
2.1.4	Vieillessement des messages	69
2.1.5	Différences entre les méthodes proposées et celles connues précédemment	70
2.2	Expérimentations	71
2.2.1	Simulateur	71
2.2.2	Adéquation à la réalité	73
2.2.3	Scénarios	75
2.3	Conclusions	94

Les événements sur la route peuvent avoir une spatialité plus ou moins étendue. Par exemple, un accident est un événement local, présent sur un point précis de la carte, contrairement aux brouillards qui sont étendus géographiquement. Dans le but d'apporter aux conducteurs les connaissances les plus proches possibles de la réalité pour atteindre une conduite intelligente et sûre, les travaux réalisés traitent différemment et séparément les événements locaux et les événements étendus, qui n'ont pas les mêmes caractéristiques.

Plusieurs modèles sont proposés et comparés dans ce chapitre pour gérer les informations imparfaites échangées entre les véhicules concernant des événements locaux, dans un environnement sans infrastructure, et en utilisant des fonctions de croyance. Ces travaux ont fait l'objet des publications [27, 23, 25, 24].

Ce chapitre est composé de trois sections. La première présente six méthodes permettant de gérer les événements locaux dans les réseaux de véhicules. Les tests réalisés ainsi que

les résultats sont détaillés dans la deuxième section. Enfin, les conclusions sont présentées dans la dernière section.

2.1 Méthodes proposées

Dans un environnement sans infrastructure, où chaque véhicule possède une base de données de messages et son propre module de fusion (figure 2.1), six méthodes fondées sur des fonctions de croyance sont proposées dans cette section pour gérer les événements locaux.

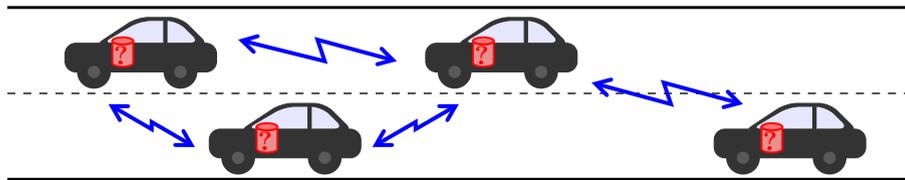


FIGURE 2.1 – Illustration de l’environnement : sans infrastructure, chaque véhicule possède une base de données de messages et son propre module de fusion.

Ces méthodes diffèrent selon le choix de garder les messages initiaux ou seulement le résultat de la fusion, la stratégie de vieillissement des messages et l’emploi de la mise à jour du monde.

Dans la section 2.1.1, une description générale des méthodes est exposée. Dans les sections 2.1.2 à 2.1.4, les stratégies et mécanismes différenciant les méthodes sont détaillées. Les différences entre les méthodes proposées et celles connues dans la littérature sont présentées dans la section 2.1.5.

2.1.1 Description générale des méthodes

Format des messages créés

Les véhicules échangent des messages informant des événements sur la route, chaque message fournit des informations concernant un événement.

Un véhicule peut créer un message informant qu’un nouvel événement est présent en créant un premier message concernant cet événement dans sa base. Si les informations contenues dans la base d’un véhicule informent de la présence d’un événement situé à sa proximité, il peut créer un message confirmant ces informations s’il perçoit l’événement ou les niant s’il ne le perçoit pas. Dans ce dernier cas, il s’agit possiblement d’un événement disparu.

Un message créé M est un 5-uplet (S, t, d, ℓ, m) informant qu’un événement de type t est présent ou n’est pas présent à la localisation ℓ , à la date d et avec une croyance m . Il

est décrit dans le tableau 2.1. Chaque attribut $x \in \{S, t, d, \ell, m\}$ du message M sera noté $M.x$.

Tableau 2.1 – Attributs des messages créés.

Attribut	Description
S	Source <i>ayant créé</i> le message concernant l'événement.
t	Type de l'événement.
d	Date et heure de <i>création</i> du message par S informant de la présence de l'événement.
ℓ	Localisation de l'événement telle que S la perçoit.
m	Fonction de masse représentant la confiance de S concernant la présence de l'événement.

Prêtons attention aux remarques et informations suivantes :

- $M.S$ est le véhicule source ayant créé le message M informant de la présence ou de l'absence de l'événement. Il ne s'agit pas forcément de l'émetteur du message M .
- Différents types d'événements peuvent être considérés, comme un accident ou une place de parking.
- $M.d$ est la date de perception de l'événement par la source $M.S$. Elle correspond à la date à laquelle $M.S$ a créé le message, ce n'est généralement pas la date à laquelle le message M est reçu.
- $M.\ell$ est la localisation de l'événement signalé par le message M telle que la source $M.S$ la perçoit.
- La fonction de masse $M.m$ d'un message créé ou reçu est une fonction de masse simple définie sur le cadre de discernement $\Omega = \{\exists, \bar{\exists}\}$ où :
 - \exists signifie que « l'événement de type $M.t$, est présent à la date $M.d$ et à la localisation $M.\ell$. » ;
 - et $\bar{\exists}$ signifie que « l'événement de type $M.t$, n'est pas présent à la date $M.d$ et à la localisation $M.\ell$. ».

Un message informant de la présence d'un événement vérifie $M.m(\{\exists\}) = \eta$ et $M.m(\{\Omega\}) = 1 - \eta$, alors qu'un message informant de l'absence d'un événement vérifie $M.m(\{\bar{\exists}\}) = \eta$ et $M.m(\{\Omega\}) = 1 - \eta$, où η représente la confiance donnée par la source $M.S$ associée à la présence ou à l'absence de l'événement.

Création des messages

Les conducteurs signalent un événement en saisissant le type $M.t$ de l'événement, la présence ou non de l'événement, la croyance correspondante $M.m(\{\exists\})$ s'il perçoit l'événement ou $M.m(\{\bar{\exists}\})$ s'il ne le perçoit pas alors qu'il est présent dans sa base (événement disparu ou mauvaise information dans sa base).

La figure 2.2 donne un exemple d'interface de saisie des événements où le véhicule de couleur verte signale un accident présent à sa droite en y associant une croyance égale à 0.6.

Les véhicules sont supposés équipés d'un dispositif de localisation, par exemple d'un GPS, et la date $M.d$ et la localisation $M.l$ sont générées automatiquement par le GPS dès que le conducteur crée un message concernant un événement. Notons que les applications concernant des informations de trafic dans les VANET sont basées sur les positions des véhicules [119]. La localisation générée est celle du véhicule et non celle de l'événement, elle peut donc être mieux précisée. Par exemple, comme illustré dans la figure 2.2, le conducteur peut indiquer la localisation de l'événement par rapport à son véhicule : dans sa direction, dans la direction opposée, dans la rue à sa droite ou dans la rue à sa gauche. La localisation de l'événement peut ensuite être calculée par rapport à la localisation du véhicule.

Notons que la localisation exacte de l'événement pourrait être obtenue automatiquement par des capteurs si le véhicule en disposait.



FIGURE 2.2 – Exemple d'interface de saisie des événements où le véhicule de couleur verte signale un accident présent à sa droite et y associe une croyance égale à 0.6.

Discrétisation de la carte

Dans le modèle proposé, les voies de circulation des cartes sont discrétisées en petites zones rectangulaires appelées « briques » de largeur égale à celle des voies de circulation et de longueur fixe.

Ce découpage est commun à tous les véhicules. Il dépend du type d'événement. Par exemple, la longueur des briques pour les accidents est supérieure à celle pour les places de parking. Cela permet une consommation plus modérée de la bande passante et une économie de la mémoire interne. La longueur d'une brique est notée $LonB_t$, elle est différente en fonction du type d'événement.

La figure 2.3 illustre un exemple d'une carte où les voies de circulations sont formées de cinq briques et deux accidents sont présents (briques de couleur rouge).

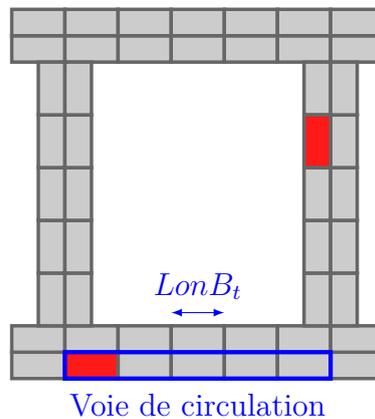


FIGURE 2.3 – Exemple de découpage d’une carte où les voies de circulations sont formées de cinq briques et sur laquelle deux accidents sont présents (briques de couleur rouge).

Obsolescence des messages

Dès qu’un message possède une date de perception de l’événement trop ancienne, il est supprimé. Pour ce faire, un seuil $Suppr_t$ dépendant du type t de l’événement est défini, et tout message $M_{e,i}$ tel que $\Delta(date_actuelle, M_{e,i}.d) > Suppr_{M_{e,i}.t}$ avec Δ une distance et $date_actuelle$ la date et l’heure actuelles, est supprimé.

Prenons l’exemple du type d’événement « accident » : on suppose qu’on a appris d’un historique d’accidents dans une ville que la durée D d’un accident suit une loi normale $D \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ où μ est son espérance (la moyenne) et σ son écart type (σ^2 est sa variance) ; le seuil d’obsolescence $Suppr_t$ est choisi tel que $P(D \leq Suppr_t) = 99\%$, il est donc obtenu par $Suppr_t = \mu + u_{.99} * \sigma$, où $u_{.99}$ est le 99^e centile de la loi normale centrée réduite, il vaut 2.3263 [8].

Résumé des méthodes proposées

Un résumé des méthodes proposées est exposé dans le tableau 2.2.

Dans les troisième et quatrième méthodes, les véhicules gardent dans leurs bases uniquement la fusion obtenue pour chaque événement et seul le résultat de cette fusion est échangé avec les véhicules voisins. Dans les autres méthodes, chaque véhicule garde dans sa base et communique les messages initiaux et construit localement sa propre vision de la réalité, le résultat de la fusion n’est pas échangé avec les autres véhicules. Ces deux stratégies de gestion des messages dans la base des véhicules sont exposées dans la section 2.1.2.

Dans les cinquième et sixième méthodes, la mise à jour du monde est considérée et seuls les messages postérieurs à la dernière mise à jour du monde sont gardés dans la base des véhicules et communiqués. Ce mécanisme est décrit dans la section 2.1.3.

Tableau 2.2 – Résumé des méthodes proposées pour gérer les événements locaux.

Méthode	Combinaison
1 Garder les messages initiaux, affaiblir	Conjonctive
2 Garder les messages initiaux, renforcer	
3 Garder le résultat de la fusion, affaiblir	Conjonctive ou prudente
4 Garder le résultat de la fusion, renforcer	
5 Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, affaiblir	Conjonctive
6 Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, renforcer	

Deux stratégies de vieillissement des messages sont proposées. La première est l'affaiblissement qui consiste à ignorer la présence ou l'absence des événements avec le temps. La seconde est le renforcement vers l'absence de l'événement ; cette stratégie suppose que les événements disparaissent avec le temps. Ces mécanismes de vieillissement sont décrits dans la section 2.1.4.

2.1.2 Choix des messages gardés dans la base des véhicules

Dans les travaux réalisés dans cette thèse, chaque véhicule a son propre module de fusion. Deux stratégies d'envoi des données sont utilisées dans les méthodes proposées, elles sont détaillées dans cette section.

La première consiste à envoyer aux véhicules toutes les informations créées ou reçues et non le résultat de la fusion. Les messages initiaux sont donc échangés et gardés dans la base des véhicules, la fusion sert uniquement à donner au conducteur une synthèse de la situation de la route. Cela permet à chaque véhicule de les traiter le plus finement possible et construire localement sa propre vision de la réalité. Cette approche est un compromis entre les architectures de fusion centralisée et décentralisée décrites dans la section 1.3.2. Chaque véhicule a son propre module de fusion de données (architecture décentralisée). Il crée sa vision de la situation de la route à partir des messages initiaux créés ou reçus non modifiés par la fusion de données (architecture centralisée).

La deuxième architecture proposée est complètement décentralisée, où chaque véhicule échange le résultat obtenu de la fusion et les messages créés ou reçus ne sont plus gardés dans la base des véhicules une fois fusionnés. Pour chaque événement sur la route, un véhicule garde uniquement un seul message résultant de la fusion de tous les messages créés ou reçus informant du même événement.

Garder les messages initiaux dans la base des véhicules

Base interne des véhicules Chaque véhicule possède une base interne de messages qu'il a soit reçus soit créés. La figure 2.4 présente la base interne d'un véhicule v . Un événement e correspond à un couple (t, b) où t est son type et b est la brique sur laquelle il est présent. Dans la base d'un véhicule, tous les messages concernant le même événement e sont groupés ensemble.

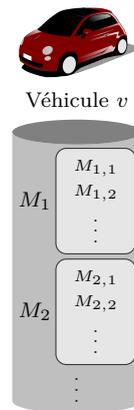


FIGURE 2.4 – Base interne de messages d'un véhicule.

Deux messages correspondent au même événement s'ils sont du même type t et si leurs localisations appartiennent à la même brique b .

Envoi des messages Un véhicule peut soit diffuser un nouveau message, soit transférer un message reçu. La figure 2.5 illustre un exemple d'envoi et de transfert d'un message.



FIGURE 2.5 – Illustration de l'envoi et du transfert d'un message.

Les véhicules ne diffusent pas les informations fusionnées. Chaque véhicule réalise sa propre synthèse à partir de messages simples portant sur un avis de présence d'un événement par une seule source.

Gestion des messages reçus Dans la base d'un véhicule, tous les messages $M_{e,1}, M_{e,2}, \dots$ concernant le même événement e sont groupés ensemble dans une même table notée M_e . Plusieurs messages peuvent donc correspondre au même événement $e = (t, b)$ dans la base interne d'un véhicule. Lorsqu'un véhicule reçoit un message Mr , les traitements séquentiels schématisés dans la figure 2.6 sont réalisés. Ils sont détaillés dans les paragraphes suivants.

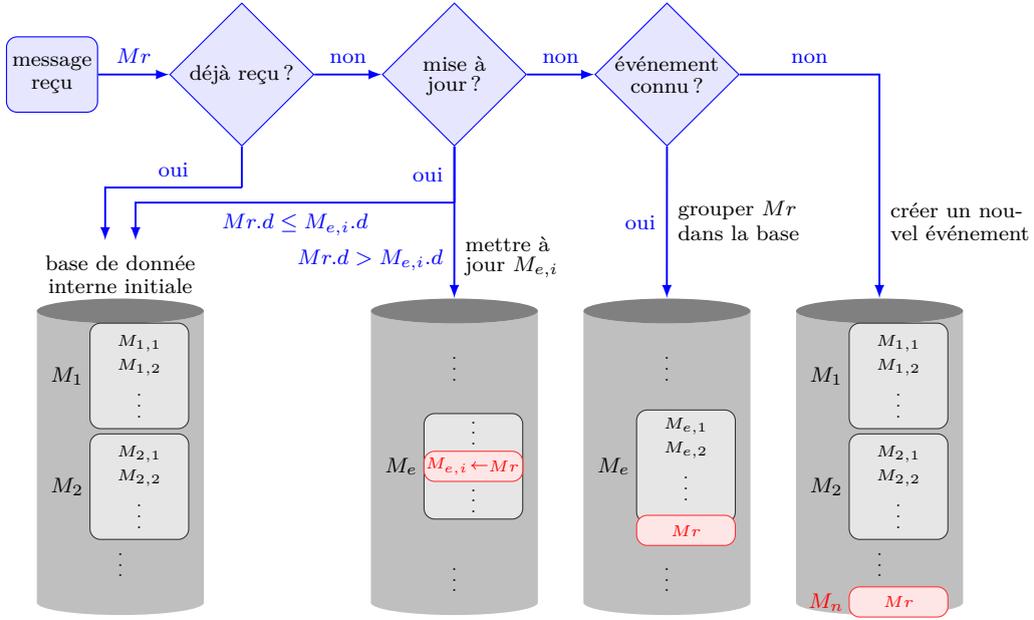


FIGURE 2.6 – Gestion des messages reçus quand les messages initiaux sont gardés dans la base des véhicules.

Cas d'un message déjà reçu S'il s'agit d'un message déjà reçu, c'est-à-dire si $Mr.x = M_{e,i}.x \forall x$, on ne le considère pas. Sinon on passe à l'étape suivante.

Cas d'une mise à jour La même source peut diffuser un message et ensuite le mettre à jour, c'est-à-dire envoyer un nouveau message correspondant au même événement pour corriger les informations envoyées précédemment. Le numéro de la brique pour un type d'événement t dans laquelle se situe une localisation ℓ est noté $Brique_t(\ell)$. Un message reçu Mr est considéré comme une mise à jour d'un message $M_{e,i}$ présent dans la base du véhicule si $Mr.S = M_{e,i}.S$, $Mr.t = M_{e,i}.t$, $Brique_{Mr.t}(Mr.\ell) = Brique_{M_{e,i}.t}(M_{e,i}.\ell)$ et $Mr.d > M_{e,i}.d$. Notons qu'un message $M_{e,i}$ présent dans la base du véhicule peut être une mise à jour du message reçu Mr . Dans ce cas, on ne considère pas ce dernier. La figure 2.7 illustre un exemple de mise à jour d'un message : la date d_2 présente dans la mise à jour du message est plus récente que la date d_1 , les lieux ℓ_1 et ℓ_2 appartiennent à la même brique pour le type d'événement t , les masses m_1 et m_2 peuvent être différentes. Ainsi, si le message reçu est une mise à jour d'un message existant dans la base du véhicule il le remplace. Si un des messages existants dans la base du véhicule est une mise à jour du message reçu on ne prend pas ce dernier en considération car la méthode ne prend en compte que la version la plus récente du message. Sinon on passe à l'étape suivante.

Grouper les messages associés au même événement Le message reçu Mr est ajouté dans la base du véhicule s'il concerne un événement déjà identifié. On considère que le message Mr correspond à un événement déjà identifié $e = (t, b)$ s'il est du même type

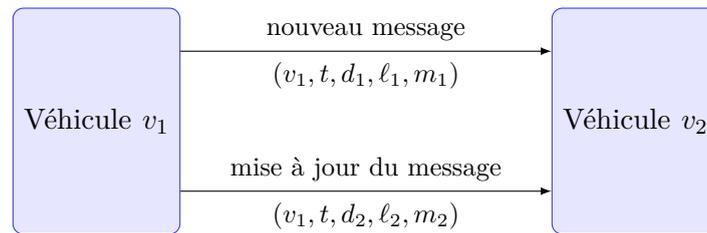


FIGURE 2.7 – Mise à jour d’un message envoyé.

$(Mr.t = t)$ et sa localisation est située sur la brique b ($Brique_{Mr.t}(Mr.l) = b$). Si le message reçu ne concerne pas un événement déjà identifié, on passe à l’étape suivante.

Créer un nouvel événement Si le nouveau message Mr n’est pas déjà reçu, s’il n’est pas une mise à jour d’un message déjà reçu et s’il ne correspond pas à un événement déjà identifié, la méthode consiste à créer un nouvel événement en lui associant ce nouveau message.

Fusion de données : donner un aperçu de la situation au conducteur Pour chaque véhicule, les messages sont groupés par type et par brique.

À partir de la base de messages, un aperçu des événements en cours est donné au conducteur. Chaque événement $e = (t, b)$ est accompagné d’une probabilité d’existence, il s’agit de la probabilité pignistique que l’événement soit présent. Pour chacun des véhicules, elle est calculée à partir de la fusion de fonctions de masse des messages informant de l’événement e de la manière suivante (figure 2.8) :

- Chaque fonction de masse $M_{e,i}.m$ est vieillie avec un taux de vieillissement $\alpha_{e,i} = \frac{1}{Suppr_{M_{e,i}.t}} \cdot \Delta(date_actuelle, M_{e,i}.d)$ pour prendre en considération l’ancienneté du message, ce taux est compris entre 0 et 1. Plus le message est ancien, moins il est pertinent et plus sa masse de croyance est vieillie. Deux mécanismes de vieillissement sont proposées, ils sont décrits dans la section 2.1.4.
- Ensuite, pour chaque type d’événement t et chaque brique b occupée par t , les fonctions de masse vieillies $\alpha_{e,i} M_{e,i}.m$ sont combinées conjonctivement, équation (1.15).
- Enfin, les probabilités pignistiques, équation (1.26), sont calculées pour chaque événement (t, b) .

Les résultats de fusion ne sont pas communiqués, chaque véhicule réalise sa propre synthèse.

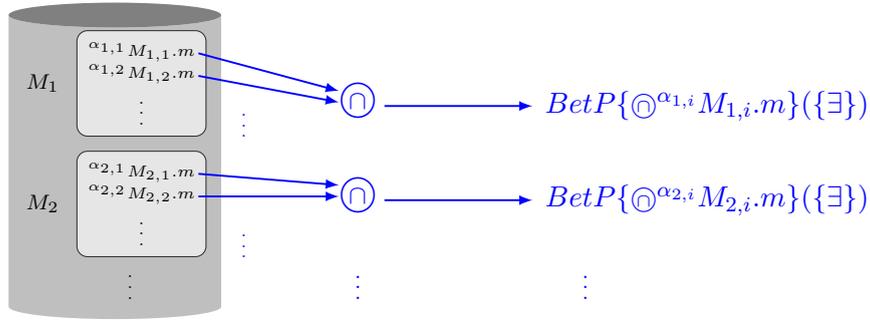


FIGURE 2.8 – Fusion de données : donner un aperçu de la situation de la route au conducteur.

Garder uniquement le résultat de la fusion dans la base des véhicules

Dans cette section, une troisième méthode utilisant des fonctions de croyance est présentée. L'objectif étant d'économiser la bande passante et de limiter le nombre de messages dans la base des véhicules, seul le résultat de la fusion pour chaque événement est gardé.

Format des messages échangés et bases de données des véhicules Pour chaque événement e , un véhicule garde un seul message M_e dans sa base, qui est le résultat de la fusion de tous les messages initiaux créés ou reçus informant de cet événement. Un message M_e est un 5-uplet (S, t, d, ℓ, m) où :

- $M_e.S$ est l'ensemble de toutes les sources qui ont contribué à la création des messages concernant l'événement e ;
- $M_e.t$ est le type de l'événement e ;
- $M_e.d$ est la date et l'heure du message le plus récent parmi les messages initiaux créés concernant l'événement e ;
- $M_e.\ell$ est l'ensemble des localisations portées par les messages initiaux concernant l'événement e , ces localisations sont situées sur la même brique pour le type d'événement $M_e.t$ et elles pourront servir dans les travaux futurs à préciser le plus finement possible la localisation de l'événement ;
- $M_e.m$ est la fonction de masse représentant la confiance des sources $M_e.S$ en ce qui concerne la présence de l'événement e à la date $M_e.d$.

Dès que possible, les véhicules échangent leurs messages, chacun étant une synthèse des informations reçues concernant un événement sur la route.

Gestion des messages reçus Un message reçu Mr concernant un événement e déjà identifié dans la base du véhicule (ils ont le même type et leurs localisations sont situées sur la même brique) est fusionné avec le message M_e . Ci-dessous les étapes de cette fusion :

- La nouvelle fonction de masse M_e est obtenue comme suit :
 - la fonction de masse du message ayant la date la plus ancienne entre Mr et M_e est vieillie (mécanismes de vieillissement décrits dans la section 2.1.4) pour prendre en considération son vieillissement, avec un taux de vieillissement égal à $\frac{|\Delta(Mr.d, M_e.d)|}{Suppr_t}$, compris entre 0 et 1 ;
 - si les sources sont indépendantes, c'est-à-dire si $Mr.S \cap M_e.S = \emptyset$, la nouvelle fonction de masse de M_e est obtenue en utilisant la règle de combinaison conjonctive, équation (1.15), pour combiner la fonction de masse vieillie (soit $M_e.m$ soit $Mr.m$) et celle non corrigée ;
 - sinon, c'est-à-dire si les sources ne sont pas distinctes, les messages ne sont donc pas indépendants et la règle de combinaison conjonctive prudente, équation (1.23), est utilisée pour combiner leurs fonctions de masse.
- Le nouvel ensemble de sources devient l'union des deux ensembles de sources $M_e.S$ et $Mr.S$: $M_e.S \cup Mr.S$.
- La date de M_e devient la date la plus récente parmi $M_e.d$ et $Mr.d$.
- Le nouvel ensemble de localisations devient l'union des deux ensembles de localisations $M_e.l$ et $Mr.l$: $M_e.l \cup Mr.l$.

La procédure proposée pour gérer les messages reçus est décrite dans l'algorithme 1.

Chaque véhicule garde dans sa base uniquement le résultat de cette étape de fusion pour chaque événement. Ensuite, les véhicules communiquent les messages présents dans leurs bases quand ils sont voisins.

Supposons que le seuil de suppression du type d'événement *livraison* est égal à 30 minutes. Prenons l'exemple d'un véhicule v qui reçoit à 10h02 un premier message concernant un événement e : $M_{e,1} = (S_1, livraison, 10h, \ell_1, m_1)$, il l'insère dans sa base sans aucune modification. Le véhicule v reçoit à 10h11 un deuxième message concernant l'événement e : $M_{e,2} = (S_2, livraison, 10h05, \ell_2, m_2)$, le message concernant l'événement e dans la base du véhicule devient à 10h11 $M_e = (\{S_1, S_2\}, livraison, 10h05, \{\ell_1, \ell_2\}, m)$ où $m = (\frac{|\Delta(10h, 10h05)|}{30} m_1) \odot m_2$. Il reçoit ensuite à 10h17 un message $M_{e,3} = (\{S_1, S_3\}, livraison, 10h15, \{\ell_1, \ell_3\}, m_3)$, le message concernant l'événement e dans la base du véhicule v devient à 10h17 $M_e = (\{S_1, S_2, S_3\}, livraison, 10h15, \{\ell_1, \ell_2, \ell_3\}, m')$ où $m' = (\frac{|\Delta(10h05, 10h15)|}{30} m) \odot m_3$.

Donner un aperçu de la situation au conducteur Dans la base d'un véhicule, un seul message est présent pour chaque événement. Il s'agit du résultat de la fusion des différents messages reçus. Chaque message M_e est vieillie (section 2.1.4) avec un taux de vieillissement égal à $\alpha_e = \frac{1}{Suppr_{M_e.t}} \cdot \Delta(date_actuelle, M_e.d)$ pour prendre en considération son ancienneté. La probabilité pignistique, équation (1.26), est ensuite calculée pour donner un aperçu de la situation globale de la route au conducteur.

Notons que les résultats de cette étape ne sont pas gardés dans la base du véhicule, ni communiqués aux véhicules voisins.

Algorithm 1 Gestion d'un nouveau message reçu quand uniquement le résultat de la fusion est gardé dans la base des véhicules.

Require: Un message reçu Mr . Tableau de messages M dans la base du véhicule.

Require: (système interne) Constante $Suppr_t$ dépend du type de l'événement t .

Require: $Brique_t(\ell)$ retourne la brique correspondante au type t sur laquelle la localisation ℓ est située.

Ensure: Traitement du message Mr : soit il n'est pas pris en considération, soit il remplace un autre message dans la base, soit il est fusionné avec un autre message de la base correspondant au même événement, soit il est ajouté dans la base.

begin

if $\exists M_e \in M$ $t.q.$ $Mr.x = M_e.x \forall x$ **then**

{Message Mr est déjà présent dans la base du véhicule M .}

Ne pas prendre en considération Mr .

else if $\exists M_e \in M$ $t.q.$ $Mr.x = M_e.x$, $x \in \{S, t, \ell\}$ et $M_e.d \geq Mr.d$ **then**

{Une mise à jour de Mr est déjà présente dans M : un message M_e dans le tableau M est une mise à jour de Mr .}

Ne pas prendre en considération Mr .

else if $\exists M_e \in M$ $t.q.$ $Mr.x = M_e.x$, $x \in \{S, t, \ell\}$ et $M_e.d < Mr.d$ **then**

{ Mr est une mise à jour d'un message M_e présent dans le tableau M .}

Remplacer M_e par Mr .

else if $\exists M_e \in M$ $t.q.$ $Mr.t = M_e.t$ et $Brique_{M_e.t}(M_e.\ell) = Brique_{Mr.t}(Mr.\ell)$ **then**

{ Mr correspond à un événement e déjà identifié dans le tableau M .}

if $Mr.d > M_e.d$ **then**

{ Mr est plus récent que M_e : vieillir $M_e.m$, la date de M_e devient celle de Mr .}

$$M_e.m \leftarrow \frac{|\Delta(M_e.d, Mr.d)|}{Suppr_{M_e.t}} M_e.m$$

$$M_e.d \leftarrow Mr.d$$

end if

if $M_e.d > Mr.d$ **then**

{ M_e est plus récent que Mr : vieillir $Mr.m$.}

$$Mr.m \leftarrow \frac{|\Delta(M_e.d, Mr.d)|}{Suppr_{Mr.t}} Mr.m$$

end if

if $M_e.S \cap Mr.S = \emptyset$ **then**

{Les sources sont indépendantes : combiner conjonctivement.}

$$M_e.m \leftarrow M_e.m \odot Mr.m$$

else

{Les sources ne sont pas distinctes : combiner prudemment.}

$$M_e.m \leftarrow M_e.m \otimes Mr.m$$

end if

$$M_e.S \leftarrow M_e.S \cup Mr.S$$

$$M_e.\ell \leftarrow M_e.\ell \cup Mr.\ell$$

else

{Un nouvel événement est détecté, créer un nouveau message dans la base du véhicule.}

Ajouter Mr dans le tableau M .

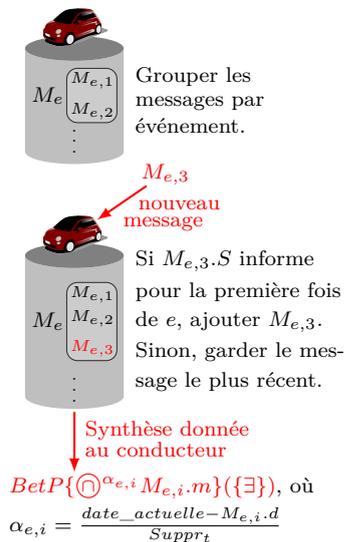
end if

end

Synthèse des deux stratégies proposées

Une synthèse illustrant les deux stratégies proposées dans cette section est exposée dans la figure 2.9.

garder les messages initiaux



garder uniquement le résultat de la fusion

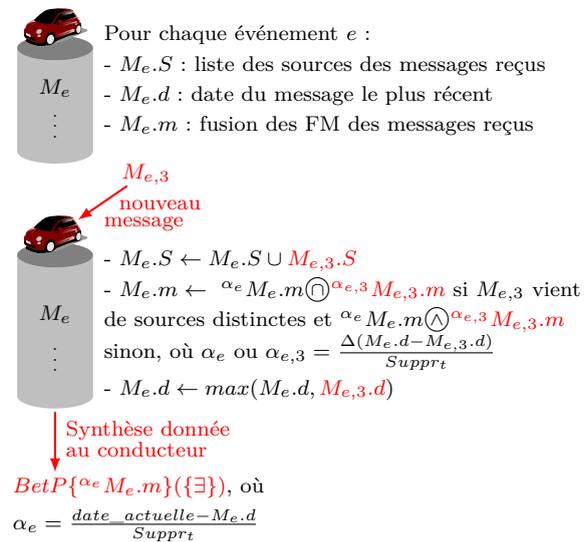


FIGURE 2.9 – Synthèse des deux stratégies proposées : garder les messages initiaux dans la base des véhicules ou uniquement le résultat de la fusion pour chaque événement.

2.1.3 Emploi de la mise à jour du monde

Dans toutes les méthodes proposées, quand un véhicule ne détient aucune information concernant la présence d'un type d'événement sur une brique, cette dernière est considérée non occupée. Autrement dit, une fonction de masse catégorique sur « n'existe pas » est associée aux briques non occupées.

Les deux dernières méthodes proposées considèrent qu'à la réception d'un message contredisant la connaissance acquise, la base est mise à jour au lieu d'être rectifiée. Ces deux mécanismes sont décrits dans la section 1.3.2. A la disparition d'un événement, ces méthodes considèrent que le monde a changé et le premier nouveau message niant l'événement est considéré prioritaire par rapport aux anciens messages dans la base confirmant sa présence. De même, un nouveau message informant de la présence d'un événement est prioritaire par rapport aux messages plus anciens contredisant cette information.

Prenons l'exemple d'un premier message créé informant qu'une place de parking est disponible, suivi dix minutes plus tard par un message contredisant cette information comme l'illustre la figure 2.10. Nous pouvons considérer que le monde a changé : au lieu de fusionner

les deux messages, il s'agit d'accorder la priorité au second, qui porte l'information la plus récente, le premier message sera oublié.

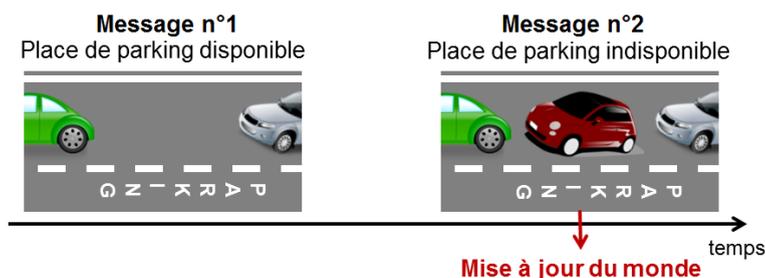


FIGURE 2.10 – Exemple illustrant l'intérêt de la mise à jour du monde : deux messages créés, avec un intervalle de dix minutes, informant d'une place de parking.

L'emploi de ce mécanisme consiste à supprimer les messages antérieurs à la dernière mise à jour du monde avant le processus de fusion. À la réception d'un nouveau message $M_{e,n}$ informant d'un événement e , la procédure de mise à jour du monde est exposée dans l'algorithme 2 quand les messages initiaux sont gardés dans la base des véhicules.

Algorithm 2 Procédure de mise à jour du monde quand les messages initiaux sont gardés dans la base du véhicule.

Require: Événement $e = (t, b)$ où t est le type et b est la brique sur laquelle il est localisé ; un nouveau message $M_{e,n}$.

begin

if $\forall i, (BetP\{M_{e,i}.m\}(\{\exists\}) > 0.5$ et $BetP\{M_{e,n}.m\}(\{\exists\}) > 0.5$) ou $(BetP\{M_{e,i}.m\}(\{\exists\}) > 0.5$ et $BetP\{M_{e,n}.m\}(\{\exists\}) > 0.5)$ **then**

if $M_{e,n}.d > maximum(M_{e,i}.d)$ **then**

 {Mise à jour du monde.}

 Supprimer tous les messages $M_{e,i}$ de la base du véhicule.

 Ajouter $M_{e,n}$ dans la base du véhicule.

else

 Ne pas prendre en compte $M_{e,n}$.

end if

end if

end

Notons que la mise à jour du monde ne modifie pas les résultats quand le véhicule ne reçoit pas de messages contradictoires, c'est à dire des messages informant de la présence d'un événement et d'autres informant de son absence : une seule mise à jour du monde est considérée, elle est donnée par le premier message reçu.

2.1.4 Vieillesse des messages

Deux mécanismes de vieillissement sont utilisés dans les méthodes proposées.

Affaiblissement : ignorer la présence ou l'absence des événements avec le temps

Le premier mécanisme est celui de l'affaiblissement. Comme l'illustre la figure 2.11, le résultat de ce mécanisme tend avec le temps vers l'ignorance totale Ω qui signifie « je ne sais pas » : $BetP(\{\exists\}) = 0.5$ et $BetP(\{\bar{\exists}\}) = 0.5$.



FIGURE 2.11 – Exemple de l'affaiblissement d'une information concernant un accident sur la route.

Le mécanisme d'affaiblissement d'une fonction de masse est décrit dans la section 1.1.2, il est défini par :

$${}^{\alpha}m = (1 - \alpha) m + \alpha m_{\Omega} , \quad (2.1)$$

où $\alpha \in [0, 1]$ est le taux d'affaiblissement.

Renforcement : supposer que les événements disparaissent avec le temps

Un deuxième mécanisme est proposé, considérant qu'avec le temps l'événement n'existe plus. Il consiste à renforcer les messages vers la disparition de l'événement pour prendre en compte leur ancienneté. Un exemple est illustré dans la figure 2.12.

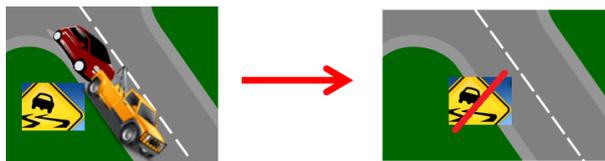


FIGURE 2.12 – Exemple du renforcement d'une information concernant un accident sur la route.

Il s'agit du mécanisme décrit dans la section 1.1.2 où le résultat de la fonction de masse totalement renforcée est la fonction catégorique sur l'élément $\{\bar{\exists}\}$. Il tend vers « n'existe

pas » avec le temps : $BetP(\{\bar{\exists}\}) = 1$ quand $\Delta(date_actuelle, M_{e,i}.d) = Suppr_{M_{e,i}.t}$. Le renforcement utilisé est obtenu par :

$$\nu m = (1 - \nu) m + \nu m_{\{\bar{\exists}\}} , \quad (2.2)$$

où $\nu \in [0, 1]$ est le taux de renforcement.

Exemple comparant l'affaiblissement et le renforcement proposé

Prenons l'exemple d'un véhicule qui reçoit un message $M = (S, livraison, 10h00, \ell, m)$ tel que $m(\{\exists\}) = 0.6$ et $m(\Omega) = 0.4$ informant qu'une livraison a lieu à 10h à la localisation ℓ . Supposons que le seuil de suppression des messages concernant le type d'événement *livraison* est égal à 30 minutes. La situation de la route donnée au conducteur évolue avec le temps et elle est différente selon la méthode de vieillissement employée. Le tableau 2.3 donne le résultat à 10h, 10h10, 10h20 et 10h30 pour chacun des deux mécanismes de vieillissement utilisés.

Tableau 2.3 – Exemple comparant l'affaiblissement et le renforcement vers l'absence de l'événement (« n'existe pas »).

Heure	Méthode de vieillissement	$m(\{\exists\})$	$m(\{\bar{\exists}\})$	$m(\Omega)$	$BetP(\{\exists\})$	$BetP(\{\bar{\exists}\})$
10h	Affaiblissement	0.6	0	0.4	0.8	0.2
	Renforcement	0.6	0	0.4	0.8	0.2
10h10	Affaiblissement	0.4	0	0.6	0.7	0.3
	Renforcement	0.4	0.333	0.267	0.533	0.467
10h20	Affaiblissement	0.2	0	0.8	0.6	0.4
	Renforcement	0.2	0.667	0.133	0.267	0.733
10h30	Affaiblissement	0	0	1	0.5	0.5
	Renforcement	0	1	0	0	1

2.1.5 Différences entre les méthodes proposées et celles connues précédemment

Dans les travaux antérieurs de Cherfaoui et al. [32], le vieillissement des messages est pris en compte en utilisant l'affaiblissement des messages, la présence de l'événement est ignorée avec le temps, le mécanisme de renforcement n'est pas utilisé.

De plus, la mise à jour du monde n'a pas été considérée et seule la stratégie où le résultat de la fusion est gardé dans la base des véhicules est proposée.

Notons que parmi les méthodes proposées dans ce chapitre, la troisième méthode « garder le résultat de la fusion, affaiblir » est celle la plus proche de la méthode proposée par Cherfaoui et al. dans [32]. Ci-dessous les différences entre ces deux méthodes :

- Les deux méthodes combinent conjonctivement les messages qui n’ont pas été modifiés par la fusion et ayant des sources distinctes. Mais contrairement à la méthode présentée dans [32], la troisième méthode proposée dans ce chapitre garde en mémoire la liste des sources des messages pour décider correctement de la dépendance entre les messages. De plus, la méthode [32] combine conjonctivement les masses de deux messages quand les sources sont identiques mais la date de perception est différente. Dans les différentes méthodes proposées dans ce chapitre, ce cas est considéré comme une mise à jour d’un message par la même source et seul le message le plus récent est gardé dans la base sans le combiner.
- À la réception d’un nouveau message, la méthode proposée dans [32] affaiblit le message selon la date actuelle, alors que la troisième méthode proposée dans ce chapitre affaiblit selon la date du message le plus récent. Au moment où un aperçu doit être donné au conducteur, un nouvel affaiblissement est réalisé selon la date actuelle.

Au final, comme nous avons la possibilité de détecter les mises à jour des informations provenant d’un véhicule et que ces dernières sont correctes (chaque véhicule dit la vérité), nous n’avons pas cru nécessaire d’implémenter une combinaison prudente dans cette situation. Ainsi la méthode pouvant le plus se rapprocher de l’esprit de la méthode proposée par Cherfaoui et al. pour la gestion des événements locaux est la troisième méthode proposée dans ce chapitre. Il s’agit d’une bonne approximation, permettant de décider plus finement de la dépendance entre les messages.

2.2 Expérimentations

2.2.1 Simulateur

Pour étudier les méthodes proposées et mesurer leurs performances, un simulateur a été implémenté sous MatlabTM de telle façon que différents scénarios peuvent être testés.

Le choix de développer notre propre simulateur a été motivé par différentes raisons. Il s’agit d’un outil de recherche, permettant de tester et comparer simplement différentes méthodes. Le choix de MatlabTM est justifié par la maîtrise de la manipulation des fonctions de croyance, ce qui a permis de mettre en avant nos contributions. Le simulateur implémenté permet de discrétiser simplement les cartes en briques rectangulaires afin de tester des scénarios simples tout en restant relativement proche de la réalité et mesurer les performances des méthodes en obtenant l’adéquation à la réalité des informations données aux conducteurs.

Cet outil est disponible sous la licence CeCILL-B (contrat de licence de logiciel libre) [2] et pourra servir à la communauté du domaine des réseaux de véhicules souhaitant utiliser des fonctions de croyance [6].

Le simulateur développé permet de mettre à jour la trajectoire des véhicules et la réalité terrain (vérité) concernant la présence des événements avec une période d'échantillonnage paramétrable nommée $\Delta\tau_r$. Les méthodes peuvent être déroulées avec une période d'échantillonnage différente nommée $\Delta\tau$, elle correspond à la fréquence : de communication entre les véhicules, de création d'éventuels messages informant de la présence ou de l'absence des événements, de la mise à jour des bases internes des véhicules et de l'affichage du résultat de la situation globale de la route aux conducteurs. On note également τ_r l'axe de temps de la réalité terrain et τ l'axe de temps du déroulement des méthodes. Chaque scénario a des dates et heures de début et de fin. La date et l'heure de début d'un scénario représentent le premier instant de la simulation qui correspond à $\tau_r = 1$.

La carte générée et utilisée par le simulateur est formée de rues horizontales et verticales de dimensions identiques et paramétrables. Chaque rue est composée de deux voies de circulation de sens opposés. Afin de matérialiser les événements sur la carte, les voies de circulation sont découpées en petites zones rectangulaires appelées « briques de la réalité terrain » de mêmes dimensions. Le nombre de briques de la réalité terrain par voie de circulation est noté $NbBR_t$, il dépend du type d'événement. Pour le type d'événement « accident », la taille des briques est égale à 50 mètres.

Chaque véhicule a une date et une heure de départ qui correspondent à un τ_r de départ, une localisation de départ et une localisation d'arrivée qui permettent au simulateur de construire sa trajectoire. Un véhicule est présent sur la carte à partir de son τ_r de départ, jusqu'à son arrivée à sa destination. Quand un véhicule ne se trouve pas sur un croisement de rues, il est obligé de continuer tout droit. Arrivé à un croisement de rues, il marque un arrêt et peut continuer tout droit, aller à droite, aller à gauche ou faire demi-tour pour se rapprocher de sa destination. Les véhicules ne peuvent pas se doubler et ils sont ralentis avant d'arriver aux croisements de rues. Notons que leur trajectoire ne dépend pas du découpage de la carte en briques. Quand un véhicule est localisé sur une brique de la réalité terrain sur laquelle un événement pouvant le ralentir est présent, il est ralenti avec un taux de ralentissement dépendant du type d'événement. La présence des accidents sur les briques de la réalité terrain est programmé à l'avance et ne résulte pas des déplacements des véhicules.

La figure 2.13 illustre un exemple d'une carte, de la réalité terrain concernant un type d'événement et d'une trajectoire possible d'un véhicule. Cette carte est constituée de 3 lignes de rues horizontales et 3 lignes de rues verticales, chaque voie de circulation est découpée en 5 briques ($NbBR_t = 5$) pour illustrer la réalité terrain d'un type d'événement. Deux événements sont présents sur cette carte, ils sont illustrés par des briques de couleur rouge. La trajectoire d'un véhicule est présentée en vert, il part de sa localisation de départ, arrivée à un premier croisement il tourne à droite, puis arrivé à un deuxième croisement, il va à gauche afin d'arriver à sa destination.

Un scénario est construit à partir des informations suivantes :

- la date et l'heure de début et celles de fin de la simulation ;
- les périodes d'échantillonnage $\Delta\tau_r$ et $\Delta\tau$;
- la carte : nombre de lignes de rues de la carte, dimensions des rues et découpage des voies de circulation en briques de réalité terrain par type d'événement ;

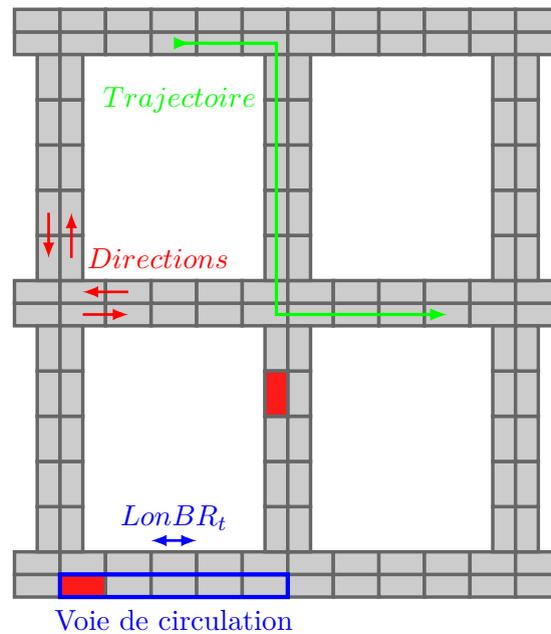


FIGURE 2.13 – Exemple d’une carte du simulateur, de la réalité terrain concernant un type d’événement et d’une trajectoire d’un véhicule.

- le nombre des véhicules ainsi que leurs instants τ_r de départ et leurs localisations de départ et d’arrivée ;
- les types des événements, les briques de la réalité terrain sur lesquelles ils sont présents, ainsi que leurs instants τ_r de début et τ_r de fin.

À chaque instant τ , le simulateur permet à chaque véhicule de :

- créer un message quand il perçoit un événement : localisé sur sa brique, sur la brique opposée, sur la brique située à sa droite ou sur celle située à sa gauche ;
- nier un événement présent dans sa base interne s’il ne le perçoit pas ;
- communiquer les messages de sa base aux véhicules voisins présents dans son réseau sachant que la portée du réseau est définie dans le simulateur à 200 mètres, autrement dit chaque véhicule échange ses messages avec tous les véhicules distants de moins de 200 mètres (valeur réaliste dans un milieu urbain).

2.2.2 Adéquation à la réalité

L’objectif des modèles proposés est d’obtenir la meilleure adéquation possible entre la vérité terrain et les informations fournies aux automobilistes. La mesure de performance présentée dans les expérimentations est l’adéquation à la réalité. On s’intéresse aux informations contenues dans la base des véhicules et celles dans la réalité terrain.

Les méthodes ne connaissant pas le découpage de la carte dans la réalité terrain, le

nombre de briques par voie de circulation NbB_t connu par les méthodes dans la base des véhicules peut être différent du nombre de briques de la réalité terrain par voie de circulation $NbBR_t$. Soit $NbBC_t$ le nombre de « plus petites briques communes » entre celles connues dans les méthodes et celles de la réalité terrain par voie de circulation. Il s'agit du plus petit commun multiple de NbB_t et $NbBR_t$: $NbBC_t = PPCM(NbB_t, NbBR_t)$.

La figure 2.14 illustre un exemple où le nombre de briques par voie de circulation de la réalité terrain est égal à 4 et celui connu par les méthodes est égal à 6. Le nombre de plus petites briques communes par voie de circulation est obtenu par : $NbBC_t = PPCM(4, 6) = 12$. Dans l'exemple illustré, un type d'événement est présent sur 2 briques parmi les 4 briques de la voie de circulation dans la réalité terrain et sur 2 briques parmi les 6 briques dans la base interne d'un véhicule. Pour chacun des véhicules, l'adéquation à la réalité concerne les briques occupées dans la réalité terrain et celles occupées à tort ou à raison dans la base du véhicule. Il s'agit des plus petites briques communes de couleur verte dans l'exemple illustré dans cette figure.

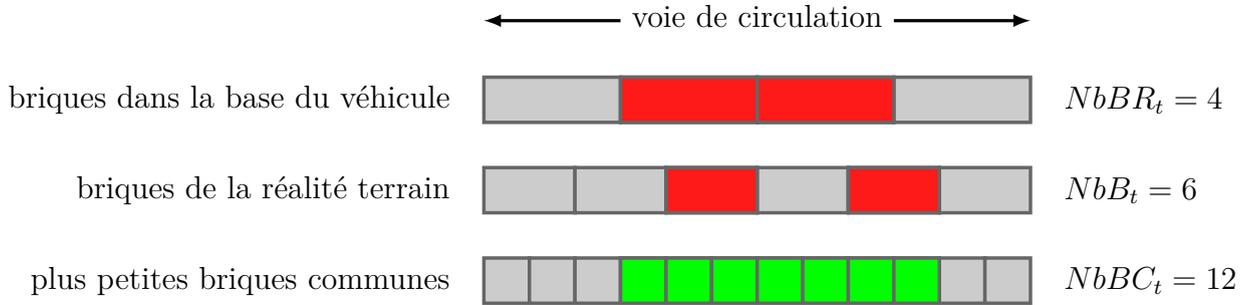


FIGURE 2.14 – Exemple de plus petites briques communes utilisées pour calculer l'adéquation à la réalité.

À chaque instant τ , pour chaque véhicule v et pour chaque type d'événement t , l'union des événements présents dans la base interne de v et les événements présents dans la réalité terrain constitue l'ensemble des plus petites briques communes sur lesquelles l'adéquation à la réalité est obtenue. Cet ensemble est noté $B_t^{v,\tau}$, il s'agit d'un ensemble de couples $(t, \text{brique commune})$.

L'adéquation à la réalité, équation (2.3), a pour objectif de quantifier la justesse des informations présentes dans chaque véhicule v , pour chaque type d'événement t et à chaque instant τ . Elle est définie par :

$$Perf_t^{v,\tau} = 1 - \frac{\sum_{b \in B_t^{v,\tau}} (BetP_{t,b}^{v,\tau}(\{\exists\}) - R_{t,b}^\tau)^2}{|B_t^{v,\tau}|}, \quad (2.3)$$

où :

- $R_{t,b}^\tau = 1$ si l'événement (t, b) est présent dans la réalité terrain à l'instant τ , 0 sinon ;
- $|B_t^{v,\tau}|$ est la cardinalité de l'ensemble $B_t^{v,\tau}$;

- $BetP_{t,b}^{v,\tau}$ est la probabilité pignistique dans la base du véhicule v à l'instant τ concernant la présence de l'événement (t, b) . Si aucun message concernant l'événement (t, b) n'est présent dans le véhicule v , alors $Betp_{t,b}^{v,\tau}(\{\exists\}) = 0$.

Si aucun événement n'est présent dans la réalité terrain et aucun message n'est présent dans la base du véhicule v , la performance est considérée maximale : $Perf_t^{v,\tau} = 1$.

2.2.3 Scénarios

Les scénarios testés permettent de comparer les méthodes proposées dans ce chapitre et résumées dans le tableau 2.2, ainsi qu'une méthode triviale où les messages informent si « oui » ou « non » l'événement existe, seul le dernier message est gardé dans la base des véhicules et l'ancienneté des messages n'est pas prise en compte. Ci-dessous la liste des méthodes testées :

- garder les messages initiaux, affaiblir ;
- garder les messages initiaux, renforcer ;
- garder le résultat de la fusion, affaiblir ;
- garder le résultat de la fusion, renforcer ;
- garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, affaiblir ;
- garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, renforcer ;
- garder le dernier message « oui » ou « non ».

Dans les expérimentations présentées, $\Delta\tau_r$ est égale à 1 seconde, $\Delta\tau$ est égale à 4 secondes et seul le type d'événement « accident » est testé. Nous considérons également que la taille des briques de la réalité terrain est égale à celle des méthodes : $LonBR = LonB = 50$ mètres. La longueur des voies de circulation est de 600 mètres et elles sont découpées en 12 briques : $NbBR = NbB = 12$.

On suppose que la durée D d'un accident suit une loi normale $D \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ de paramètres $\mu = 1800$ secondes et $\sigma = 300$. Le seuil d'obsolescence $Suppr_t$ est choisi tel que $P(D \leq Suppr_t) = 99\%$, il est obtenu par la formule : $Suppr_t = \mu + u_{.99} * \sigma = 2497.89$ secondes.

La croyance associée aux fonctions de masse des messages créés est égale à 0.6 pour tous les véhicules. Autrement dit, la fonction de masse d'un message créé est simple et égale à $\{\exists\}^{0.4}$ si le message informe qu'un accident est présent et $\{\bar{A}\}^{0.4}$ s'il informe qu'un accident est absent.

Dans les scénarios n°1 à n°3, une seule brique de la réalité terrain est occupée, c'est-à-dire un seul accident est présent, il a lieu dès le début de la simulation à $\tau_r = 1$. Dans ces scénarios, on s'intéresse au résultat dans un seul véhicule nommé v . Chaque simulation se termine au bout de 3 fois la durée de l'accident pour les scénarios n°1 et n°2 et au bout de 2 fois la durée de l'accident pour le scénario n°3. Cela est choisi manuellement par scénario de telle façon que tous les messages soient supprimés de la base du véhicule v à la fin des simulations : adéquation à la réalité stagne et devient identique pour toutes les méthodes.

Afin de comparer les différentes méthodes proposées, dans chacun de ces scénarios :

- Pour un exemple de durée d'accident, l'évolution des résultats de performance avec le temps (à chaque instant τ) pour chaque méthode testée est présentée. Dans les figures illustrées : le symbole $+(n)[\exists]$ en bleu indique la date d'ajout dans la base du véhicule d'un (de n) message(s) informant que l'accident existe ; le symbole $+(n)[\neg\exists]$ en bleu indique la date d'ajout dans la base du véhicule d'un (de n) message(s) niant l'accident ; le symbole $-(n)[\exists]$ en rouge indique la date de suppression de la base du véhicule d'un (de n) message(s) informant que l'accident existe ; le symbole $-(n)[\neg\exists]$ en rouge indique la date de suppression de la base du véhicule d'un (de n) message(s) niant l'accident ; et la ligne verticale grise correspond à la date de disparition de l'accident dans la réalité terrain.
- Sur un échantillon de 20 durées d'accidents, la performance moyenne de chacune des 20 simulations est illustrée, il s'agit d'un seul scalaire pour chaque simulation qui est la moyenne de $\tau = 1$ jusqu'au dernier instant τ . Notons que l'échantillon de 20 valeurs de durées d'accident est obtenu pour chaque scénario aléatoirement d'une distribution normale avec une moyenne de 1800 secondes et un écart-type de 300.
- Afin de mesurer la sensibilité des tests, les simulations sont réalisées sur 10 séries de 20 échantillons de durées d'accidents. L'espérance et l'écart type de la distribution d'échantillonnage de la performance sont donnés pour chaque méthode testée.

Scénario n°1 : comparer l'affaiblissement et le renforcement des messages confirmant la présence d'un accident

Objectif du scénario L'objectif de ce scénario est d'étudier la différence entre l'affaiblissement d'un message au cours du temps et son renforcement en faveur de « événement n'existe plus ». Il s'agit de comparer les deux stratégies de vieillissement quant à la gestion de l'obsolescence des messages, dans un scénario où on ne reçoit pas de messages informant que l'accident a disparu.

Description du scénario Un seul véhicule v est présent sur la carte. Il crée un message relatif à l'accident et le garde jusqu'à son obsolescence. Les trois sous-scénarios suivants sont testés :

- le véhicule perçoit l'accident au bout de 10% de sa durée après son début ;
- le véhicule perçoit l'accident au bout de 50% de sa durée après son début ;
- le véhicule perçoit l'accident au bout de 90% de sa durée après son début.

Ils sont illustrés dans la figure 2.15 pour un exemple d'accident qui débute à 10 h et de durée égale à 30 minutes.

Dans ce scénario où un seul message est présent dans la base du véhicule v , les résultats des méthodes utilisant l'affaiblissement pour vieillir les messages sont identiques, de même pour les méthodes utilisant le renforcement. Les résultats de ce scénario sont présentés uniquement pour les deux premières méthodes proposées, où tous les messages initiaux sont

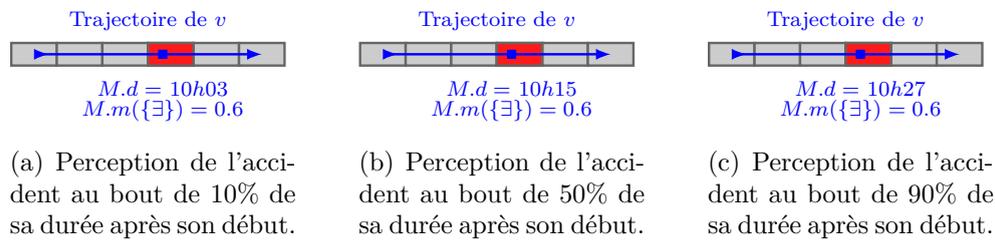


FIGURE 2.15 – Description du scénario n°1 pour un exemple d'accident qui débute à 10 h et de durée égale à 30 minutes.

gardés dans la base des véhicules.

Exemple illustrant un résultat d'une simulation Pour un exemple de durée d'accident, la figure 2.16 illustre l'adéquation à la réalité des deux mécanismes de vieillissement testés quand le véhicule perçoit l'accident au bout de 10%, 50% ou 90% de sa durée après son début.

Au début de la simulation, l'adéquation à la réalité est nulle, car aucun message n'est présent dans la base du véhicule. La performance baisse ensuite avec le temps, davantage avec le renforcement car il tend rapidement vers la négation, jusqu'à la disparition de l'accident. Pour cela, l'affaiblissement donne un meilleur résultat avant la fin de l'accident.

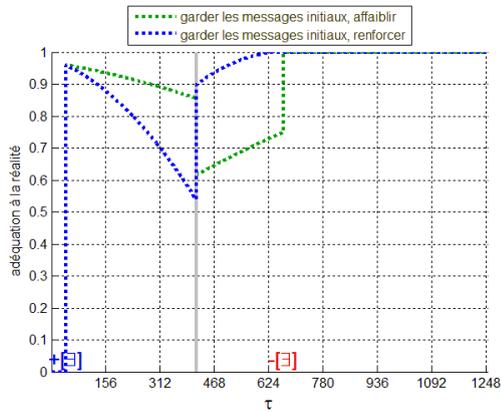
Le résultat tend vers la négation « n'existe pas » avec le renforcement employé et vers l'ignorance totale avec l'affaiblissement : il est réparti à 50% sur sa présence « existe » et à 50% sur son absence « n'existe pas ». Pour cela, une fois l'accident disparu, le renforcement donne un meilleur résultat car il prédit plus rapidement sa disparition.

Une fois le message supprimé de la base du véhicule, l'adéquation à la réalité devient égale à 100%, car l'accident n'est plus présent dans la réalité.

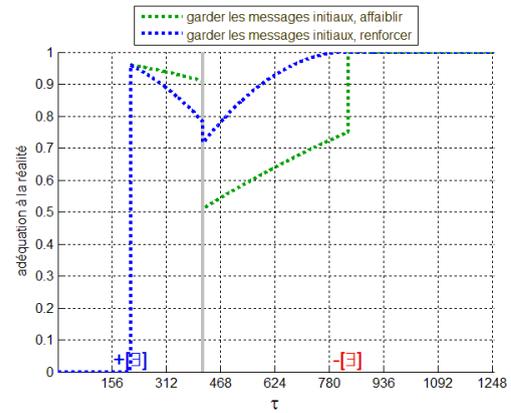
Résultats du scénario Un échantillon de 20 valeurs de durées d'accident est obtenu aléatoirement d'une distribution normale avec une moyenne de 1800 secondes et un écart-type de 300. Pour chaque durée d'accident de l'échantillon, les trois sous-scénarios où le véhicule perçoit l'accident au bout de 10%, 50% ou 90% de sa durée après son début sont testés (60 simulations au total). La moyenne de l'adéquation à la réalité sur toute la simulation par lancement pour chacune des deux stratégies de vieillissement testées est illustrée sur la figure 2.17.

Afin de mesurer la sensibilité des tests, la série précédente des simulations est réalisée 10 fois (600 simulations au total). La moyenne et l'écart-type de l'adéquation à la réalité sont obtenus pour chacune des 10 séries de simulations. L'espérance et l'écart type de la distribution d'échantillonnage sont présentés dans le tableau 2.4 pour chaque méthode testée et chaque sous-scénario.

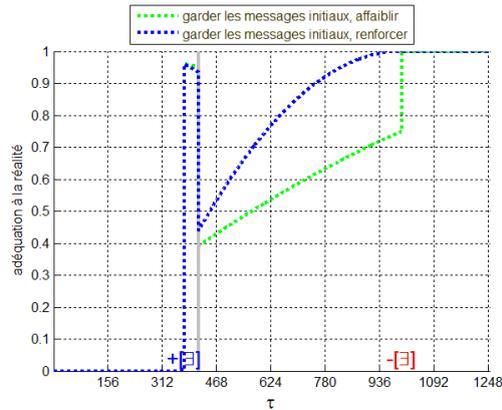
Ces simulations permettent de conclure qu'en moyenne sur toute la simulation, l'affai-



(a) Perception de l'accident au bout de 10% de sa durée après son début.



(b) Perception de l'accident au bout de 50% de sa durée après son début.



(c) Perception de l'accident au bout de 90% de sa durée après son début.

FIGURE 2.16 – Scénario n°1 : adéquation à la réalité par méthode pour un exemple d'accident.

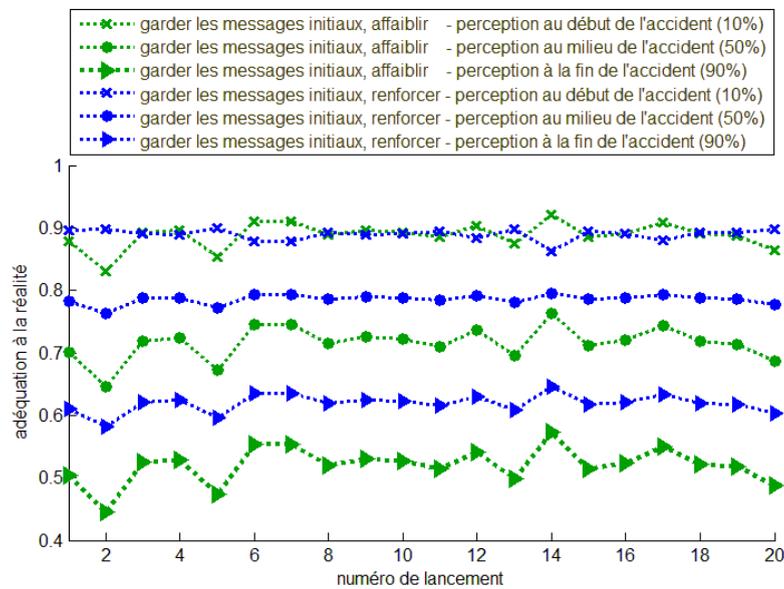


FIGURE 2.17 – Scénario n°1 : adéquation à la réalité moyenne par méthode pour chacune des 20 simulations.

Tableau 2.4 – Scénario n°1 : espérance et écart type de l’adéquation à la réalité de la distribution d’échantillonnage sur les 10 séries de simulations pour chaque méthode testée.

	Perception au début de l'accident (10%)	Perception au milieu de l'accident (50%)	Perception à la fin de l'accident (90%)
Garder les messages initiaux, affaiblir	0.825(0.0344)	0.574(0.0302)	0.32(0.0125)
Garger les messages initiaux, renforcer	0.836(0.011)	0.676(0.0135)	0.427(0.0195)

blissement et le renforcement sont équivalents quand l'événement est perçu à son début avec un léger avantage pour le renforcement en moyenne sur toute la simulation. Ce dernier donne un meilleur résultat sinon. Plus l'événement est perçu tard, plus l'écart des performances entre les deux méthodes est important. L'affaiblissement donne un meilleur résultat avant la fin de l'événement car il tend vers l'ignorance alors que le renforcement utilisé tend vers la négation ; mais le renforcement donne un meilleur résultat après la fin de l'événement car il prédit plus rapidement sa disparition et cet écart compense celui avant la disparition de l'événement.

Scénario n°2 (première partie) : comparer l’affaiblissement et le renforcement des messages niant la présence d’un accident

Objectif du scénario (première partie) Comme dans le scénario précédent, un des objectifs de ce scénario est d'étudier la différence entre l'affaiblissement et le renforcement. Il s'agit d'étudier le vieillissement des messages informant que l'accident a disparu. Les méthodes où les messages initiaux sont gardés et la mise à jour du monde est considérée sont comparées. Dans ces méthodes, à la réception d'un premier message niant l'accident, les messages plus anciens contredisant cette information ne sont plus considérés, ce qui permet de comparer l'affaiblissement et le renforcement des messages niant l'accident sans que les messages précédents informant que l'accident est présent impactent les résultats.

Description du scénario Un véhicule v reçoit deux messages informant que l'accident est présent, puis deux autres messages niant cet événement après sa disparition. Les sources de ces quatre messages sont distinctes. Ce scénario est illustré dans la figure 2.18 dans une simulation qui débute à 10 h et pour un exemple de durée d'accident égale à 30 minutes. Ci-dessous sa description :

- un véhicule v_1 perçoit l'accident au bout de 30% de sa durée après son début, un message est créé par v_1 confirmant l'accident, le véhicule v le reçoit dans la foulée ;
- un véhicule v_2 perçoit l'accident au bout de 70% de sa durée après son début, un message est créé par v_2 confirmant l'accident, le véhicule v le reçoit dans la foulée ;
- le véhicule v_3 crée un message niant l'accident au bout de 30% de sa durée après sa disparition (v_3 avait reçu un message confirmant l'accident, mais il ne le perçoit pas en passant à côté de sa localisation), le véhicule v reçoit le message créé dans la foulée ;
- le véhicule v_4 , ne percevant pas l'accident, crée un message informant de l'absence de l'accident au bout de 50% de sa durée après sa disparition, le véhicule v reçoit ce message dans la foulée.

Exemple illustrant un résultat d'une simulation Pour un exemple de durée d'accident, la figure 2.19 illustre l'adéquation à la réalité pour chacune des méthodes.

Ces résultats montrent que le renforcement prédit mieux la disparition de l'événement après la réception de message(s) le niant. L'affaiblissement tend vers l'ignorance totale (répartition à 50% sur la présence et à 50% sur l'absence de l'événement), ce qui explique la baisse de la performance avec le temps après la réception de ces messages et jusqu'à leur suppression de la base du véhicule. Contrairement à l'affaiblissement, le renforcement employé tend vers la négation, ce qui est plus proche de la réalité quant à la gestion des messages informant de l'absence de l'événement. Prêtons attention à la baisse de la performance suite à la mise à jour du monde (réception du premier message informant de l'absence de l'accident) quand le renforcement est employé. À cet instant, le résultat du renforcement des messages informant de la présence de l'accident est plus proche de la réalité, comparé au résultat obtenu une fois la mise à jour du monde considérée.

Notons que la fusion des deux messages confirmant la présence de l'accident et celle des deux messages informant de son absence a permis d'améliorer les résultats.

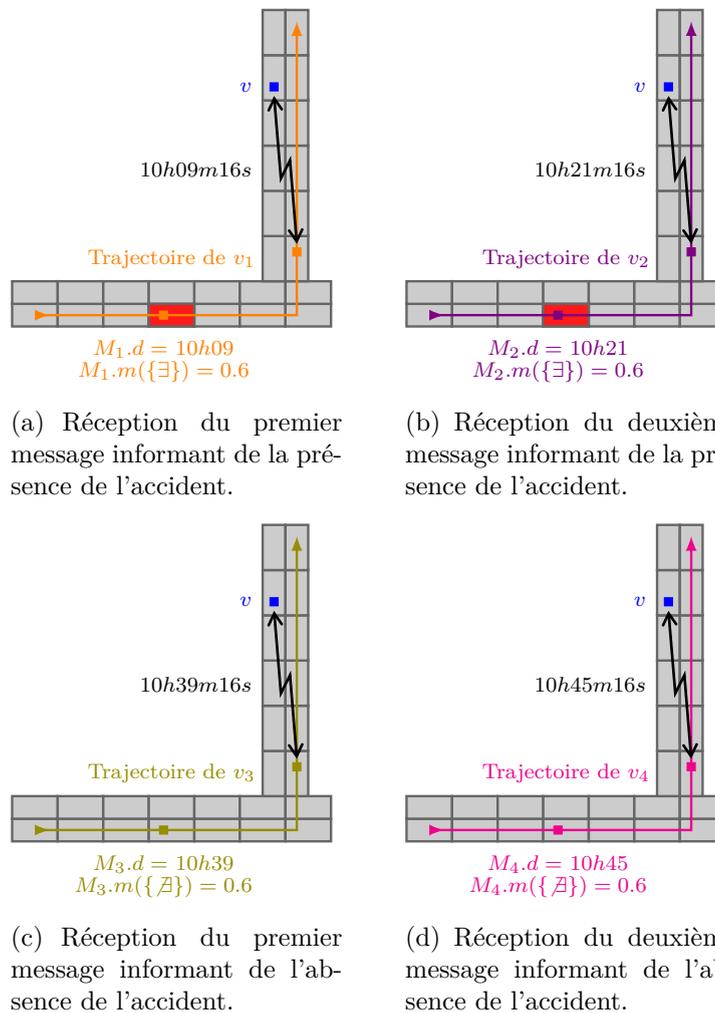
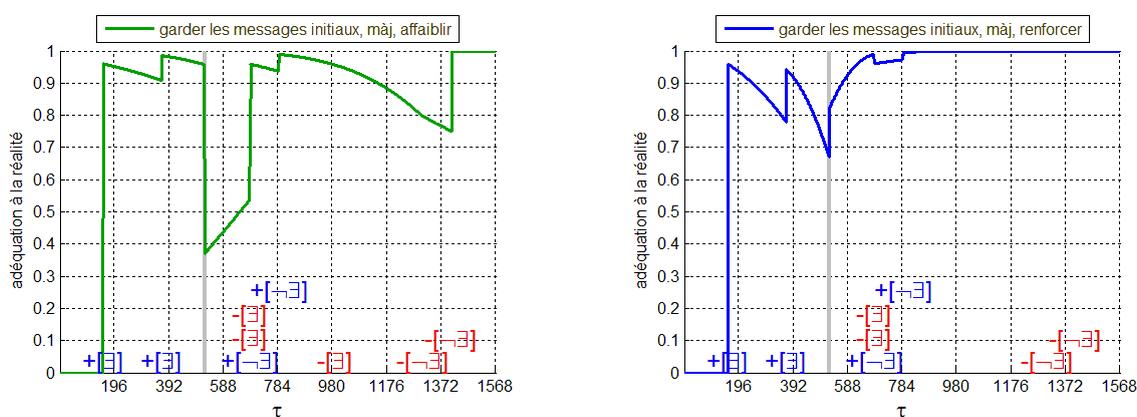


FIGURE 2.18 – Description du scénario n°2 pour un exemple d'accident qui débute à 10 h et de durée égale à 30 minutes.



(a) Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, affaiblir.

(b) Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, renforcer.

FIGURE 2.19 – Scénario n°2 (première partie) : adéquation à la réalité par méthode pour un exemple d'accident.

Résultats du scénario (première partie) Un échantillon de 20 durées d'accidents est obtenu aléatoirement de la même façon que celle utilisée dans le scénario précédent. Pour chacune des 20 simulations, la figure 2.20 illustre la moyenne de l'adéquation à la réalité sur toute la simulation pour les deux méthodes testées.

Afin de mesurer la sensibilité des tests, la série de 20 simulations précédente est lancée 9 nouvelles fois (200 simulations au total). Les moyennes sont données dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5 – Scénario n°2 (première partie) : espérance et écart type de l'adéquation à la réalité de la distribution d'échantillonnage sur les 10 séries de simulations pour chaque méthode testée.

Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, affaiblir	0.784(0.00601)
Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, renforcer	0.854(0.00439)

Ces résultats montrent que le renforcement utilisé donne un meilleur résultat en moyenne sur toute la durée des simulations. Il prédit beaucoup mieux la disparition de l'événement après la réception de message(s) le niant.

Scénario n°2 (deuxième partie) : comparer toutes les méthodes quant à la gestion des messages confirmant et niant l'accident

Objectif du scénario (deuxième partie) L'objectif est de comparer toutes les méthodes dans un scénario simple où un véhicule reçoit des informations informant de la présence d'un accident et ensuite d'autres informations le niant une fois disparu. Les stratégies suivantes

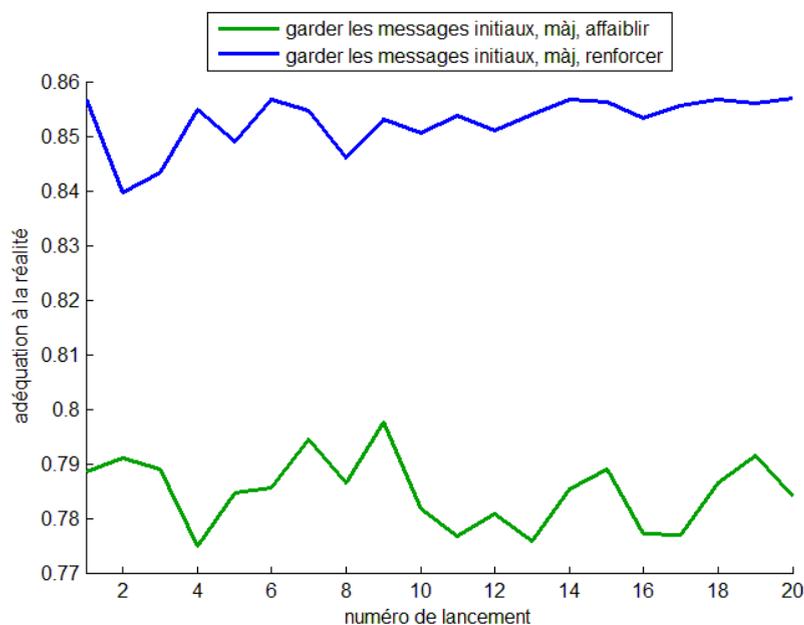


FIGURE 2.20 – Scénario n°2 (première partie) : adéquation à la réalité moyenne par méthode pour chacune des simulations.

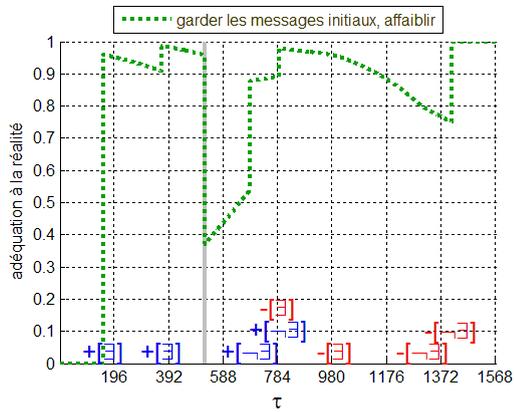
sont comparées concernant les messages gardés dans la base des véhicules : les messages initiaux, le résultat de la fusion ou le dernier message « oui » ou « non ». Les deux mécanismes de vieillissement sont comparés et l’apport de la mise à jour du monde est étudié.

Notons que ce scénario où les véhicules reçoivent des messages niant l’accident est plutôt avantageux pour la méthode triviale où seul le dernier message (« oui » ou « non ») est gardé dans la base du véhicule et son vieillissement n’est pas géré. Pour cela, les méthodes proposées sont également comparées à cette méthode dans ce scénario.

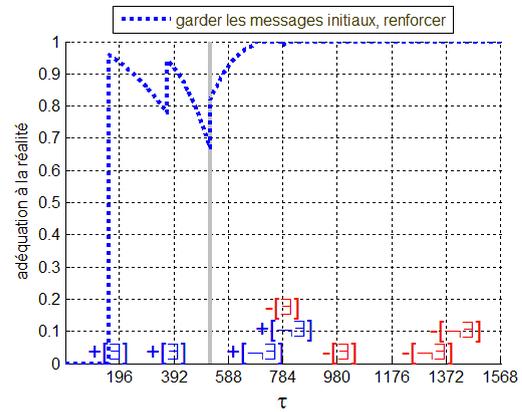
Exemple illustrant un résultat d’une simulation Pour un exemple de durée d’accident, les figures 2.19 et 2.21 illustrent l’adéquation à la réalité pour chacune des méthodes testées.

Cet exemple montre le défaut de l’affaiblissement des messages niant un événement. Le résultat tend vers l’ignorance, alors que la disparition est communiquée et confirmée. Au contraire, le renforcement gère très bien ces messages.

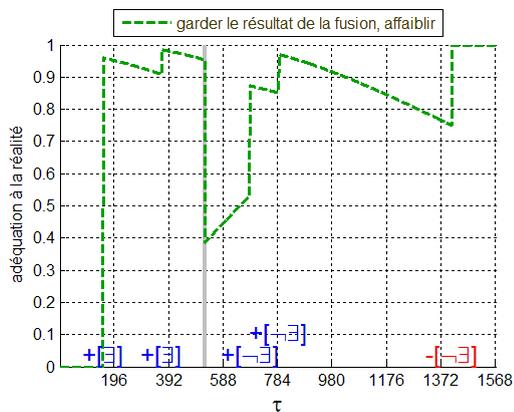
Avant la réception d’un premier message contredisant les informations contenues dans la base du véhicule, la considération de la mise à jour du monde n’impacte pas les résultats dans les méthodes où les messages initiaux sont gardés dans la base des véhicules. Dès la réception d’un premier message niant l’accident, la mise à jour du monde améliore les résultats quand l’affaiblissement est utilisé, car les messages informant de la présence de l’accident ne sont plus pris en compte dans la fusion de données. Par contre, quand le



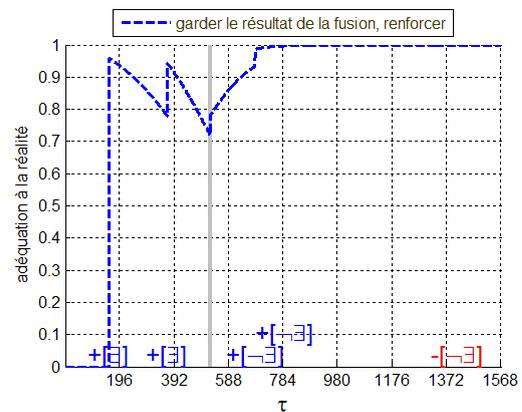
(a) Garder les messages initiaux, affaiblir.



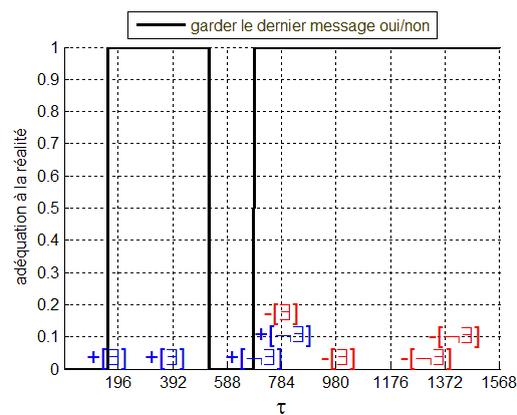
(b) Garder les messages initiaux, renforcer.



(c) Garder le résultat de la fusion, affaiblir.



(d) Garder le résultat de la fusion, renforcer.



(e) Garder le dernier message « oui » ou « non ».

FIGURE 2.21 – Scénario n°2 (deuxième partie) : adéquation à la réalité par méthode pour un exemple d'accident.

renforcement est utilisé, nous pouvons constater dans ce scénario une meilleure performance quand la mise à jour du monde n'est pas considérée, car les messages informant de la présence de l'accident sont déjà très renforcés en faveur de « n'existe pas » compte tenu de leurs dates au moment de la réception du premier message niant l'accident : le résultat de la combinaison conjonctive des messages fortement renforcés et du message niant l'accident est plus en faveur de l'absence de l'événement que le résultat du message niant l'accident.

L'exemple présenté montre également l'excellent résultat de la méthode triviale dès la réception d'un message informant de la présence de l'accident jusqu'à sa disparition et après la réception d'un message informant de l'absence de l'accident. Mais cette méthode ne permet pas de prédire la disparition de l'événement, son résultat après la disparition de l'accident et jusqu'à la réception d'un premier message le niant est extrêmement mauvaise.

Résultats du scénario (deuxième partie) Pour chaque méthode, la figure 2.22 illustre la moyenne de l'adéquation à la réalité pour chacune des 20 simulations sur toutes leurs durées, avant et après la disparition de l'accident.

Afin de mesurer la sensibilité des tests, la série de simulations précédente est lancée 9 nouvelles fois (200 simulations au total). La moyenne et l'écart-type de l'adéquation à la réalité sont obtenus pour chacune des 10 séries de simulations.

L'espérance et l'écart type de l'adéquation à la réalité de la distribution d'échantillonnage sur les 10 séries sont données dans le tableau 2.6.

Les méthodes où les véhicules gardent dans leurs bases les messages initiaux permettent de vieillir finement les messages avant de les combiner. Pour cela elles donnent un meilleur résultat dans ce scénario que celles où seul le résultat de la fusion est gardé dans la base du véhicule : avec l'affaiblissement avant la disparition de l'événement et avec le renforcement après sa disparition.

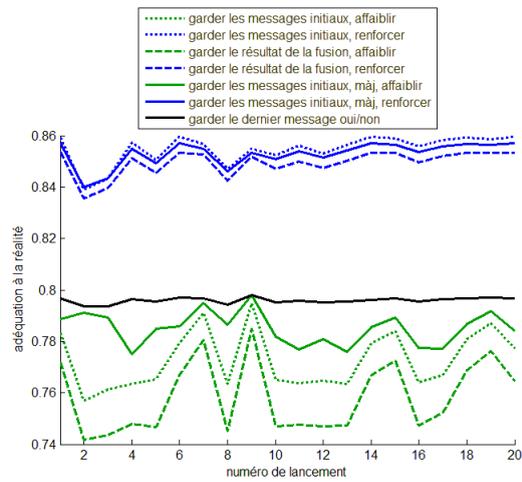
Ces résultats montrent que les méthodes de renforcement sont les plus performantes car le renforcement permet de prédire rapidement la disparition de l'accident.

Ce scénario étant avantageux pour la méthode triviale où le véhicule reçoit des messages niant l'événement assez rapidement après sa disparition, cette méthode donne un meilleur résultat que celui des méthodes utilisant l'affaiblissement.

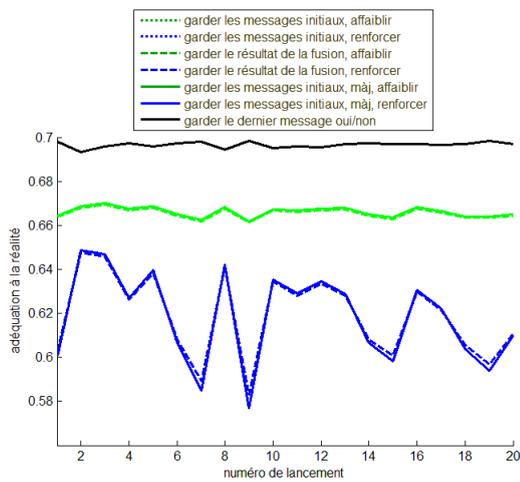
Scénario n°3 : comparer la stratégie où les messages initiaux sont gardés et celle où seule la fusion des messages est conservée

Objectif du scénario Dans ce scénario, où des messages indépendants et dépendants sont reçus, l'objectif est de comparer les méthodes où les messages initiaux sont gardés dans la base du véhicule et celles où seul le résultat de la fusion est conservé.

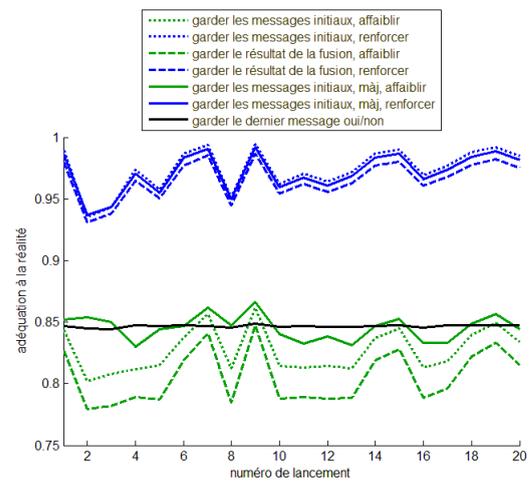
Description du scénario Ce scénario se déroule comme suit :



(a) Sur toute la durée des simulations.



(b) Avant la disparition de l'accident.



(c) Après la disparition de l'accident.

FIGURE 2.22 – Scénario n°2 (deuxième partie) : adéquation à la réalité moyenne par méthode pour chacune des simulations.

Tableau 2.6 – Scénario n°2 (deuxième partie) : espérance et écart type de l’adéquation à la réalité de la distribution d’échantillonnage sur les 10 séries de simulations pour chaque méthode testée.

(a) Sur toute la durée des simulations.	
Garder les messages initiaux, affaiblir	0.772(0.00998)
Garder les messages initiaux, renforcer	0.856 (0.00522)
Garder le résultat de la fusion, affaiblir	0.758(0.012)
Garder le résultat de la fusion, renforcer	0.85(0.00439)
Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, affaiblir	0.784(0.00601)
Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, renforcer	0.854(0.00439)
Garder le dernier message « oui » ou « non »	0.796(0.000917)
(b) Avant la disparition de l’accident.	
Garder les messages initiaux, affaiblir	0.666(0.00225)
Garder les messages initiaux, renforcer	0.618(0.0185)
Garder le résultat de la fusion, affaiblir	0.666(0.00222)
Garder le résultat de la fusion, renforcer	0.619(0.0166)
Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, affaiblir	0.666(0.00225)
Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, renforcer	0.618(0.0185)
Garder le dernier message « oui » ou « non »	0.697 (0.00105)
(c) Après la disparition de l’accident.	
Garder les messages initiaux, affaiblir	0.826(0.0159)
Garder les messages initiaux, renforcer	0.976 (0.0147)
Garder le résultat de la fusion, affaiblir	0.805(0.019)
Garder le résultat de la fusion, renforcer	0.967(0.0136)
Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, affaiblir	0.843(0.00967)
Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, renforcer	0.9725(0.0137)
Garder le dernier message « oui » ou « non »	0.847(0.001)

- v_1 perçoit un accident au bout de 10% de sa durée après son début, crée un message informant qu’il existe et l’envoie dans la foulée à v_2 et v_3 ;
- v_2 perçoit l’accident au bout de 20% de sa durée après son début, crée un message informant qu’il existe et l’envoie dans la foulée à v ;
- v_3 perçoit l’accident au bout de 30% de sa durée après son début, crée un message informant qu’il existe et l’envoie dans la foulée à v ;

Quand les messages initiaux sont gardés dans la base des véhicules, le véhicule v reçoit les messages créés par v_1 , v_2 et v_3 . Quand uniquement le résultat de fusion est gardé, le véhicule v reçoit la fusion des messages créés par v_1 et v_2 (cette fusion résulte d’une combinaison conjonctive), ensuite la fusion des messages créés par v_1 et v_3 (cette fusion résulte également d’une combinaison conjonctive) ; les deux résultats de fusion ne sont pas indépendants (sources non distinctes), ils seront donc combinés prudemment dans la base du véhicule v .

Un exemple de ce scénario où la durée de l'accident est égale à 30 minutes est illustré dans la figure 2.23.

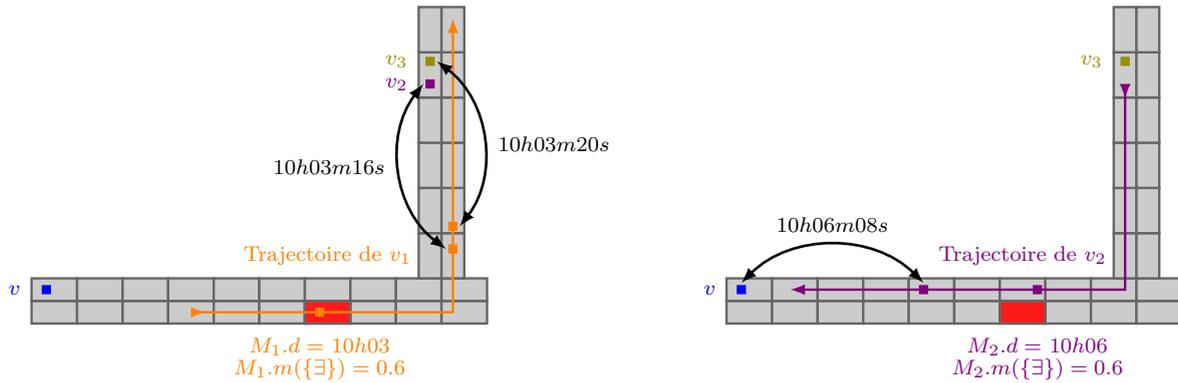
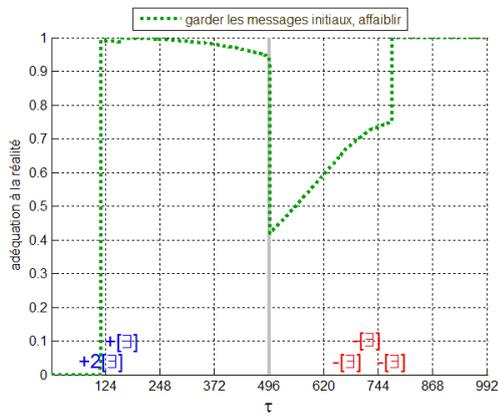


FIGURE 2.23 – Description du scénario n°3 pour un exemple d'accident qui débute à 10 h et de durée égale à 30 minutes.

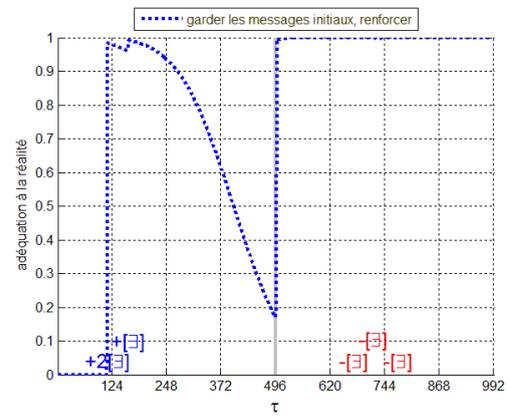
Notons que dans ce scénario, comme dans le scénario n°1, les véhicules ne reçoivent pas d'informations niant l'accident et contredisant la connaissance acquise dans la base du véhicule. Aucune mise à jour du monde n'est donc reçue après le premier message informant de la présence de l'événement et la considération de la mise à jour du monde ne modifie pas les résultats.

Exemple illustrant un résultat d'une simulation Pour un exemple de durée d'accident, la figure 2.24 illustre l'adéquation à la réalité pour chacune des méthodes.

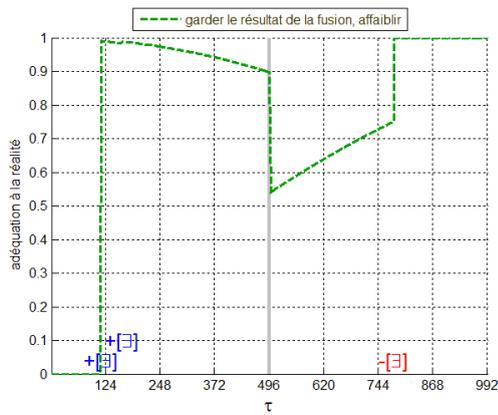
Comme dans le scénario précédent, les méthodes où les véhicules gardent dans leurs bases les messages initiaux donnent un meilleur résultat : avec l'affaiblissement avant la



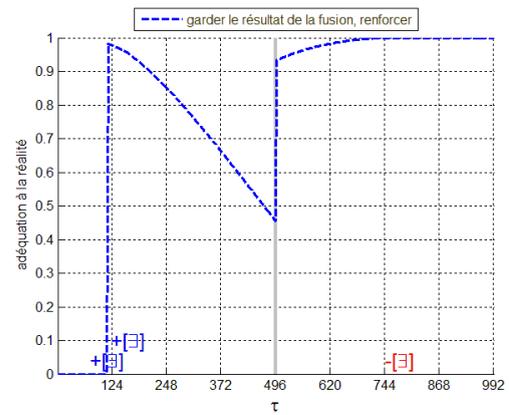
(a) Garder les messages initiaux, affaiblir.



(b) Garder les messages initiaux, renforcer.



(c) Garder le résultat de la fusion, affaiblir.

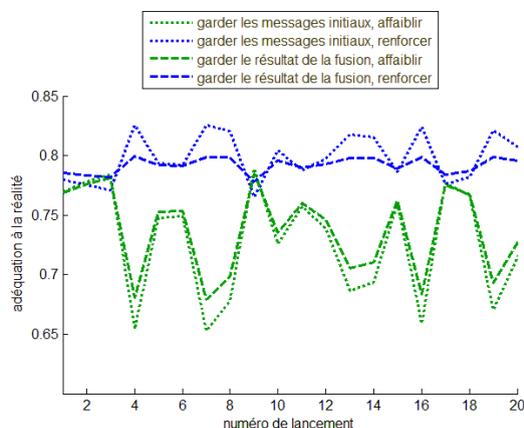


(d) Garder le résultat de la fusion, renforcer.

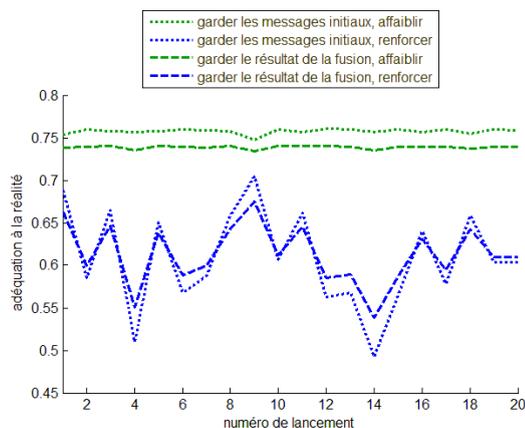
FIGURE 2.24 – Scénario n°3 : adéquation à la réalité par méthode pour un exemple d'accident.

disparition de l'événement et avec le renforcement après sa disparition.

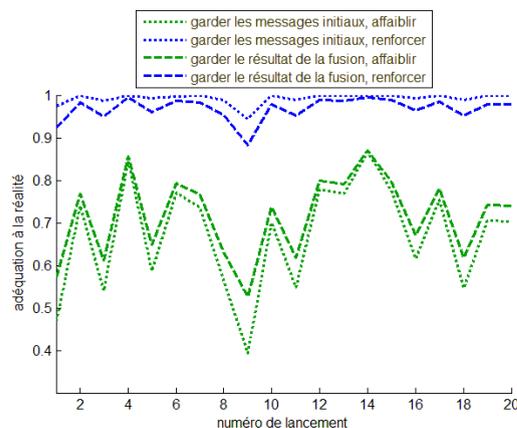
Résultats du scénario Les tests sont réalisés avec un échantillon de 20 durées d'accidents comme dans les scénarios précédents. Pour chaque méthode, la figure 2.25 illustre la moyenne de l'adéquation à la réalité pour chacune des 20 simulations sur toute leur durée, avant la disparition de l'accident et après sa fin.



(a) Sur toute la durée des simulations.



(b) Avant la disparition de l'accident.



(c) Après la disparition de l'accident.

FIGURE 2.25 – Scénario n°3 : adéquation à la réalité moyenne par méthode pour chacune des simulations.

Afin d'étudier la sensibilité des tests, la série de 20 simulations précédente est lancée 9 nouvelles fois (200 simulations au total) comme dans les scénarios précédents. Les moyennes obtenues sont données dans le tableau 2.7.

Les résultats de ce scénario confirment les conclusions précédentes. En plus, dans ce scénario la combinaison prudente est utilisée pour combiner deux messages issus de sources non distinctes. Le résultat de cette combinaison étant inférieur à celui de la combinaison

Tableau 2.7 – Scénario n°3 : espérance et écart type de l’adéquation à la réalité de la distribution d’échantillonnage sur les 10 séries de simulations pour chaque méthode testée.

(a) Sur toute la durée des simulations.	
Garder les messages initiaux, affaiblir	0.719(0.0606)
Garder les messages initiaux, renforcer	0.799 (0.0239)
Garder le résultat de la fusion, affaiblir	0.732(0.0451)
Garder le résultat de la fusion, renforcer	0.79(0.00851)
(b) Avant la disparition de l’accident.	
Garder les messages initiaux, affaiblir	0.758 (0.00223)
Garder les messages initiaux, renforcer	0.604(0.0544)
Garder le résultat de la fusion, affaiblir	0.739(0.00158)
Garder le résultat de la fusion, renforcer	0.61(0.494)
(c) Après la disparition de l’accident.	
Garder les messages initiaux, affaiblir	0.686(0.0399)
Garder les messages initiaux, renforcer	0.995 (0.00913)
Garder le résultat de la fusion, affaiblir	0.725(0.0906)
Garder le résultat de la fusion, renforcer	0.972(0.0227)

conjonctive, l’adéquation à la réalité avant la disparition de l’événement est plus importante quand tous les messages sont gardés dans la base du véhicule, mais c’est le contraire après sa disparition.

Quand l’affaiblissement est utilisé, la méthode où seule la fusion des messages est gardée donne un meilleur résultat que celle où tous les messages initiaux sont gardés, cela est dû à l’écart de l’adéquation à la réalité de ces deux méthodes après la disparition de l’événement.

Notons que les simulations où les résultats des méthodes utilisant l’affaiblissement sont équivalents aux résultats des méthodes utilisant le renforcement correspondent à des durées d’accidents très longues par rapport à la moyenne. Moins la durée d’accident est longue, meilleure est la performance des méthodes utilisant le renforcement.

Scénario n°4 : comparer toutes les méthodes dans un scénario complexe

Objectif du scénario Le but est de comparer les six méthodes proposées fondées sur des fonctions de croyance, ainsi que la méthode triviale, dans un scénario où plusieurs accidents sont présents sur la carte et un grand nombre de véhicules y circulent.

Description du scénario La carte est présentée dans la figure 2.26, elle est composée de quatre lignes et quatre colonnes de rues. Les véhicules peuvent avoir 8 possibilités de lieu de départ et lieu d'arrivée. Soient ℓ_d le lieu de départ du véhicule et ℓ_a son lieu d'arrivée, le couple $(\ell_d, \ell_a) \in \{(1, d), (d, 1), (2, c), (c, 2), (3, b), (b, 3), (4, a), (a, 4)\}$ où 1, 2, 3, 4, a, b, c et d sont les croisements illustrés dans la figure 2.26. La simulation dure une heure. Pour chaque lieu de départ, l'instant de départ du premier véhicule sortant correspond au premier instant de la simulation $\tau_r = 1$. Trois sous-scénarios sont considérés avec des débits de véhicules différents :

- un véhicule sortant par lieu de départ toutes les 50 secondes, donc 8 nouveaux véhicules apparaissent sur la carte toutes les 50 secondes et au total ce sous-scénario comprend 568 véhicules ;
- un véhicule sortant par lieu de départ toutes les 150 secondes et au total ce sous-scénario comprend 184 véhicules ;
- un véhicule sortant par lieu de départ toutes les 300 secondes et ce sous-scénario comprend au total 88 véhicules.

Contrairement aux scénarios précédents, dans ce scénario on s'intéresse à l'adéquation à la réalité de tous les véhicules présents.

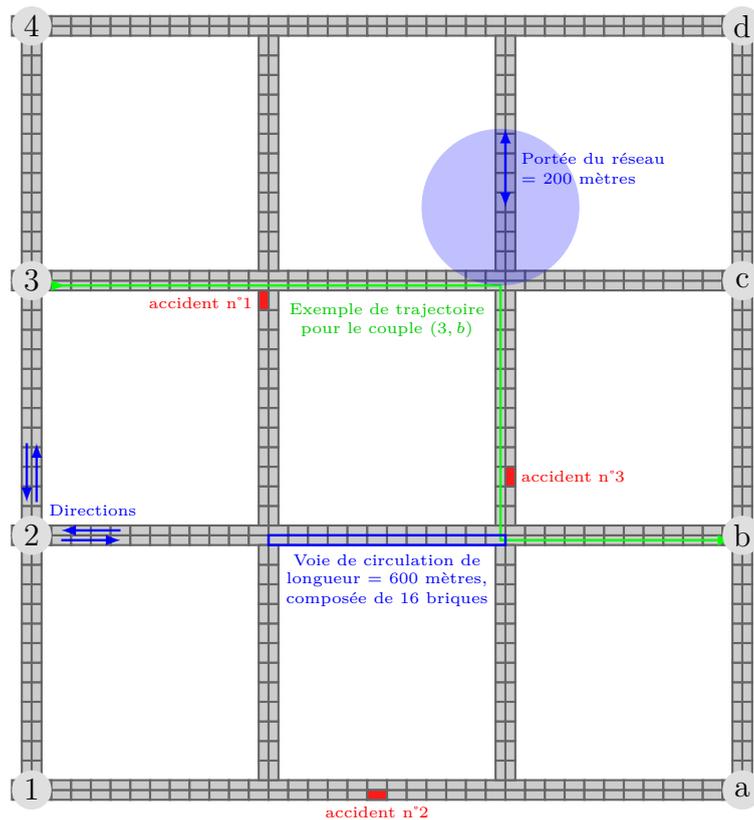


FIGURE 2.26 – Description du scénario n°4 : représentation de la carte.

Trois accidents sont présents sur la carte. Comme dans les scénarios précédents, la durée des accidents est obtenue automatiquement à partir d'une distribution normale ; mais pour des raisons de rapidité de simulation, les paramètres de cette distribution sont divisés par trois : la moyenne est de 600 secondes et l'écart type est égal à 100. Le seuil de suppression des messages est donc également révisé : $Suppr_t = \mu + u_{.99} * \sigma = 832.63$ secondes. L'instant d'apparition de chacun des accidents est illustré dans la figure 2.27 : un premier, un deuxième puis un troisième accident apparaissent respectivement 2 minutes, 7 minutes et 12 minutes après le début de la simulation.

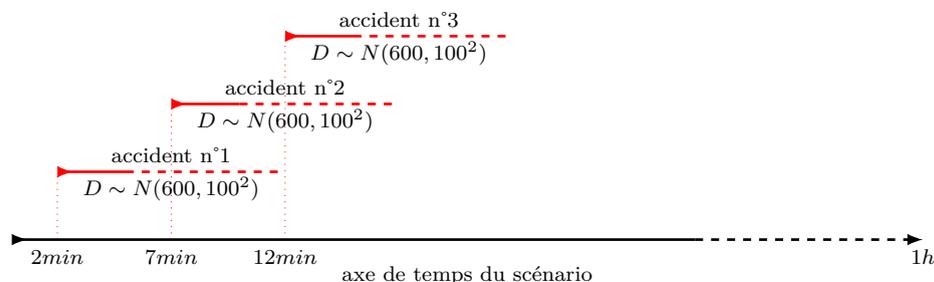


FIGURE 2.27 – Description du scénario n°4 : instants d'apparition des trois accidents.

Résultats du scénario L'adéquation à la réalité moyenne pour tous les véhicules est donnée dans le tableau 2.8 pour chacune des méthodes et chacun des deux sous-scénarios testés.

Tableau 2.8 – Scénario n°4 : moyennes de l'adéquation à la réalité par méthode pour chacun des trois sous-scénarios.

	Distance en secondes séparant deux véhicules successifs sortant d'un même lieu de départ		
	50	150	300
Garder les messages initiaux, affaiblir	0.7846	0.7047	0.6947
Garder les messages initiaux, renforcer	0.8819	0.7913	0.729
Garder le résultat de la fusion, affaiblir	0.8051	0.6976	0.6905
Garder le résultat de la fusion, renforcer	0.8448	0.7722	0.7261
Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, affaiblir	0.8475	0.7278	0.697
Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, renforcer	0.8831	0.7906	0.729
Garder le dernier message « oui » ou « non »	0.8749	0.7554	0.6626

Ces résultats confirment les conclusions des scénarios précédents :

- Garder les messages initiaux dans la base des véhicules permet de gérer plus finement les informations.

- Quand le seuil de suppression des messages peut être réglé, le renforcement vers l'absence de l'événement prédit mieux la disparition des événements locaux, comparé à l'affaiblissement qui est habituellement utilisé dans la théorie des fonctions de croyance. Avec ce dernier, même les messages niant l'événement tendent vers l'ignorance totale avec le temps.
- La mise à jour du monde améliore les résultats selon la valeur de la masse vieillie acquise dans la base avant la réception d'un premier message la contredisant. Dans un environnement dense, où les messages informant de la mise à jour du monde sont reçus rapidement, cette stratégie permet d'améliorer les résultats.

2.3 Conclusions

Plusieurs méthodes ont été proposées et comparées pour gérer au mieux les événements locaux dans les réseaux de véhicules. Les résultats ont montré l'importance de garder les messages initiaux dans la base des véhicules pour gérer finement toutes les informations reçues et de supposer que les événements disparaissent avec le temps. Le renforcement employé permet de prédire naturellement la disparition des événements, contrairement à l'affaiblissement qui tend vers l'ignorance totale avec le temps.

La mise à jour du monde a été également proposée, mais les événements considérés ne changeant pas d'état régulièrement et rapidement, son utilité dans l'amélioration des performances s'avère limitée.

La première méthode proposée a été implémentée sur des smartphones Android (voir annexe A) pour montrer la faisabilité des travaux réalisés.

Chapitre 3

Modèles pour gérer les événements étendus : le cas des embouteillages

Sommaire

3.1	Méthodes proposées	96
3.1.1	Description générale des méthodes	96
3.1.2	Gestion de la dynamique des embouteillages	98
3.1.3	Choix des messages gardés dans la base des véhicules	98
3.1.4	Différences entre les méthodes proposées et celles connues précédemment	103
3.2	Simulations	103
3.2.1	Simulateur	104
3.2.2	Adéquation à la réalité	105
3.2.3	Scénarios	105
3.3	Conclusions	121

Nous avons proposé et comparé dans le chapitre précédent différentes méthodes permettant de gérer les événements locaux.

Dans ce chapitre, le cas des embouteillages est étudié. Ce type d'événement est étendu et très dynamique géographiquement, il se développe et se résorbe selon les rues, il a donc des caractéristiques propres le différenciant des autres types d'événement.

Afin de rendre le voyage plus agréable pour les conducteurs, deux méthodes utilisant des fonctions de croyance sont proposées et étudiées dans ce chapitre pour échanger et gérer dans les réseaux de véhicules les encombrements de circulation. L'objectif est de fournir aux conducteurs la situation du trafic sur la route, afin qu'ils puissent orienter leurs trajets, ce qui permettrait de fluidifier la circulation et réduire les problèmes environnementaux. Le travail présenté dans ce chapitre a été publiés dans [27, 23, 26].

Ce chapitre est composé de trois sections. Les méthodes proposées sont présentées dans

la première section, la deuxième section expose les résultats des tests réalisés et la dernière section conclut ce chapitre.

3.1 Méthodes proposées

Pour gérer les événements étendus géographiquement, deux méthodes sont proposées dans cette section, elles diffèrent par le choix de garder les messages initiaux où uniquement le résultat de la fusion dans la base des véhicules. Ces différences sont exposées dans la section 3.1.3.

Ces méthodes sont fondées sur celles présentées dans le chapitre précédent pour gérer les événements locaux. Cependant, les événements étendus n'ont pas les mêmes caractéristiques que celles des événements locaux.

Afin de gérer la dynamique des embouteillages, les méthodes présentées dans ce chapitre gèrent différemment l'obsolescence des événements connus dans la base des véhicules et prennent en compte la mise à jour du monde. La gestion de la dynamique des embouteillages est présentée dans la section 3.1.2.

En outre, quand le véhicule reçoit une partie des informations concernant une voie de circulation, les méthodes proposées permettent de lisser les résultats obtenus et prédire la présence de l'événement sur d'autres tronçons de la voie de circulation, en considérant l'influence des informations connues dans le voisinage. Prenons l'exemple d'un véhicule détenant des informations de présence d'un embouteillage sur un début et une fin d'une voie de circulation, le mécanisme proposé (décrit dans la section 3.1.3), permet de considérer qu'il est probable qu'un embouteillage soit également présent au milieu de cette voie de circulation.

3.1.1 Description générale des méthodes

Messages créés et décomposition de la carte

Un message M créé par une source S est un 5-uplet (S, t, d, ℓ, m) informant qu'un événement de type t est présent ou n'est pas présent à la localisation ℓ , à la date d et avec une croyance m . L'ensemble $\Omega = \{\exists, \bar{\exists}\}$ est le cadre de discernement sur lequel la fonction de masse $M.m$ est définie.

Le type $M.t$ de l'événement, sa présence ou son absence et la croyance correspondante $M.m(\{\exists\})$ ou $M.m(\{\bar{\exists}\})$ sont saisis par le conducteur ; la date de création du message $M.d$ et la localisation du véhicule sont générés automatiquement ; et la position de l'événement par rapport au véhicule est donnée par le conducteur.

La carte est découpée en zones rectangulaires appelées briques, dont la longueur $LonB_t$

dépend du type d'événement t . Le découpage est réalisé par type d'événement pour permettre une économie de la bande passante et de la mémoire interne.

Les méthodes considèrent que deux messages correspondent à un même événement $e = (t, b)$ s'ils informent du même type d'événement t et leurs localisations sont situées sur la même brique b , qui est celle de l'événement.

Obsolescence des messages

Un seuil de suppression $Suppr_t$ est défini pour chaque type d'événement t à partir duquel les messages sont considérés obsolètes. Un message $M_{e,i}$ est supprimé de la base d'un véhicule quand $\Delta(date_actuelle, M_{e,i}.d) > Suppr_t$ avec Δ une distance et $date_actuelle$ la date et l'heure actuelles.

Pour chaque type d'événement, le seuil de suppression $Suppr_t$ peut être fixé à sa durée maximale connue dans l'historique. Pour le type d'événement « embouteillage », il peut être fixé à la durée maximale connue de l'année précédente par exemple dans la zone géographique concernée. Dans certaines villes, il peut être très élevé. À Pékin, l'embouteillage le plus long de l'histoire a duré 11 jours en août 2010 sur plus d'une centaine de kilomètres [9, 3, 1].

En plus, certains types d'événements comme « travaux » ont une période prédéfinie de présence. Ces informations peuvent être prises en compte pour fixer une date à partir de laquelle les messages antérieurs seront supprimés.

Résumé des méthodes proposées

Un résumé des deux méthodes proposées pour gérer les embouteillages est exposé dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 – Résumé des méthodes proposées pour gérer les embouteillages.

Méthode	Combinaison
1 Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, influencer	Conjonctive
2 Garder le résultat de la fusion, mettre à jour le monde, influencer	Conjonctive ou prudente

Dans ces méthodes, la mise à jour du monde est considérée, les fonctions de masse ne sont pas vieillies avant leur fusion et un mécanisme d'influence est proposé pour gérer l'étendue des embouteillages.

Dans la première méthode, chaque véhicule construit localement sa propre synthèse de la réalité en gardant dans sa base les messages initiaux, le résultat de la fusion n'est pas communiqué.

Dans la deuxième méthode, pour chaque véhicule et chaque événement, seulement le résultat de la fusion est gardé dans la base, il est échangé avec les véhicules voisins.

Notons que si le taux de vieillissement des messages est nul dans les méthodes « garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, affaiblir » et « garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, renforcer » proposées dans le chapitre précédent pour gérer les événements locaux, ces dernières sont équivalentes à la première méthode proposée pour gérer les embouteillages et intitulée « garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, influencer » avec un taux d'influence égal à 0.

3.1.2 Gestion de la dynamique des embouteillages

Vieillessement des messages

Un embouteillage peut durer aussi bien quelques minutes que quelques heures. La durée des embouteillages ne pouvant pas être maîtrisée, le seuil de suppression $Suppr_t$ ne sera pas utilisé pour le vieillissement des messages, contrairement aux méthodes présentées dans le chapitre précédent. En effet, les messages ne seront pas vieillis avant leur fusion dans les méthodes proposées dans ce chapitre pour gérer les embouteillages.

Mise à jour du monde

La dynamique du type d'événement « embouteillage » est très variable. Un embouteillage peut se former et disparaître plus ou moins rapidement. Sa durée est difficilement prédictible. Pour cela, la prise en compte instantanée du changement de l'environnement est nécessaire. Dès la réception d'un message plus récent contredisant les informations acquises précédemment, ces dernières sont supprimées de la base du véhicule et ne sont plus utilisées dans la construction de la synthèse donnée au conducteur. Il s'agit de considérer que le monde a changé (voir la section 1.3.2) et que le nouveau message reçu est prioritaire car il est plus récent, les informations antérieures sont oubliées.

La procédure de mise à jour du monde est exposée dans la section 2.1.3 quand les messages initiaux sont gardés dans la base des véhicules. L'algorithme 3 expose cette procédure quand uniquement le résultat de fusion est gardé dans la base du véhicule pour chaque événement e .

3.1.3 Choix des messages gardés dans la base des véhicules

Comme dans le chapitre précédent, deux stratégies de choix de messages gardés dans la base des véhicules sont proposées.

Ces deux stratégies ont été détaillées dans la section 2.1.2 du chapitre précédent, une

Algorithm 3 Procédure de mise à jour du monde quand uniquement le résultat de fusion est gardé dans la base du véhicule pour chaque événement e .

Require: Événement $e = (t, b)$ où t est le type et b est la brique sur laquelle il est localisé ; un nouveau message $M_{e,n}$.

begin

if ($BetP\{M_e.m\}(\{\exists\}) > 0.5$ et $BetP\{M_{e,n}.m\}(\{\exists\}) > 0.5$) ou ($BetP\{M_e.m\}(\{\exists\}) > 0.5$ et $BetP\{M_{e,n}.m\}(\{\exists\}) > 0.5$) **then**

if $M_{e,n}.d > M_e.d$ **then**

 {Mise à jour du monde.}

$M_e \leftarrow M_{e,n}$.

else

 Ne pas prendre en compte $M_{e,n}$.

end if

end if

end

synthèse est présentée dans cette section, sachant que la seule différence est que les fonctions de masses ne sont pas vieillies avant leur fusion dans les méthodes proposées pour gérer les embouteillages.

Garder les messages initiaux dans la base des véhicules

La base interne de chacun des véhicules comprend les messages initiaux créés ou reçus, qui sont échangés avec les autres véhicules voisins. Les véhicules ne diffusent pas les informations fusionnées.

Les messages correspondant à un même événement $e = (t, b)$, où t est leur type et b est la brique sur laquelle leur localisation ℓ est située, sont groupés ensemble.

Quand un message est reçu, il remplace un message de la base du véhicule s'il s'agit d'une mise à jour. C'est-à-dire si les sources et les types sont les mêmes, les localisations sont situées sur la même brique et la date du message reçu est postérieure à celle du message contenu dans la base du véhicule. Sinon, il est ajouté dans la base du véhicule s'il n'y est pas déjà présent.

Ensuite, pour chaque véhicule et chaque événement $e = (t, b)$, une seule fonction de masse résulte de l'étape de fusion, il s'agit de la combinaison conjonctive de toutes les fonctions masses $M_{e,i}.m$ contenues dans la base du véhicule et concernant cet événement.

Ensuite, pour chaque véhicule et chaque événement $e = (t, b)$, toutes les fonctions masses $M_{e,i}.m$ contenues dans la base du véhicule et concernant cet événement e sont fusionnées en utilisant la combinaison conjonctive. Une seule fonction de masse résulte de cette fusion.

Garder uniquement le résultat de la fusion dans la base des véhicules

Dans l'objectif de limiter le nombre de messages échangés et gérés dans la base des véhicules, uniquement le résultat de la fusion est gardé dans la base des véhicules dans cette stratégie.

Pour chaque événement e sur lequel un véhicule reçoit des informations, un seul message M_e est gardé dans la base. Il s'agit du résultat de fusion de tous les messages reçus concernant l'événement à partir de la dernière mise à jour du monde.

Un message M_e concernant un événement $e = (t, b)$ est un 5-uplet (S, t, d, ℓ, m) , où S est la liste des sources ayant créées des messages concernant l'événement e depuis la dernière mise à jour du monde, t est le type de l'événement, d est la date du message reçu le plus récent, ℓ est l'ensemble des lieux contenus dans les messages depuis la dernière mise à jour du monde et m est la fonction de masse associée à l'événement.

Quand un nouveau message reçu informant d'un événement e contredit la connaissance acquise dans la base, il remplace le résultat de fusion si sa date est supérieure à la date $M_e.d$, sinon il n'est pas considéré dans le processus de fusion et le message M_e n'est pas modifié. S'il ne contredit pas le message M_e , il est combiné avec ce dernier conjonctivement si leurs sources sont distinctes, ou prudemment si au moins une des sources est commune aux deux messages.

Influences des événements pour prédire la situation globale de la route

Quand un événement étendu est présent sur la route, la base interne des véhicules peut contenir des informations concernant certaines parties de la vérité terrain. La figure 3.1 donne un exemple d'une voie de circulation entièrement embouteillée, où la base interne d'un véhicule contient des informations de présence d'un embouteillage uniquement sur certaines briques de cette voie de circulation.

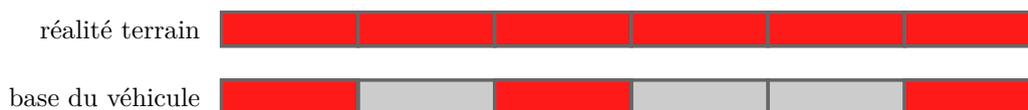


FIGURE 3.1 – Exemple où la base du véhicule ne connaît qu'une partie de la réalité terrain.

Le mécanisme présenté dans cette section permet d'extrapoler les événements connus en lissant le résultat donné au conducteur. Il permet de prédire la propagation spatiale des événements étendus et par conséquent la situation globale de la route. Il est décrit pour le type d'événement « embouteillage » dans cette section.

Génération des influences

Dans une rue à sens unique, un embouteillage s'étend dans le sens opposé de la circulation. Et au contraire, il disparaît dans le sens de la circulation. Un message reçu informant de la présence d'un embouteillage sur une brique influence les briques suivantes dans le sens de la circulation. Mais s'il nie la présence d'un embouteillage sur une brique, son influence portera sur les briques précédentes.

Soit β le taux d'influence, ce mécanisme consiste à générer pour chaque événement (t, b) dans la base du véhicule les influences sur les briques suivantes ou précédentes en affaiblissant (section 1.1.2) la fonction de masse obtenue dans l'étape précédente d'un taux égal à $1 - \beta$. Il s'agit d'influencer les briques suivantes si la fonction de masse associée à la brique b confirme la présence d'un embouteillage ($BetP_{t,b}(\{\exists\}) > 0.5$) et les briques précédentes sinon ($BetP_{t,b}(\{\bar{\exists}\}) > 0.5$).

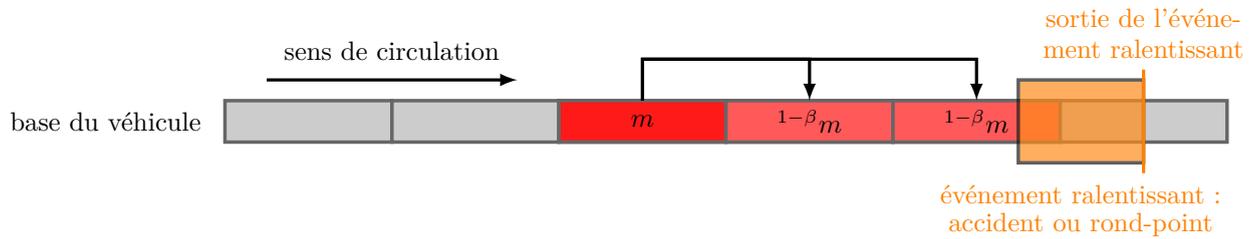
Un embouteillage est présent à cause de certains types d'événements ralentissant tels qu'un accident ou un croisement de rues. Les véhicules sont ralentis jusqu'à la sortie de l'événement ralentissant, sachant qu'il peut être plus ou moins étendu. Dans la méthode proposée, la carte est modélisée de telle façon qu'un croisement sépare deux voies de circulations successives; un croisement de rues pouvant ralentir les véhicules et créer un embouteillage, la génération d'influences est réalisée par voie de circulation.

Les influences confirmant la présence d'un embouteillage sont donc générées jusqu'à la sortie du premier événement ralentissant identifié. La brique sur laquelle cette sortie est présente n'est pas influencée car cela dépend de leurs localisations, la méthode est donc moins certaine de la présence d'un embouteillage sur cette brique. Si la sortie de l'événement ralentissant se trouve entre deux briques, seule la première brique, dans le sens de la circulation, est influencée. Cet événement ralentissant peut être connu dans la base du véhicule suite à la réception de messages le confirmant. Autrement dit, la probabilité pignistique $BetP(\{\exists\})$ de l'événement ralentissant identifié dans la base du véhicule doit être strictement supérieure à 0.5 pour considérer qu'il est présent et arrêter la génération des influences à sa sortie. Les ronds-points sont également des événements ralentissant, on considère que les véhicules ont une connaissance de leurs localisations.

Les influences niant la présence d'un embouteillage sont générées de la même façon mais dans la direction opposée, jusqu'à la sortie du premier événement pouvant ralentir les véhicules, ce qui peut provoquer un embouteillage sur les briques le précédant.

La figure 3.2 illustre ce mécanisme de génération d'influences dans le cas où la fonction de masse confirme la présence de l'événement et celui où elle nie sa présence. Notons que le résultat de ce mécanisme n'est pas communiqué aux véhicules voisins.

Le mécanisme d'influence dépend du type d'événement. Par exemple, la propagation d'un brouillard dépend de raisons météorologiques et non du sens de la circulation, alors que les travaux sont statiques. Pour cela, la méthode proposée dans cette section s'applique uniquement au type d'événement « embouteillage ».



(a) Influences d'une fonction de masse informant de la présence d'un événement.

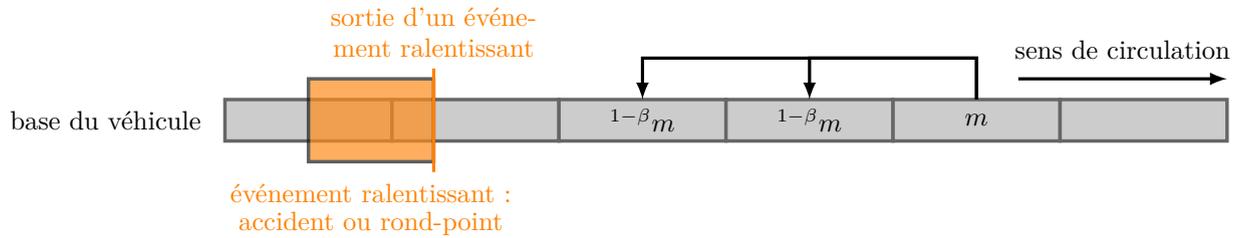
(b) Influences d'une fonction de masse informant de l'absence d'un événement. Notons que la brique concernée par l'événement n'est pas de couleur rouge car seuls les événements présents sur la carte ($BetP(\{\exists\}) > 0.5$) sont affichés au conducteur.

FIGURE 3.2 – Influences d'une fonction de masse.

Fusionner avec les résultats obtenus du mécanisme d'influence

Pour chaque type d'événement t et chaque brique b occupée par t , les fonctions de masse obtenues des deux étapes précédentes sont combinées conjonctivement tout en considérant la mise à jour du monde.

La figure 3.3 illustre un exemple, où les fonctions de masse obtenues par la fusion des messages créés et reçus sont m_1 et m_2 , elles informent de la présence d'un embouteillage ($BetP(\{\exists\}) > 0.5$). Les influences de chacune de ces fonctions de masses et le résultat de la fusion de cette étape sont également présentées.

Afficher le résultat de la fusion au conducteur

Les probabilités pignistiques, équation (1.26), sont calculées pour chaque événement (t, b) pour afficher au conducteur une synthèse de la situation de la route.

Les influences générées et les résultats des fusions réalisées dans cette étape ne sont pas communiqués entre véhicules.

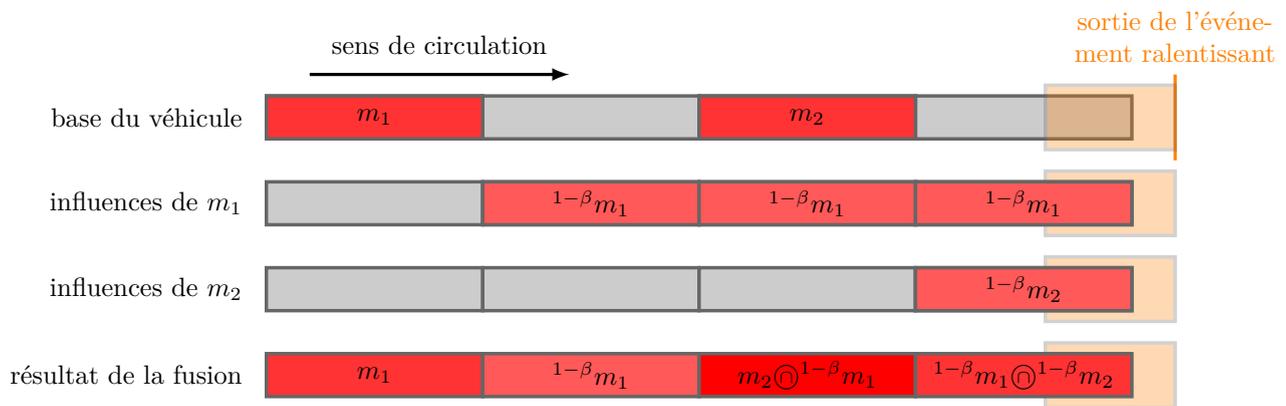


FIGURE 3.3 – Exemple de fusion du résultat des messages reçus et des influences.

3.1.4 Différences entre les méthodes proposées et celles connues précédemment

Dans [101] et [32], la spatialité des événements est gérée selon la distance entre le point observé et les localisations des points (messages) à proximité sur lesquelles des informations sont disponibles. En plus, Lang et Muller [101] affaiblissent la masse des points localisés très étroitement les uns des autres. Dans [32], Cherfaoui et al. traitent ce problème en utilisant la règle de combinaison conjonctive prudente pour combiner des messages ayant une localisation appartenant au même segment de route.

Dans les méthodes proposées, le cas des embouteillages est considéré. Ce type d'événement dépend entre autres du sens de la circulation dans les rues, cela n'a pas été considéré dans les méthodes présentées dans [101] et [32]. Cet événement peut être très dynamique et sa durée est très variable. Pour cela les méthodes proposées dans ce chapitre considèrent la mise à jour du monde contrairement aux méthodes proposées précédemment. Ces dernières ne gèrent pas cet aspect de l'environnement autrement que par l'affaiblissement des messages.

3.2 Simulations

Des expérimentations sont réalisées pour étudier les méthodes proposées pour gérer les événements étendus. Ces méthodes étant adaptées et détaillées dans ce chapitre pour le type d'événement « embouteillage », seulement des scénarios portant sur ce type d'événement sont réalisés.

3.2.1 Simulateur

Le simulateur VMES décrit dans la Section 2.2.1 est utilisé pour réaliser les tests sur le type d'événement « embouteillage ». Les spécificités liées à ce type sont décrites dans cette section.

Un embouteillage est considéré présent sur une brique dans la réalité terrain si les deux conditions suivantes sont vérifiées : la densité de la brique est supérieure à 100 véhicules/km et la vitesse moyenne des véhicules présents sur cette brique est inférieure à 30 km/h. Notons, que cette simulation de présence des embouteillages dans la réalité terrain est approximative. Dans la réalité, trois phases du trafic sont identifiées et dépendent de paramètres de vitesses, de débit et de densité [96, 95] : la phase fluide, la phase synchronisé et les congestions majeures et mobiles.

Les événements ralentissant pouvant générer des embouteillages sont les croisements de rues et les accidents dans les présentes expérimentations réalisées. Les véhicules sont ralentis de 90% sur les briques du type d'événement « accident » sur lesquels un accident est présent, nous rappelons que la taille des briques « accident » est égale à 50 mètres. Ils sont ralentis de 70% sur 67 mètres avant les croisements de rues, ce qui correspond dans les expérimentations à la taille des briques du type d'événement « embouteillage ». La figure 3.4 illustre en couleur orange les tronçons des voies de circulation concernés par ce ralentissement.

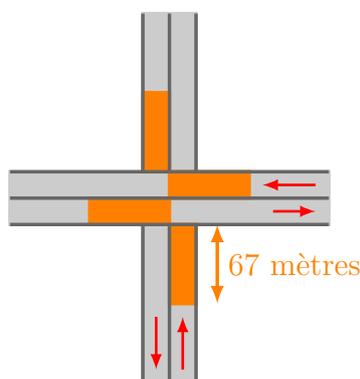


FIGURE 3.4 – Zones sur lesquelles les véhicules sont ralentis à cause des ronds-points.

Si aucun événement ralentissant n'est présent, aucun embouteillage ne peut être généré quelque soit la densité des véhicules, car ils ne sont pas ralentis et ils circulent donc tous à la vitesse maximale qui est égale à 45 km/h. Notons également qu'un véhicule peut avancer jusqu'au pare-choc du véhicule précédent quelque soit leurs vitesses, mais il ne peut pas le doubler. Dans un cas où un train de véhicule s'est formé suite à un accident, après la disparition de ce dernier, tous les véhicules circuleront à la vitesse maximale pare-choc contre pare-choc si aucun autre événement ralentissant n'est présent. Notons que ce comportement n'est pas représentatif de la réalité, il s'agit d'une limitation du simulateur.

3.2.2 Adéquation à la réalité

La mesure de performance employée est celle utilisée dans les expérimentations des événements locaux, elle est décrite dans la Section 2.2.2.

3.2.3 Scénarios

Différents scénarios sont testés permettant d'illustrer l'intérêt de la méthode proposée pour le type d'événement « embouteillage ».

Concernant les paramètres des méthodes, le seuil de suppression $Suppr_t$ est égal à 4 h pour le type d'événement « embouteillage ». Les influences sont générées quand un événement ralentissant est connu, pour cela le taux d'influence β des méthodes proposées pour événements étendus est égal à 0.8, ce qui correspond à une croyance assez élevée mais non sûre.

Un message créé peut informer de la présence ou de l'absence d'un événement. Une croyance égale à 0.6 sera associée à $\{\exists\}$ ou $\{\bar{A}\}$ de la fonction de masse du message. Cette croyance est identique pour tous les véhicules.

Scenario n°1 : étudier l'intérêt de la mise à jour du monde dans le suivi d'un embouteillage de son apparition à sa disparition

Objectif du scénario L'objectif est d'étudier l'intérêt de la mise à jour du monde, dans un scénario où l'environnement est très dynamique et tous les véhicules créent des messages informant de la situation de la route. Il s'agit de montrer comment les méthodes proposées suivent un embouteillage de son apparition à sa disparition. Elles sont comparées à la deuxième méthode proposée pour les événements locaux, qui consiste à garder tous les messages dans la base du véhicule, les renforcer en utilisant le seuil de suppression $Suppr_t$ (taux de renforcement $\nu_{e,i} = \frac{1}{Suppr_{M_{e,i},t}} \cdot \Delta(date_actuelle, M_{e,i}.d)$, le résultat tend vers la négation avec le temps) et les prendre tous en compte dans le processus de fusion sans considérer la mise à jour du monde.

Description du scénario Dans ce scénario, illustré sur la figure 3.5, un embouteillage apparaît suite à la sortie de véhicules d'un centre commercial après sa fermeture, puis disparaît de la voie de circulation. L'événement ralentissant est le rond-point suivant le lieu de départ des véhicules de la voie de circulation concernée.

Les symboles $(\neg)R_b$ présents dans les figures représentent l'évolution de la réalité terrain. Le symbole R_b , avec b un entier, signifie qu'un embouteillage est apparu dans la réalité terrain sur la brique dont le numéro est b . Le symbole $\neg R_b$ signifie qu'un embouteillage a disparu de la brique b .

Dans la réalité terrain, aucune brique de la voie de circulation concernée n'est occupée par un embouteillage au début du scénario, puis progressivement, la voie de circulation devient bouchée suite à un débit très élevé égal à un véhicule par seconde pendant deux minutes : cinq briques sur six de la voie de circulation sont occupées par un embouteillage 108 secondes ($\tau = 27$) après le début de la simulation.

Le débit des véhicules devient ensuite moins important, il est égal à 0.1 véhicule/seconde pendant 110 secondes, puis aucun véhicule passe dans la voie de circulation jusqu'à la fin de la simulation qui dure au total 328 secondes.

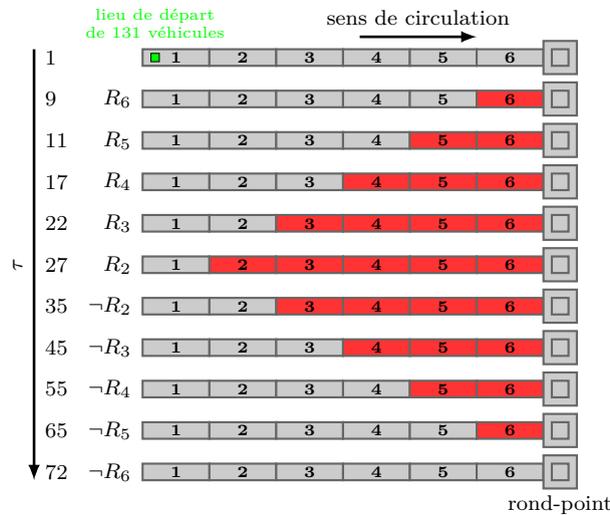
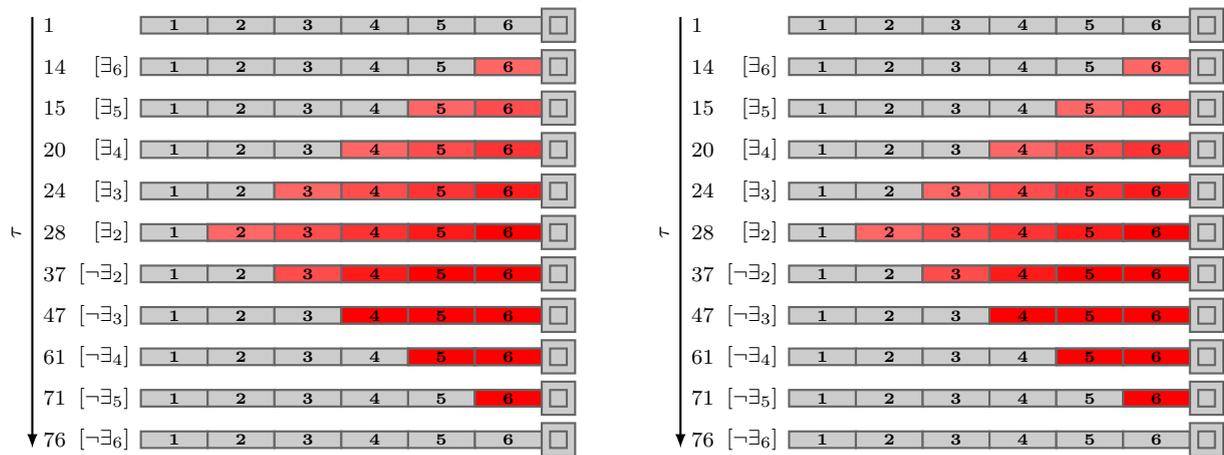


FIGURE 3.5 – Description de la réalité terrain des scénarios n°1 et n°2 pour le type d'événement « embouteillage ».

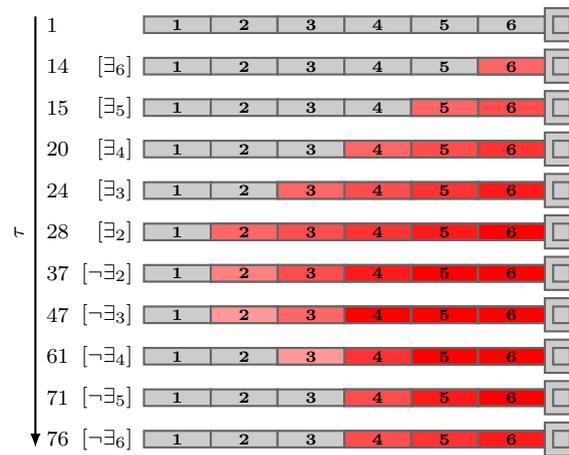
Ce scénario compte au total 132 véhicules, dont uniquement 15 utilisent les méthodes et communiquent, ils sont appelés les véhicules communicants. Ces véhicules créent des messages dès que possible pour informer de la réalité terrain, c'est-à-dire de l'apparition ou de la disparition de l'embouteillage sur chacune des briques concernées. Parmi les 15 véhicules communicants présents dans ce scénario, un seul véhicule, nommé v , ne passe pas par la voie de circulation concernée par l'embouteillage. Étant localisé à côté de cette voie, ne se déplaçant pas et étant présent pendant toute la simulation, il reçoit tous les messages créés par les autres véhicules communicants dans la foulée après leur création. Tous les autres véhicules, dont ceux non communicants, ont le même lieu de départ illustré en vert sur la figure 3.5, ils se dirigent vers le rond-point suivant, et au rond-point ils font demi-tour, ils continuent tout droit ou ils tournent à gauche ou à droite afin d'arriver à leurs destinations. Un véhicule sur 10 parmi ces véhicules est intelligent, sachant que les premier et dernier véhicules partant du lieu de départ sont communicants.

Résultats du scénario Le résultat donné au conducteur du véhicule v et l'adéquation à la réalité correspondante sont donnés pour chaque méthode testée dans les Figures 3.6 et



(a) Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, influencer.

(b) Garder le résultat de la fusion, mettre à jour le monde, influencer.



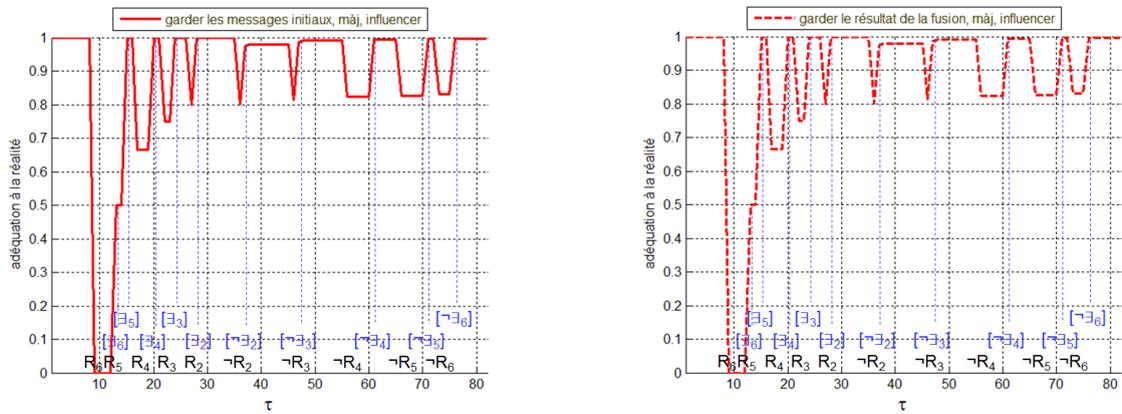
(c) Garder les messages initiaux, renforcer.

FIGURE 3.6 – Scénario n°1 : résultat donné au conducteur du véhicule v pour chacune des méthodes testées.

3.7. Le symbole $[\exists_b]$, avec b un entier, signifie que le véhicule v a reçu un premier message informant de la présence d'un embouteillage sur la brique dont le numéro est b . Le symbole $[\neg\exists_b]$ signifie que le véhicule v a reçu un premier message niant la présence d'un embouteillage sur la brique b .

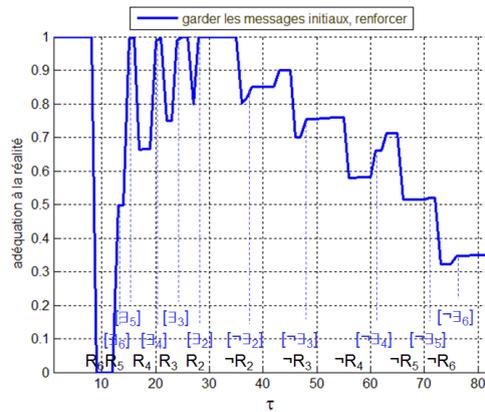
La moyenne sur toute la simulation de l'adéquation à la réalité des 15 véhicules communicants est donnée dans le Tableau 3.2 pour chacune des méthodes testées.

Dans ce scénario où les véhicules créent dès que possible des messages informant de la réalité terrain sur toutes les briques concernées par l'embouteillage, la différence des résultats porte principalement sur la gestion des messages contredisant les informations contenues dans les véhicules. Ce scénario illustre l'intérêt de la considération de la mise à jour du monde qui assure une réactivité dans les changements de situation quant à la gestion



(a) Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, influencer.

(b) Garder le résultat de la fusion, mettre à jour le monde, influencer.



(c) Garder les messages initiaux, renforcer.

FIGURE 3.7 – Scénario n°1 : adéquation à la réalité dans le véhicule v du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.

Tableau 3.2 – Scénario n°1 : moyenne de l’adéquation à la réalité du type d’événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.

Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, influencer	0.88191
Garder le résultat de la fusion, mettre à jour le monde, influencer	0.88185
Garder les messages initiaux, renforcer	0.703

des événements dynamiques.

Les résultats des deux méthodes proposées pour événements étendus sont très proches. La différence porte uniquement sur la règle de combinaison quand les sources des messages ne sont pas distinctes, elle est détaillée dans le scénario n°6.

Scénario n°2 : étudier l’intérêt du mécanisme d’influence quand l’événement ralentissant est un rond-point

Objectif du scénario L’objectif est d’étudier l’apport du mécanisme d’influence dans un scénario où une partie des informations est reçue et un embouteillage est créé suite à un débit élevé de véhicules dans une voie de circulation, l’événement ralentissant étant un rond-point. Les méthodes proposées pour le type d’événement « embouteillage » sont testées avec et sans le mécanisme d’influence.

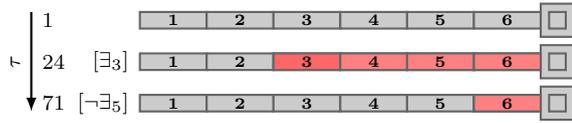
Notons que sans l’emploi du mécanisme d’influence, la méthode proposée dans ce chapitre où les messages initiaux sont gardés dans la base des véhicules est équivalente aux méthodes proposées pour événements locaux dans le chapitre précédent prenant en compte la mise à jour du monde mais sans l’emploi du vieillissement.

Description du scénario Ce scénario reprend la réalité terrain du scénario précédent illustrée sur la figure 3.5.

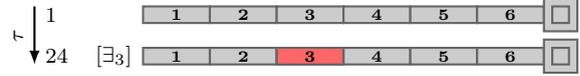
La différence par rapport au scénario précédent porte sur la création de messages confirmant ou niant l’embouteillage.

Dans ce scénario, un véhicule crée un message informant de la présence d’un embouteillage sur la brique n°3. Plus tard, après la disparition de l’embouteillage sur la voie de circulation, un autre véhicule crée un message le niant sur la brique n°5. Ce dernier message est créé uniquement si la méthode utilisée informe qu’un embouteillage est présent sur cette brique.

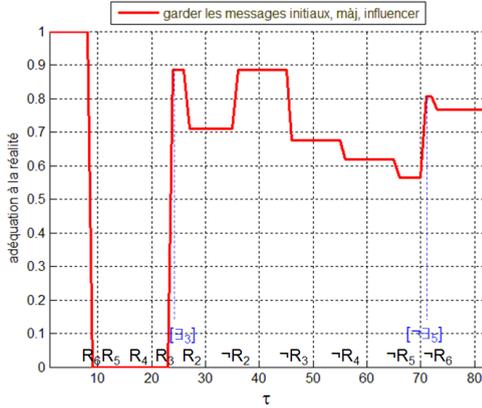
Résultats du scénario Le résultat donné au conducteur pour chacune des méthodes est représenté dans la figure 3.8. La figure 3.9 illustre l’adéquation à la réalité dans le véhicule



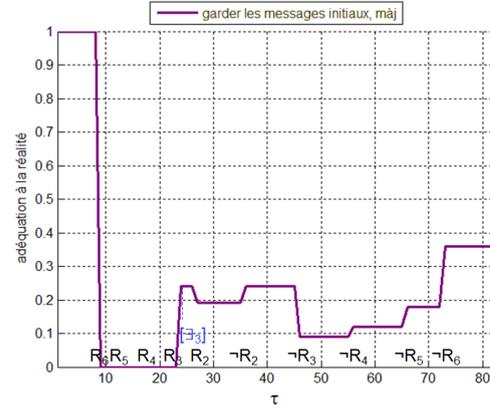
(a) Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, influencer.



(b) Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde.

FIGURE 3.8 – Scénario n°2 : résultat donné au conducteur du véhicule v pour chacune des méthodes testées.

(a) Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, influencer.



(b) Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde.

FIGURE 3.9 – Scénario n°2 : adéquation à la réalité dans le véhicule v du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.

v avec et sans l'emploi du mécanisme d'influence.

Dans ce scénario, les deux méthodes proposées pour événements étendus donnent exactement le même résultat, car les messages combinés ont des sources distinctes et la règle de combinaison conjonctive est donc utilisée pour les deux méthodes.

La moyenne sur toute la simulation de l'adéquation à la réalité des 15 véhicules communicants est donnée dans le tableau 3.3 avec et sans l'emploi du mécanisme d'influence.

Tableau 3.3 – Scénario n°2 : moyenne de l'adéquation à la réalité du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.

Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, influencer	0.621
Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde	0.242

Ce scénario montre comment le mécanisme d'influence proposé permet de gérer efficacement le type d'événement étendu « embouteillage ».

Scenario n°3 : étudier l'intérêt du mécanisme d'influence quand l'événement ralentissant est un accident connu dans la base des véhicules

Objectif du scénario Comme dans le scénario précédent, l'objectif est de tester le mécanisme d'influence. Dans ce scénario, l'embouteillage est formé suite à un accident. Les véhicules sont informés de cette cause rapidement avant de recevoir des informations de présence liées à l'embouteillage.

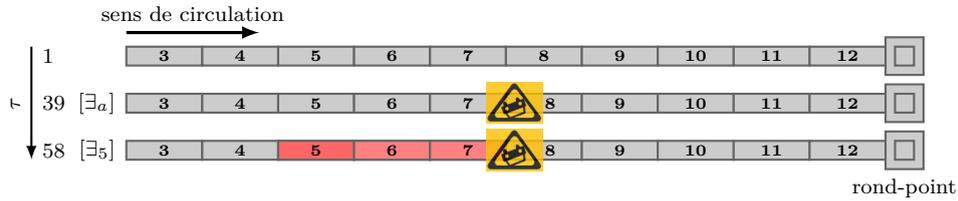
Description du scénario Un accident apparait au début de ce scénario et dure jusqu'à sa fin, ce qui engendre un embouteillage dans la voie de circulation sur laquelle il est situé comme illustré sur la figure 3.10. Le symbole R_a signifie qu'un accident est apparu.

Dans ce scénario qui dure 392 secondes, 151 véhicules sont présents. Et comme dans les scénarios précédents, un véhicule communicant v est présent à proximité de la voie de circulation, sa localisation lui permet de recevoir rapidement les messages concernant les événements présents sur la voie de circulation. Les autres véhicules viennent de différentes voies de circulation et traversent tous la voie de circulation où l'accident est présent. Un sur dix de ces véhicules est intelligent, au total ce scénario comprend 16 véhicules communicants dont le véhicule v .

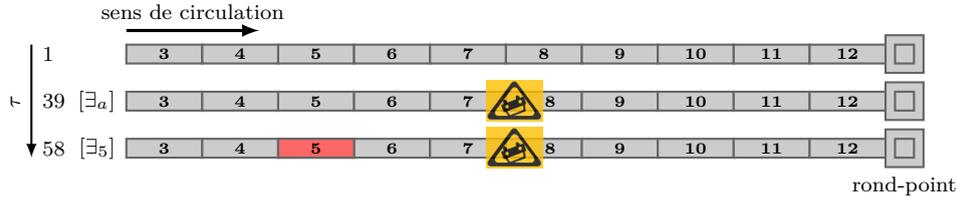


FIGURE 3.10 – Description de la réalité terrain du scénario n°3 pour le type d'événement « embouteillage ».

Un premier message est créé pour informer de la présence de l'accident. Un peu plus tard, un autre véhicule crée un message informant qu'un embouteillage est présent sur la brique n°5. Ces messages sont reçus par tous les véhicules dans cet ordre. Les véhicules recevant le deuxième message connaissent donc la cause de l'embouteillage et peuvent prédire correctement son influence.



(a) Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, influencer.



(b) Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde.

FIGURE 3.11 – Scénario n°3 : résultat donné au conducteur du véhicule v pour chacune des méthodes testées.

Résultats du scénario Comme dans le scénario précédent, les deux méthodes proposées pour événements étendus donnent exactement le même résultat.

Le résultat donné au conducteur du véhicule v avec et sans l’emploi du mécanisme d’influence est représenté dans la figure 3.11. Et l’adéquation à la réalité dans le véhicule v est illustrée dans la figure 3.12. Le symbole $[\exists_a]$ indique que le véhicule v a reçu un premier message informant de la présence de l’accident.

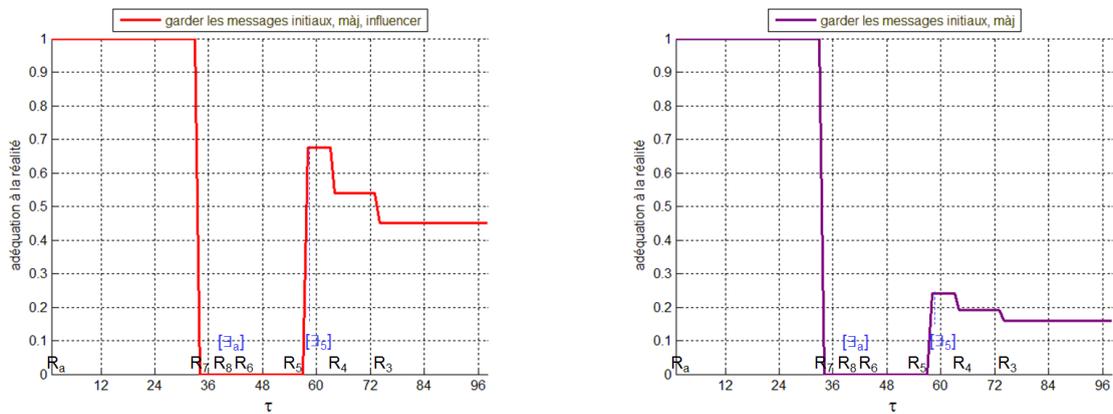
La moyenne sur toute la simulation de l’adéquation à la réalité des 16 véhicules communicants est donnée dans le tableau 3.4 avec et sans l’emploi du mécanisme d’influence.

Tableau 3.4 – Scénario n°3 : moyenne de l’adéquation à la réalité du type d’événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.

Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, influencer	0.548
Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde	0.412

Ce scénario, où les véhicules connaissent la cause de l’embouteillage, montre l’intérêt de l’influence, qui permet de prédire correctement la réalité terrain dès la réception d’un premier message informant de l’embouteillage.

Notons que la brique n°8 n’est pas influencée par le message reçu informant de la présence d’un embouteillage sur la brique n°5. En effet, la sortie de l’accident se situe sur la brique n°8 et la méthode ne peut donc pas prédire un embouteillage sur cette brique.



(a) Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, influencer. (b) Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde.

FIGURE 3.12 – Scénario n°3 : adéquation à la réalité dans le véhicule v du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.

Scénario n°4 : étudier le comportement du mécanisme d'influence quand l'événement ralentissant n'est pas connu par les véhicules

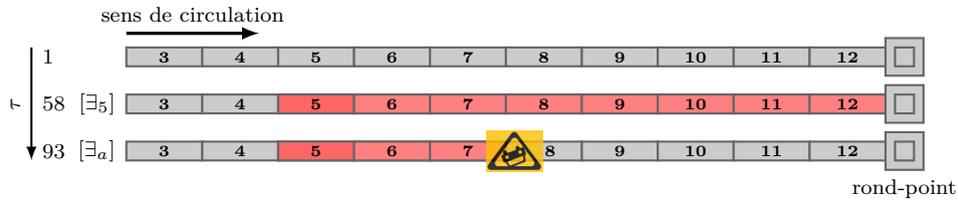
Objectif du scénario L'objectif de ce scénario est d'étudier le comportement du mécanisme d'influence dans un scénario où la vraie cause de l'embouteillage sur lequel les véhicules ont des informations n'est pas connue rapidement.

Statistiquement, les messages créés informent des événements selon leur ordre chronologique. C'est-à-dire, l'accident étant plus ancien que l'embouteillage, il est fort probable que des messages informant de l'accident soient créés avant ceux informant de l'embouteillage, donc avant l'apparition de ce dernier. Dans ce scénario, nous testons un cas extrême où les véhicules sont informés de la présence de l'accident tardivement et ils pensent donc à tort que l'événement ralentissant est le rond-point suivant l'embouteillage dans le sens de la circulation.

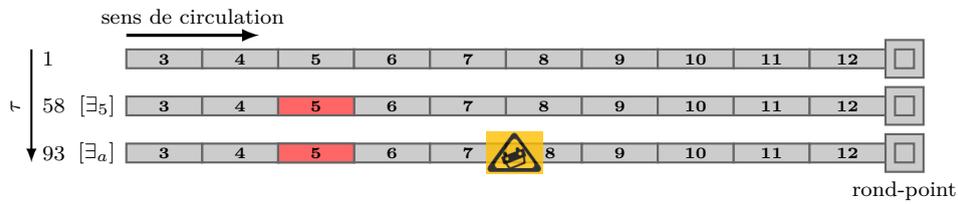
Description du scénario Ce scénario reprend la réalité terrain du scénario précédent illustrée sur la figure 3.10.

La différence par rapport au scénario précédent porte uniquement sur l'ordre de création des messages. Le message informant de la présence d'un accident est créé après celui informant de la présence d'un embouteillage, sachant que la date de création de ce dernier n'a pas changé.

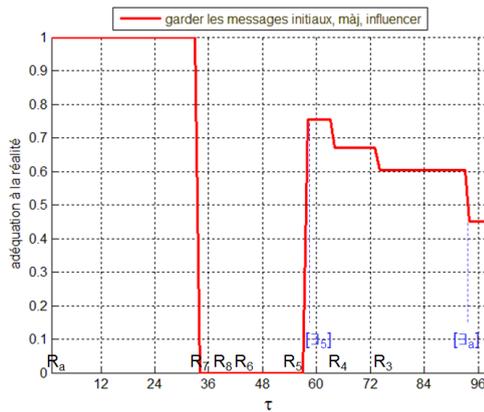
Résultats du scénario Le résultat donné au conducteur pour chacune des méthodes est représenté dans la figure 3.13. La figure 3.14 illustre l'adéquation à la réalité dans le véhicule v avec et sans l'emploi du mécanisme d'influence.



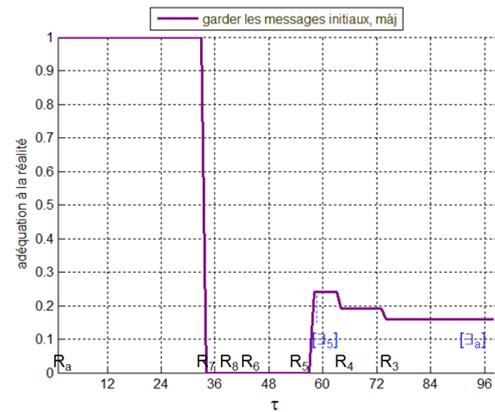
(a) Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, influencer.



(b) Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde.

FIGURE 3.13 – Scénario n°4 : résultat donné au conducteur du véhicule v pour chacune des méthodes testées.

(a) Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, influencer.



(b) Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde.

FIGURE 3.14 – Scénario n°4 : adéquation à la réalité dans le véhicule v du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.

Ce scénario n'est clairement pas avantageux pour la méthode utilisant le mécanisme d'influence, mais dès la réception du message informant de l'accident, le résultat donné au conducteur est corrigé.

La moyenne sur toute la simulation de l'adéquation à la réalité des 16 véhicules communicants est donnée dans le tableau 3.5 avec et sans l'emploi du mécanisme d'influence.

Tableau 3.5 – Scénario n°4 : moyenne de l'adéquation à la réalité du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.

Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, influencer	0.598
Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde	0.412

La mesure de performance utilisée considère les briques sur lesquelles un événement est présent dans la réalité terrain et celles de la synthèse donnée au conducteur à partir des informations contenues dans la base du véhicule. En fonction de la méthode utilisée et du scénario, l'ensemble des briques considérées ainsi que sa cardinalité peuvent être différents. Pour cette raison, l'adéquation à la réalité des méthodes proposées pour le type d'événement « embouteillage » est plus élevée dans ce scénario comparée à celle obtenue dans le scénario précédent. L'adéquation à la réalité moyenne des 12 briques de la voie de circulation concernée par l'embouteillage est donnée dans le tableau 3.6 pour ce scénario et le scénario précédent, pour chacune des méthodes testées.

Tableau 3.6 – Scénario n°3 et n°4 : moyenne de l'adéquation à la réalité du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées prenant en compte toutes les briques de la voie de circulation.

	Scénario n°3	Scénario n°4
Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, influencer	0.852	0.791
Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde	0.832	0.791

Plus rapidement la vraie cause de l'embouteillage est connue, mieux serait le résultat des méthodes proposées employant le mécanisme d'influence.

Scenario n°5 : étudier le suivi du trafic par les méthodes proposées quand l'événement ralentissant apparaît puis disparaît

Objectif du scénario L'objectif est d'étudier le comportement du mécanisme d'influence et l'apport de la mise à jour du monde dans un scénario où un accident apparaît, génère un

embouteillage, puis disparaît de la réalité terrain et le trafic est transféré à la fin de la voie de circulation (dans le sens de la circulation).

Le symbole $R_{b_x-b_y}$ indique que des embouteillages apparaissent sur les briques b_x à b_y . Le symbole $\neg R_{a,b_x-b_y}$ indique que l'accident ainsi que les embouteillages des briques b_x à b_y ont disparu.

Description du scénario Comme dans les deux scénarios précédents, un accident apparaît au début de ce scénario et génère un embouteillage comme décrit dans la figure 3.10. L'accident disparaît au bout de 392 secondes, ce qui fait disparaître l'embouteillage sur toutes les briques en même temps (comportement lié au simulateur). Le train de véhicule formé avant la disparition de l'accident se déplace à la vitesse maximale de 45 km/h jusqu'au rond-point suivant où un nouvel embouteillage est généré comme illustré dans la figure 3.15. Le scénario dure 10 minutes, à sa fin aucun embouteillage n'est présent sur la voie de circulation considérée.

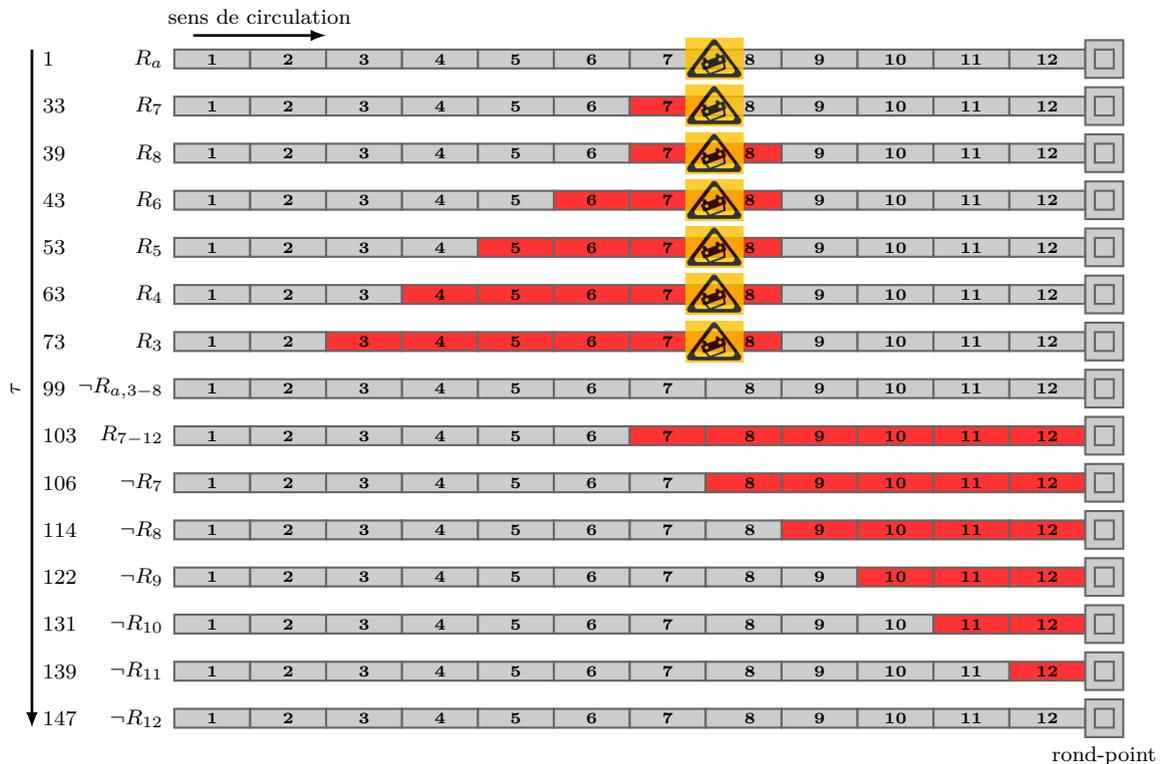
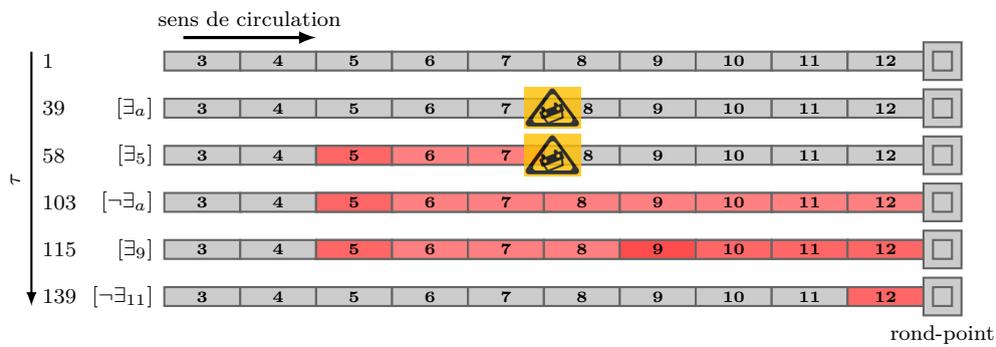
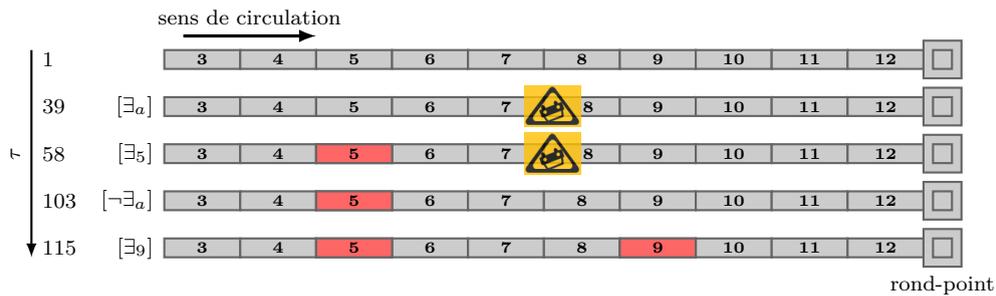


FIGURE 3.15 – Description de la réalité terrain du scénario n°5 pour le type d'événement « embouteillage ».

Jusqu'à la disparition de l'accident, ce scénario est identique au scénario n°3. Après la disparition de l'accident, un véhicule crée un message informant de cette disparition, puis un autre véhicule informe du nouvel embouteillage formé en créant un message concernant



(a) Garder les messages initiaux ou le résultat de la fusion, mettre à jour le monde, influencer.



(b) Garder les messages initiaux ou le résultat de la fusion, mettre à jour le monde.

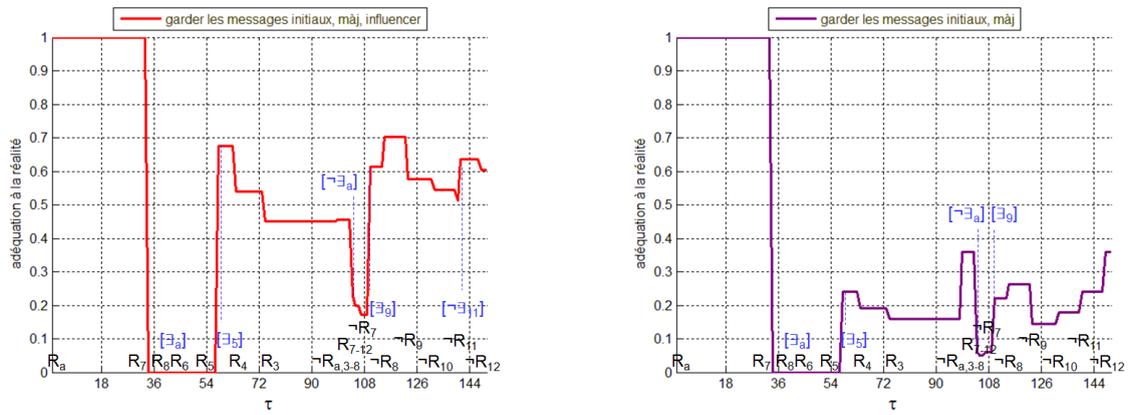
FIGURE 3.16 – Scénario n°5 : résultat donné au conducteur du véhicule v pour chacune des méthodes testées.

la brique n°9 et un dernier informe de la disparition de l’embouteillage sur la brique n°11. Ce scénario dure au total 10 minutes.

Résultats du scénario Le résultat donné au conducteur pour chacune des méthodes est représenté dans la figure 3.16. La figure 3.17 illustre l’adéquation à la réalité dans le véhicule v avec et sans l’emploi du mécanisme d’influence.

Ce scénario illustre comment le mécanisme d’influence suit l’évolution du trafic dès l’apparition de l’accident et jusqu’à sa disparition. Notons qu’à la réception d’une information concernant la disparition de l’accident, le message informant d’une présence d’un embouteillage sur la brique n°5 continue à être considéré, mais son influence est modifiée, ce message influence les briques jusqu’au prochain rond-point, ce qui permet de commencer la prédiction du nouvel embouteillage généré dans la réalité terrain.

Pour le type d’événement « embouteillage », la moyenne sur toute la simulation de l’adéquation à la réalité des 16 véhicules communicants est donnée dans le tableau 3.7.



(a) Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, influencer.

(b) Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde.

FIGURE 3.17 – Scénario n°5 : adéquation à la réalité dans le véhicule v du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.

Tableau 3.7 – Scénario n°5 : moyenne de l'adéquation à la réalité du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.

Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, influencer	0.548
Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde	0.343

Scénario n°6 : étudier la différence entre les deux méthodes proposées pour le type d'événement « embouteillage »

Objectif du scénario La différence entre les deux méthodes proposées dans ce chapitre pour gérer le type d'événement « embouteillage » est illustrée dans ce scénario.

Description du scénario Ce scénario compte au total 203 véhicules, dont uniquement 4 véhicules communicants, ils sont nommés v , v_1 , v_2 et v_3 . Afin d'arriver à leurs différentes destinations, 200 véhicules dont v_1 passent par une même voie de circulation. Pendant les 32 premières secondes de la simulation, le débit entrant dans cette voie de circulation est égale à 1 véhicule/seconde, ce qui génère un embouteillage sur deux briques comme illustré dans la figure 3.18 à d_2 . De la 33^e seconde à la 332^e seconde de la simulation, un véhicule entre dans la voie de circulation toutes les deux secondes, le véhicule v_1 en fait partie, ce qui maintient l'embouteillage sur les deux briques jusqu'à la fin de la simulation, qui dure au total 400 secondes.

Le véhicule v_1 crée des messages pour confirmer la présence d'un embouteillage sur les deux briques concernées de la voie de circulation. Il échange ces messages avec les véhicules

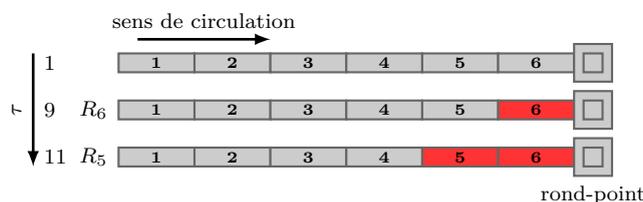


FIGURE 3.18 – Description de la réalité terrain du scénario n°6 pour le type d’événement « embouteillage ».

v_2 et v_3 . Ces derniers créent chacun des messages concernant les briques occupées par l’embouteillage et communiquent les messages contenus dans leurs bases au véhicule v à tour de rôle. Le déplacement des véhicules communicants ainsi que les messages créés et échangés sont illustrés dans la figure 3.19.

Résultats du scénario Dans la méthode où les messages initiaux sont gardés, le véhicule v reçoit à $\tau = 41$ les messages contenus dans la base de v_2 qui sont ceux créés par v_1 et v_2 , puis les messages contenus dans la base de v_3 à $\tau = 64$ qui sont ceux créés par v_1 et v_3 ; pour chaque brique, les messages créés par v_1 , v_2 et v_3 sont combinés conjonctivement. Dans la deuxième méthode proposée pour événements étendus où seul le résultat de la fusion est gardé dans la base des véhicules pour chaque événement, le véhicule v reçoit à $\tau = 41$ la fusion des messages créés par v_1 et v_2 puis celle des messages créés par v_1 et v_3 à $\tau = 64$, ces deux résultats de fusion sont obtenus en utilisant la règle de combinaison conjonctive car les sources sont distinctes, la règle de combinaison prudente est utilisée pour fusionner dans la base du véhicule v ces deux résultats de fusion car les sources des deux résultats de fusion ne sont pas distinctes ($\{v_1, v_2\} \cap \{v_1, v_3\} \neq \emptyset$), le résultat obtenu est moins informatif que celui obtenu avec la première méthode proposée. Cette différence est illustrée dans la figure 3.20, qui représente l’adéquation à la réalité dans le véhicule v pour chacune des méthodes à partir de l’instant où le véhicule v reçoit une première information concernant l’embouteillage.

Le symbole $[\exists_{b_x, b_y}]_{v_i}$ indique le moment de la réception des premiers messages dont la source est v_i informant de la présence d’un embouteillage sur les briques b_x et b_y . Le symbole $[\exists_{b_x, b_y}]_{v_i, v_j}$ indique que le message reçu est un résultat de fusion de messages dont les sources sont v_i et v_j .

Pour le type d’événement « embouteillage », ce scénario illustre la différence entre les deux méthodes, sachant qu’elle reste très faible, d’où un résultat de performance sur toute la simulation pour les quatre véhicules communicants très proche et arrondi à 0.675.

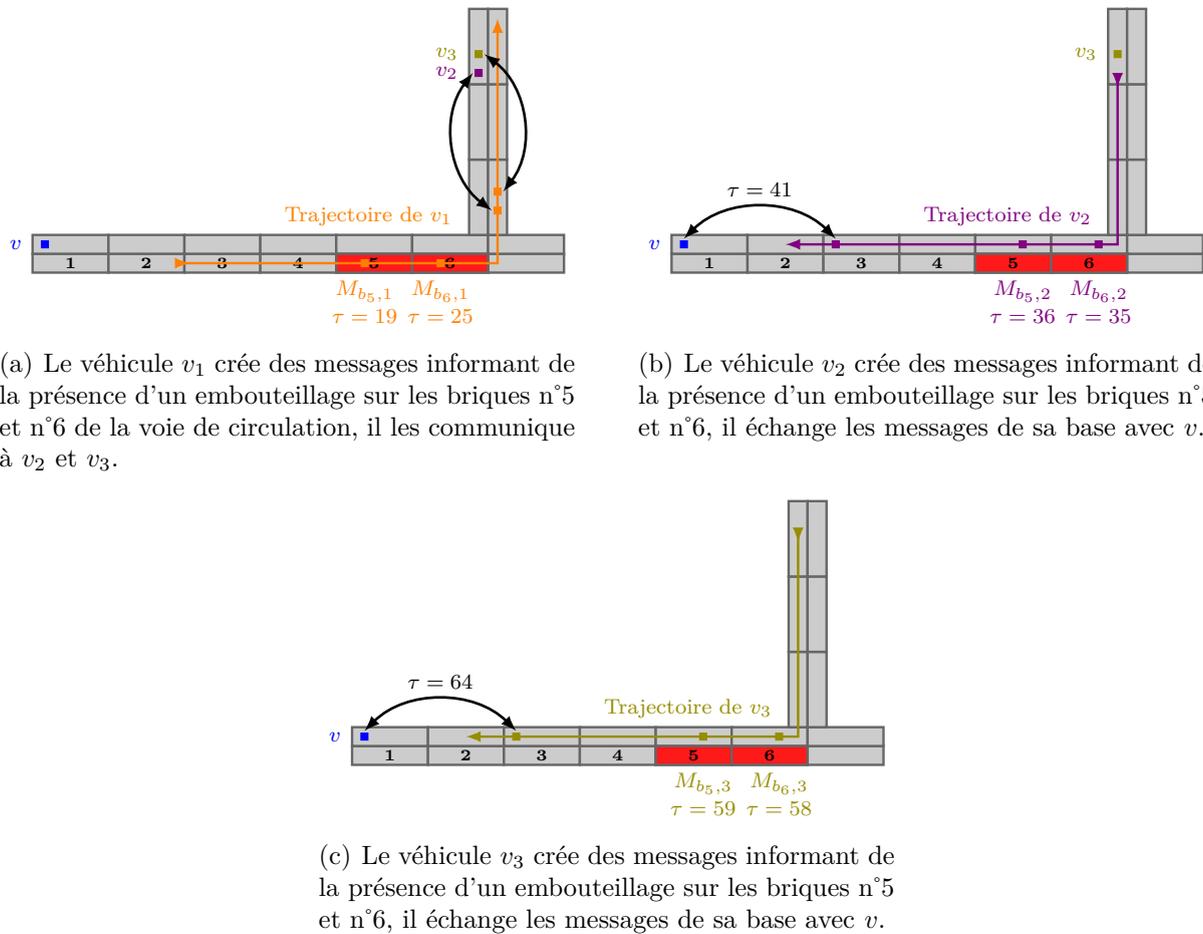


FIGURE 3.19 – Description du scénario n°6 : création et échange des messages entre les véhicules communicants.

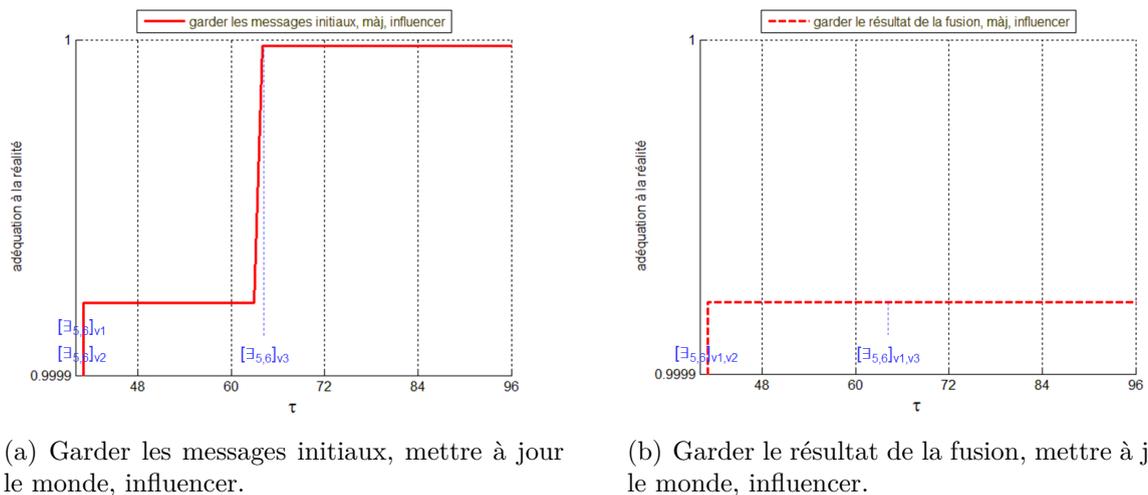


FIGURE 3.20 – Scénario n°6 : adéquation à la réalité dans le véhicule v du type d'événement « embouteillage » pour chacune des méthodes testées.

3.3 Conclusions

Deux méthodes ont été proposées dans ce chapitre permettant la gestion des encombrements de circulation dans les réseaux de véhicules. La mise à jour du monde a permis de prendre en compte la dynamique importante de ce type d'événement. Un mécanisme d'influence a été introduit, permettant de donner une vue globale de la situation de la route aux conducteurs, en gérant la spatialité des embouteillages. Les mécanismes proposés ont été testés et leur utilité prouvée via notre simulateur.

La première méthode proposée consiste à garder les messages initiaux dans la base des véhicules, cette stratégie est intéressante et permet de gérer finement les informations contenues dans les véhicules. Cependant, elle est très légèrement plus performante que la stratégie où seul le résultat de la fusion est gardé dans la base des véhicules. Cette dernière est proposée dans la deuxième méthode, elle permet d'économiser de la bande passante et de la mémoire interne et acquiert moins de capacité et de temps de calculs. Elle semble plus adaptée à la gestion des informations concernant les embouteillages qui sont dynamiques qui peuvent apparaître et disparaître très rapidement. Il s'agit en général de zones très denses, et un nombre important de messages en provenance de sources hétérogènes peut être reçu pour informer de la présence ou de l'absence de l'embouteillage sur chacune des briques de la carte.

Chapitre 4

Améliorations des méthodes proposées et perspectives développées

Sommaire

4.1	Résistance des méthodes proposées aux fausses informations .	123
4.2	Améliorer le vieillissement des messages informant des événements locaux	124
4.3	Méthodes pour gérer d'autres événements étendus : les travaux et les brouillards	125
4.3.1	Rappel des méthodes proposées pour gérer les embouteillages . . .	127
4.3.2	Méthodes pour gérer les travaux	128
4.3.3	Méthodes pour gérer les brouillards	131
4.3.4	Généralisation du mécanisme d'influence	134
4.4	Améliorer le résultat affiché au conducteur des méthodes gérant les embouteillages	135
4.5	Adaptabilité des méthodes proposées au mode centralisé dans les VANET	138
4.6	Conclusions	139

Dans les chapitres 2 et 3, des méthodes sont proposées pour gérer les événements locaux et les embouteillages. Des améliorations de ces méthodes ainsi que des perspectives avancées sont exposées dans ce chapitre. Premièrement, la résistance des méthodes aux fausses informations est étudiée. Ensuite, une amélioration du vieillissement des informations est proposée. Des nouvelles méthodes sont exposées pour gérer les types d'événements étendus « travaux » et « brouillards » et des améliorations de celles proposées pour gérer les embouteillages sont suggérées. Finalement, l'adaptabilité des méthodes au mode de fusion centralisé est illustrée.

4.1 Résistance des méthodes proposées aux fausses informations

Dans le chapitre 2, six méthodes ont été proposées pour gérer les événements locaux. Dans les expérimentations réalisées, elles ont été comparées à une méthode triviale où les messages informent si « oui » ou « non » l'événement est présent et pour chaque véhicule seul le message le plus récent est gardé dans la base.

Dans cette section, un scénario est développé pour tester la résistance de ces méthodes aux informations en provenance des véhicules malveillants. Il est inspiré du scénario n°4 décrit dans la section 2.2.3.

Trois accidents apparaissent au début de la simulation (premier instant de la simulation). Leurs durées sont obtenues automatiquement d'une distribution normale de moyenne égale à 300 secondes et d'écart type égal à 50. Les véhicules partent des croisements à gauche ou à droite de la carte pour arriver à leurs destinations qui sont situées à l'opposé de la carte : trajectoire en diagonale, de gauche à droite ou de droite à gauche. Un véhicule part de chaque croisement de départ toutes les 50 secondes. La carte étant composée de quatre lignes et quatre colonnes de rues, le nombre de croisements de départ est égal à huit. Ce scénario dure 30 minutes et comprend au total 96 véhicules.

Les sept méthodes sont testées afin d'étudier leur résistance aux mensonges, avec les sous-scénarios suivants :

- aucun véhicule n'est malveillant ;
- un véhicule sur 10 est malveillant.

Dans cette expérimentation, un véhicule malveillant signale toujours le contraire de ce qu'il perçoit ; c'est à dire, quand il perçoit un événement ou s'il a des informations dans sa base confirmant la présence d'un événement alors qu'il ne le perçoit pas, il informe du contraire de la réalité.

L'adéquation à la réalité (voir section 2.2.2) est utilisée pour mesurer la performance des méthodes. Sa moyenne sur toute la durée de la simulation est donnée dans le tableau 4.1 pour chacune des méthodes et chacun des sous-scénarios.

Ces résultats montrent que la méthode triviale est moins performante que les méthodes proposées dans le chapitre 2 utilisant des fonctions de croyance.

Notons que dans ce scénario, les méthodes employant la mise à jour du monde résistent autant que les autres méthodes aux fausses informations. Les raisons sont les suivantes :

- Quand un faux message est créé juste avant la disparition d'un accident, cela améliore le résultat après cette disparition.
- La densité des véhicules dans ce scénario étant élevée, quand un faux message est créé, il est rapidement mis à jour par un message en provenance d'un véhicule disant la vérité.

Ces résultats montrent qu'un travail important reste à mener dans les travaux futurs,

Tableau 4.1 – Scénario testé pour étudier la résistance des méthodes aux fausses informations : moyenne de l’adéquation à la réalité pour chacun des sous-scénarios et chacune des méthodes testées.

	Pourcentage des véhicules malveillants	
	0%	10%
Garder les messages initiaux, affaiblir	0.3253	0.24
Garder les messages initiaux, renforcer	0.424	0.3234
Garder le résultat de la fusion, affaiblir	0.3314	0.253
Garder le résultat de la fusion, renforcer	0.4028	0.3105
Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, affaiblir	0.3265	0.2396
Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, renforcer	0.4237	0.3234
Garder le dernier message « oui » ou « non »	0.1824	0.1369

afin d’étudier finement la résistance des méthodes aux fausses informations.

Notons que les résultats de l’adéquation à la réalité des différentes méthodes sont plus mauvais que ceux obtenus dans le scénario n°4 de la section 2.2.3 car la durée moyenne d’un accident est réduite de 15 minutes à 5 minute. Les véhicules ne créent pas des messages assez rapidement pour informer de la présence de l’accident.

Une piste d’amélioration consisterait à s’inspirer des travaux de Pichon et al. [134, 135] pour prendre en compte à la fois la pertinence et la véracité des informations fournies par chaque véhicule.

4.2 Améliorer le vieillissement des messages informant des événements locaux

Dans les méthodes présentées dans le chapitre 2 pour gérer les événements locaux, un message informant d’un événement est vieilli avant sa fusion. Ce vieillissement est réalisé selon la date de perception d de l’événement contenue dans ce message.

L’amélioration proposée dans cette section vise à mieux prédire la durée de l’accident et porte uniquement sur les messages informant qu’un événement est présent. Le vieillissement des messages niant la présence d’un événement n’est donc pas modifié ; chaque message est vieilli selon sa date.

Cette amélioration consiste à prendre en compte les connaissances acquises des autres messages reçus pour le vieillissement. Pour chaque événement, tous les messages informant qu’il est présent seront vieillis en utilisant la date la plus ancienne parmi toutes leurs dates.

Dans le scénario décrit dans la figure 4.1, un accident apparaît au début de la simulation à 10 h et dure 30 minutes. Un véhicule reçoit un premier message informant de la présence

de cet accident au bout de 30% de sa durée après son apparition, puis un autre message confirmant cela au bout de 70% de sa durée après son apparition.

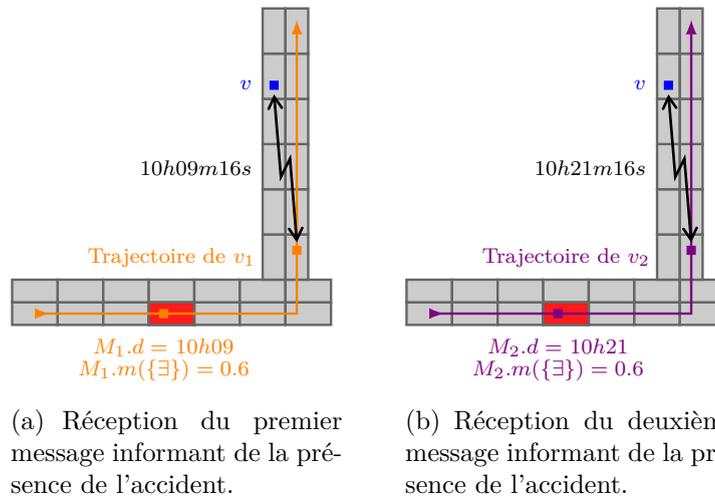


FIGURE 4.1 – Description du scénario illustrant l'amélioration du vieillissement des messages informant des événements locaux. L'accident présent sur la carte (brique rouge) a lieu à 10 h et dure 30 minutes.

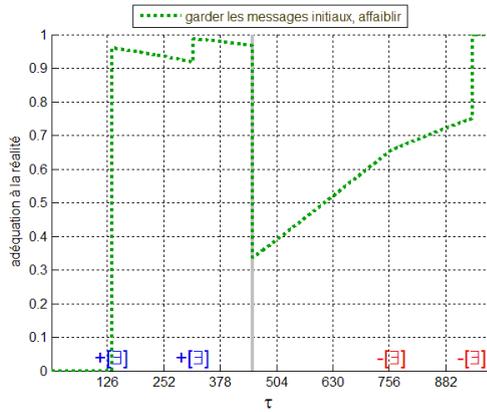
La figure 4.2 montre le résultat de l'adéquation à la réalité sans et avec l'amélioration proposée. Dans les méthodes testées, les messages initiaux sont gardés dans la base des véhicules, l'affaiblissement et le renforcement vers l'absence de l'événement sont étudiés.

Les moyennes de l'adéquation à la réalité sur toute la simulation, avant la disparition de l'accident et après sa disparition sont données dans le tableau 4.2.

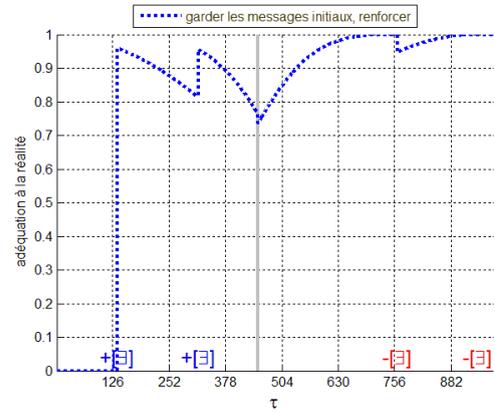
Les résultats de cette simulation montrent que le vieillissement selon la date du message le plus ancien améliore les résultats de la méthode où l'affaiblissement est utilisé. Néanmoins, cette stratégie n'améliore pas le renforcement vers la disparition de l'événement, le gain de performance obtenu après la disparition de l'accident n'est pas considérable et ne compense pas la perte générée pendant la présence de l'événement. Autrement dit, cette stratégie proposée n'apporte pas à la méthode où le renforcement est utilisé, car ce dernier prédit très bien la disparition de l'événement sans l'utilisation des informations acquises précédemment.

4.3 Méthodes pour gérer d'autres événements étendus : les travaux et les brouillards

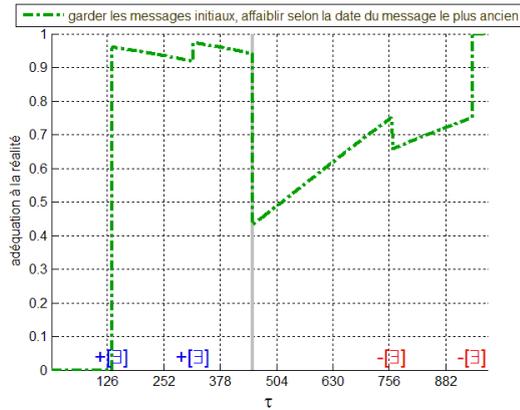
Dans cette section, des méthodes sont exposées pour gérer les types d'événement « travaux » et « brouillards ». Elles sont des variantes de celles proposées dans le chapitre précédent pour gérer les embouteillages. Seules les différences sont détaillées dans cette section, elles portent principalement sur le mécanisme d'influence.



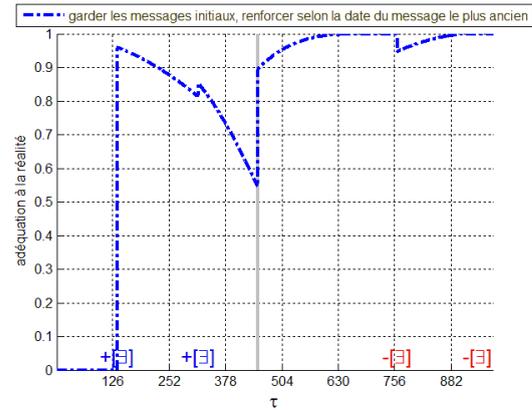
(a) Garder les messages initiaux, affaiblir.



(b) Garder les messages initiaux, renforcer.



(c) Garder les messages initiaux, affaiblir selon la date du message le plus ancien.



(d) Garder les messages initiaux, renforcer selon la date du message le plus ancien.

FIGURE 4.2 – Scénario illustrant l'amélioration du vieillissement des messages informant des événements locaux : adéquation à la réalité de chaque méthode.

Tableau 4.2 – Scénario illustrant l’amélioration du vieillissement des messages informant des événements locaux : adéquation à la réalité moyenne de chaque méthode.

(a) Sur toute la durée de la simulation.	
Garder les messages initiaux, affaiblir	0.644
Garder les messages initiaux, renforcer	0.808
Garder les messages initiaux, affaiblir selon la date du message le plus ancien	0.672
Garder les messages initiaux, renforcer selon la date du message le plus ancien	0.8
(b) Avant la disparition de l’accident.	
Garder les messages initiaux, affaiblir	0.667
Garder les messages initiaux, renforcer	0.62
Garder les messages initiaux, affaiblir selon la date du message le plus ancien	0.661
Garder les messages initiaux, renforcer selon la date du message le plus ancien	0.571
(c) Après la disparition de l’accident.	
Garder les messages initiaux, affaiblir	0.241
Garder les messages initiaux, renforcer	0.368
Garder les messages initiaux, affaiblir selon la date du message le plus ancien	0.261
Garder les messages initiaux, renforcer selon la date du message le plus ancien	0.378

4.3.1 Rappel des méthodes proposées pour gérer les embouteillages

Dans le chapitre précédent, deux méthodes sont proposées pour gérer les embouteillages.

Dans ces méthodes, un message créé est un 5-uplet (S, t, d, ℓ, m) informant de la présence d’un événement sur la route. Ses attributs correspondent respectivement à la source du message, au type de l’événement, à sa date de perception, à son lieu et à la croyance relative à sa présence ou son absence. Deux messages correspondent au même événement si leur type est identique et leurs localisations sont situées sur une même brique b de la carte.

Dans la première méthode, les messages initiaux sont gardés dans les bases des véhicules ; alors que dans la deuxième méthode, pour chaque véhicule, seul le résultat de la fusion est gardé dans sa base pour chaque événement connu.

La gestion de la dynamique des embouteillages est gérée en considérant la mise à jour du monde, les fonctions de masse des messages ne sont pas vieilles.

Pour chaque événement, les fonctions de masse sont fusionnées, en utilisant la règle de combinaison conjonctive ou la règle de combinaison conjonctive prudente selon l’indépendance des sources.

Afin de prédire la situation globale de la route, un mécanisme d’influence est proposé.

Les influences des fonctions de masse obtenues suite à l'étape de fusion précédente sont générées jusqu'au prochain événement ralentissant. Le sens de cette génération dépend de l'information contenue dans la fonction de masse (le message informe de la présence ou de l'absence d'un événement) et du sens de circulation des rues. Enfin, la mise à jour du monde est considérée et la fusion de toutes les fonctions de masse obtenues est réalisée.

4.3.2 Méthodes pour gérer les travaux

Obsolescence des messages

Si la présence des travaux signalés est connue par les autorités routières, leur date de fin peut l'être également. Dans ce cas, elle est prise en compte pour déterminer si un message est obsolète et le supprimer de la base d'un véhicule. Si ce n'est pas le cas, un seuil de suppression peut être fixé comme pour le type d'événement « embouteillages », à partir duquel tous les messages informant de la présence ou de l'absence d'une zone de travaux seront supprimés.

Influences des événements pour prédire la situation globale de la route

L'étendu des travaux dépend des voies de circulation mais pas de leurs sens.

Comme l'illustre la figure 4.3, l'influence d'une fonction de masse informant de la présence ou de l'absence d'une zone de travaux porte sur les briques précédente et suivante de la voie de circulation, à condition que cette information soit confirmée sur une brique assez proche.

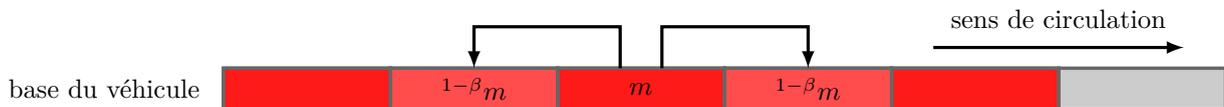


FIGURE 4.3 – Influences d'une fonction de masse informant de la présence ou de l'absence de travaux.

La génération des influences concerne les briques sur lesquelles un véhicule a reçu des informations de présence ou d'absence de travaux. À chacune de ces briques, un résultat de fusion des différents messages reçus est attribué. Ce résultat est un couple (m, d) , où m est la fonction de masse résultante de la fusion et d est la date du message le plus récent concernant l'événement.

Soient b_{+1} la brique qui suit une brique b dans le sens de circulation des véhicules et b_{-1} la brique qui précède b . La brique qui suit b_{+1} est notée b_{+2} , celle qui précède b_{-1} est

notée b_{-2} . Une fonction de masse m_i sur une brique b influence $b - 1$ si cette information est confirmée sur $b - 1$ ou $b - 2$ dans la base du véhicule, elle influence $b + 1$ si une confirmation est connue dans la base sur $b - 1$ ou $b - 2$. L'influence de ce type d'événement ne s'étend pas plus loin qu'une brique, car il est possible que plusieurs zones de travaux indépendantes soient présentes sur une même voie de circulation. Les influences de chaque résultat (m_i, d_i) sont générées en affaiblissant la fonction de masse m_i , sans modifier la date d_i . Il s'agit donc d'un couple $(1 - \beta_i^m, d_i)$ où $1 - \beta$ est le taux d'affaiblissement et β est le taux d'influence.

Suite à cette étape de génération des influences, jusqu'à deux résultats d'influence peuvent être attribués à une même brique de type « travaux ». Sachant que des travaux peuvent être déjà connus sur une brique avant la génération des influences, au total jusqu'à trois couples de résultats (m_i, d_i) peuvent être attribués à une même brique.

Pour chaque brique, la deuxième étape consiste à considérer uniquement les résultats dont la date est supérieure ou égale à la dernière mise à jour du monde. Par exemple, si un message est reçu informant de la présence de travaux sur une brique et une influence plus récente est générée sur cette brique informant de l'absence de cet événement, seule cette dernière information est considérée.

Dans la troisième étape, les résultats obtenus de l'étape précédente sont combinés conjonctivement et les probabilités pignistiques pour chaque brique sont ensuite calculées pour afficher le résultat au conducteur.

Le taux d'influence β peut être fixé à 0.8, cette valeur indique que la présence de l'événement sur la brique voisine est assez sûr.

Exemple illustrant l'intérêt du mécanisme d'influence

La figure 4.4 illustre un exemple où une zone de travaux est présente dans la réalité terrain dans une voie de circulation sur les briques numérotées de 1 à 5 à partir de l'instant τ_2 , elle disparaît à l'instant τ_3 .

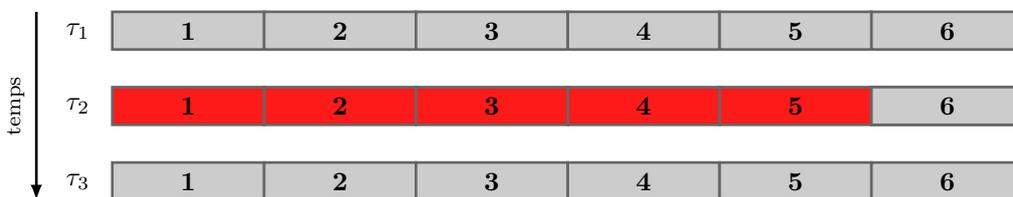


FIGURE 4.4 – Exemple illustrant l'intérêt du mécanisme d'influence proposé pour gérer les travaux sur la route : réalité terrain.

Un véhicule reçoit entre τ_2 et τ_3 des messages informant de la présence de ces travaux sur les briques n°2, n°4 et n°5 (figure 4.5). Suite au mécanisme d'influence, la présence des travaux est également affichée au conducteur sur la brique n°3 de la voie de circulation.

Des messages sont ensuite reçus pour informer de l'absence des travaux sur les briques

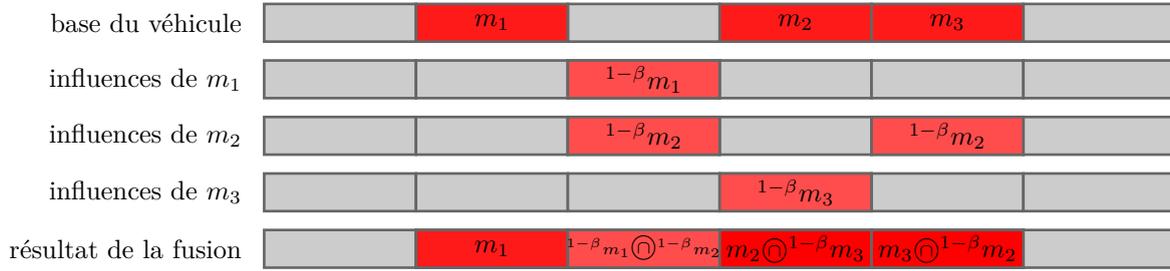


FIGURE 4.5 – Exemple illustrant l'intérêt du mécanisme d'influence proposé pour gérer les travaux sur la route : base du véhicule suite à la réception de messages confirmant la présence des travaux.

n°3 et n°4 (figure 4.6). Le résultat obtenu montre le comportement du mécanisme proposé. Dans ce scénario, suite à la réception d'une information niant les travaux (contradiction), aucune influence ne résulte des messages informant de la présence des travaux. Notons que sur les briques n°3 et n°4, les probabilités pignistiques $BetP(\{\exists\})$ obtenues sont inférieures à 0.5, pour cela le type d'événement « travaux » n'est pas considéré présent dans le résultat affiché au conducteur (ces briques restent donc illustrées en gris).

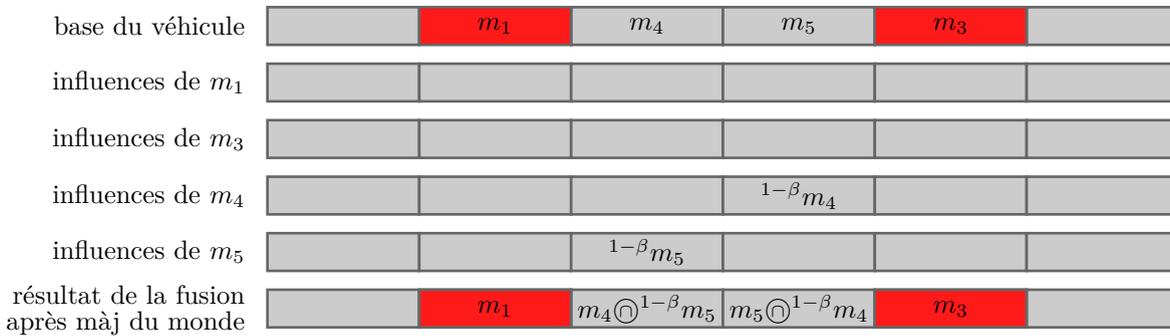


FIGURE 4.6 – Exemple illustrant l'intérêt du mécanisme d'influence proposé pour gérer les travaux sur la route : base du véhicule suite à la réception de messages niant la présence des travaux après leur disparition.

Cet exemple montre l'intérêt du mécanisme d'influence, qui permet de lisser le résultat et d'afficher au conducteur une situation globale de la route la plus proche possible de la réalité terrain.

4.3.3 Méthodes pour gérer les brouillards

Influences des événements pour prédire la situation globale de la route

Contrairement aux embouteillages et aux travaux, l'étendu des brouillards ne dépend pas de la carte et des voies de circulation.

Pour gérer cet événement étendu, le découpage de la carte en briques se fait par rue, sans prendre en compte le sens de circulation. Autrement dit, si un brouillard est présent sur une voie de circulation, il est également certainement présent sur celle opposée.

L'influence d'un événement informant d'un brouillard porte sur les briques l'entourant, mais sans aucune certitude de présence ou d'absence.

Deux stratégies de génération des influences sont exposées dans cette section. La première est inspirée des travaux de Lang et Muller [101] et consiste à générer les influences sans aucune certitude de leur présence. La deuxième stratégie est proposée pour garantir au mieux l'adéquation des influences à la réalité. Un exemple est ensuite donné pour illustrer ces stratégies ainsi que leurs différences.

Une fois les influences générées, les étapes suivantes de ce mécanisme sont les mêmes que celles des mécanismes d'influence proposés pour gérer les embouteillages et les travaux.

Stratégie inspirée des travaux de Lang et Muller [101] Sur chaque brique sur laquelle des informations sont acquises dans la base du véhicule, cette stratégie consiste à influencer les briques précédentes et suivantes graduellement. Soit m la fonction de masse attribuée à une brique b et obtenue avant cette étape de génération des influences. La brique qui précède b (notée b_{-1}) et celle qui suit b (notée b_{+1}) sont influencées en affaiblissant m . Le résultat d'influence obtenu sur ces briques est $^{1-\beta}m$ où β est le degré d'influence. Cette opération est réalisée plusieurs fois et s'arrête aux briques se situant à une distance supérieure à l'étendu moyen des brouillards connu dans l'historique. Par exemple, le résultat d'influence attribué à la brique qui précède b_{-1} et à celle qui suit b_{+1} est la fonction de masse $^{1-\beta}1-\beta m$.

Stratégie proposée pour garantir au mieux l'adéquation des influences à la réalité

La stratégie proposée est de générer les influences du type d'événement « brouillard » pour chaque couple d'événements connus dans la base du véhicule et ne se contredisant pas. Pour chaque couple de briques (b_1, b_2) sur lesquelles le véhicule a des informations, si ces dernières ne se contredisent pas et la distance entre les centres des briques b_1 et b_2 est inférieure ou égale à l'étendu moyen des brouillards connu dans l'historique, les influences de ces informations sont générées comme suit :

- Soient m_1 et m_2 les fonctions de masse qui correspondent respectivement aux briques b_1 et b_2 et qui résultent de la fusion avant cette étape de génération des influences.

- Toutes les briques dont les centres se situent dans le cercle de diamètre limité par les centres des briques b_1 et b_2 sont influencées par le couple (b_1, b_2) . Cette influence est obtenue en affaiblissant légèrement les fonctions de masse m_1 et m_2 et les combinant ensuite conjonctivement. Le résultat est la fonction de masse ${}^{1-\beta}m_1 \odot {}^{1-\beta}m_2$ où β est le degré d'influence.

Exemple illustrant la différence entre les deux stratégies La figure 4.7 illustre la description du scénario. Un brouillard est présent sur six briques (de couleur rouge) de la carte dans la réalité terrain. Un véhicule reçoit des messages informant de la présence de ce type d'événement sur seulement deux briques. Les fonctions de masse m_1 et m_2 correspondent au résultat de fusion de ces messages obtenu avant l'étape de génération des influences.

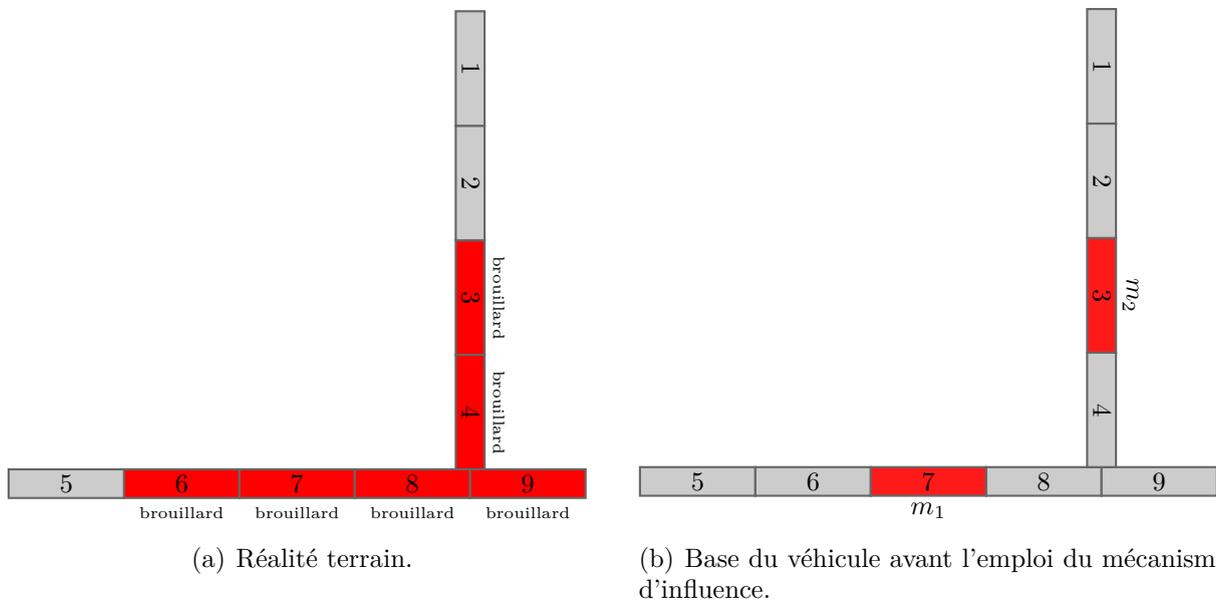
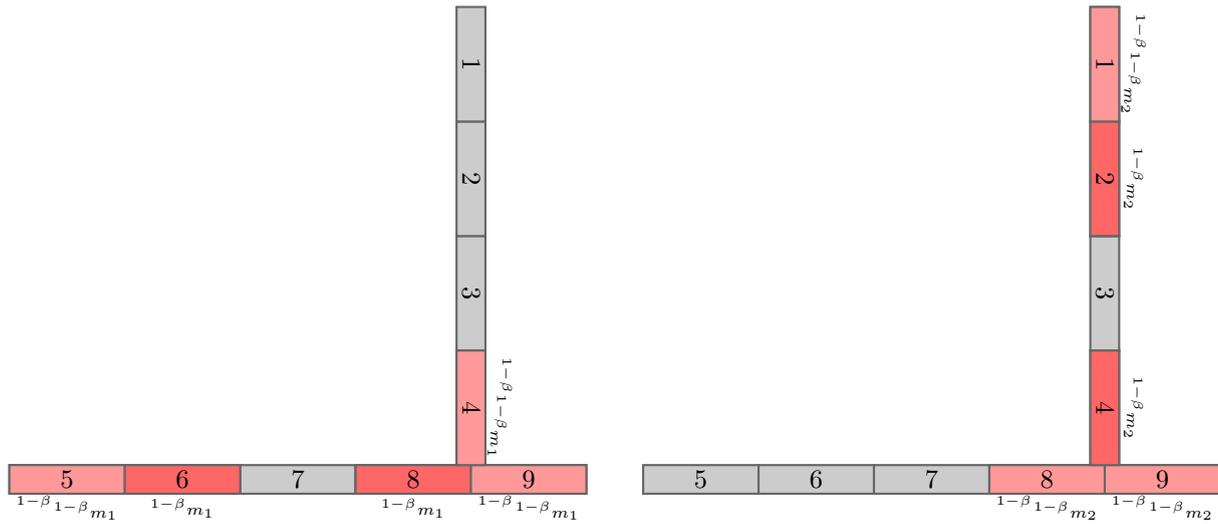


FIGURE 4.7 – Description du scénario comparant les deux stratégies proposées pour générer les influences du type d'événement « brouillards ».

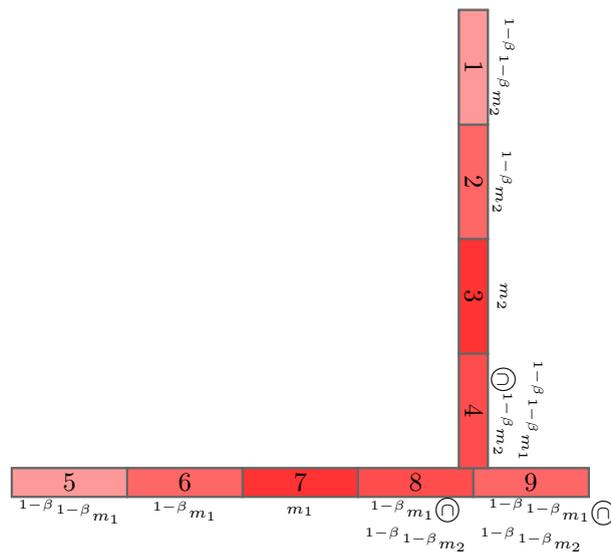
Le résultat de la première stratégie est exposé dans la figure 4.8. Son point fort est sa capacité à prédire le brouillard quand il est très étendu, mais les influences générées peuvent induire à l'erreur. Dans ce scénario, la génération des influences sur les briques numérotées 1, 2 et 5 n'est pas à l'image de la réalité terrain.

Le résultat de la deuxième stratégie est présenté dans la figure 4.9. Contrairement à la première stratégie, la seconde ne génère pas des fausses influences. Nous la recommandons pour la gestion des brouillards dont l'étendu est difficilement maîtrisé.



(a) Influences de la fonction de masse m_1 .

(b) Influences de la fonction de masse m_2 .



(c) Résultat dans la base du véhicule après l'emploi du mécanisme d'influence.

FIGURE 4.8 – Résultat du scénario avec l'emploi de la stratégie de génération d'influence inspirée des travaux de Lang et Muller [101].

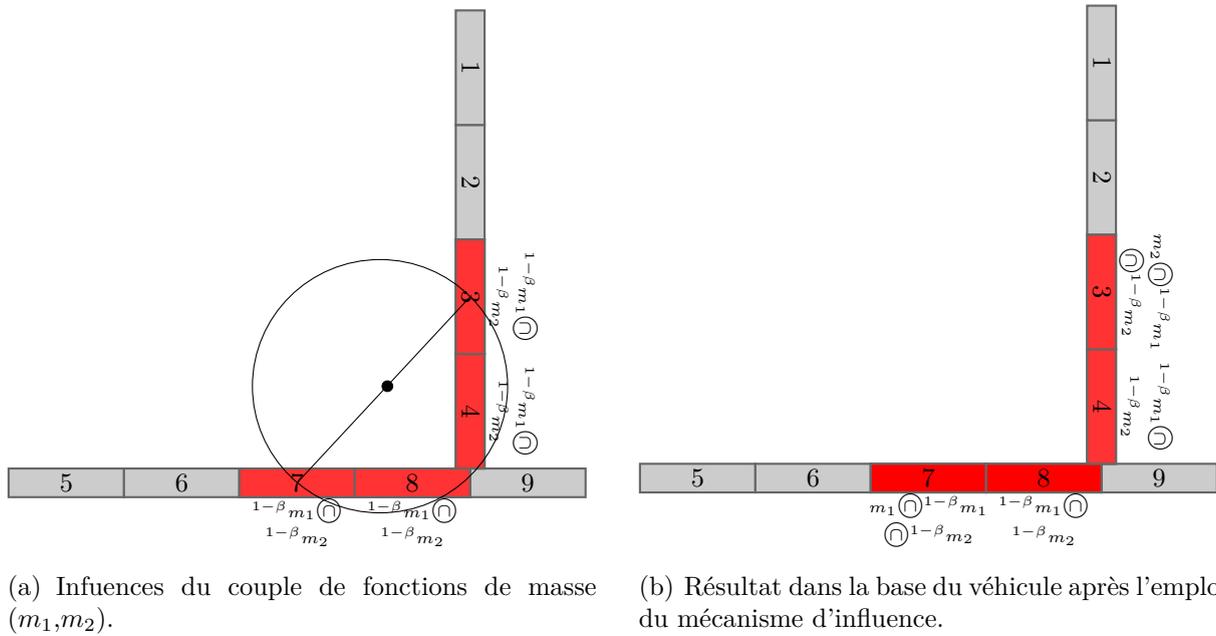


FIGURE 4.9 – Résultat du scénario avec l'emploi de la stratégie de génération d'influence proposée pour garantir au mieux l'adéquation des influences à la réalité.

4.3.4 Généralisation du mécanisme d'influence

Les mécanismes d'influence proposés pour gérer l'étendu des embouteillages, des travaux et des brouillards peuvent être généralisés.

Pour une brique sur laquelle une information est acquise dans la base d'un véhicule, la prise en compte du sens de circulation et de la voie de circulation dans la génération des influences dépend du type d'événement.

Les sens de génération des influences d'une fonction de masse informant de la présence d'un événement peut être différent de celui informant de l'absence d'un événement selon le type d'événement.

Les influences d'une fonction de masse m sont générées uniquement dans les deux cas suivants :

- la raison d'apparition du type d'événement est connue ;
- une confirmation de l'information portée par l'influence est contenue dans la base du véhicule.

La génération des influences s'arrête à la localisation de la raison d'apparition ou à la localisation de la brique sur laquelle la confirmation de l'information est présente.

Le degré d'influence est élevé, par exemple il peut être fixé à 0.8, car les influences sont générées uniquement si le véhicule a des informations suffisantes lui permettant de garantir

au mieux l'adéquation à la réalité.

4.4 Améliorer le résultat affiché au conducteur des méthodes gérant les embouteillages

L'aperçu global de la route donné au conducteur concernant les embouteillages peut être amélioré. Deux pistes sont proposées dans cette section.

Prédire la résorption des embouteillages en utilisant des paramètres avancés de la carte

La première piste consiste à utiliser des paramètres avancés de la carte afin de mieux prédire la disparition des embouteillages.

La durée de présence d'un embouteillage sur une brique dépend des paramètres suivants (figure 4.10) :

- $Debit_e$: nombre de véhicules souhaitant entrer par seconde sur cette brique, il s'agit du débit moyen des véhicules entrant, qui peut être connu par des informations historiques pour une zone géographique.
- $Debit_s$: nombre de véhicules pouvant sortir de cette brique par seconde, obtenu à partir de la connaissance de la carte (localisations des voies de circulation et croisements des rues) et des événements précédant la brique concernée connus dans la base du véhicule.
- $DebitMaxEmb_s$: nombre de véhicules sortant d'une brique par seconde au dessus duquel une brique est obligatoirement fluide et un embouteillage ne peut donc pas s'y former. Autrement dit, pour qu'un embouteillage puisse se former sur une brique, il faut que le débit sortant $Debit_s$ de la brique soit compris entre 0 et $DebitMaxEmb_s$. On considère que le débit $DebitMaxEmb_s$ est connu par des données historiques ou par les autorités routières.
- $NbVB$: nombre de véhicules maximal qu'une brique peut contenir. Soit $LonV$ la longueur moyenne des véhicules, $NbVB = \frac{LonB_t}{LonV}$ où t correspond au type d'événement « embouteillage ».

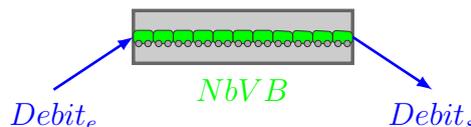


FIGURE 4.10 – Illustration de certains paramètres de la carte pouvant être utilisés pour prédire la résorption des embouteillages.

Ci-dessous la description du mécanisme proposé pour chaque brique occupée par un

embouteillage dans le résultat obtenu de la fusion :

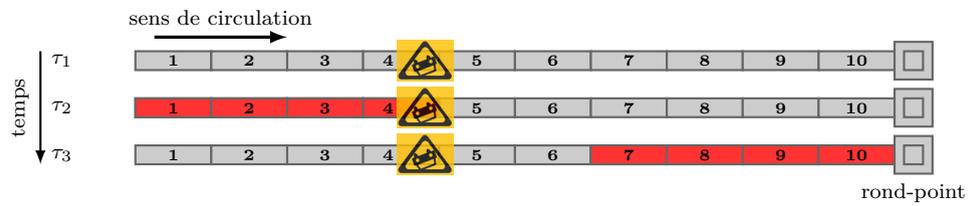
- Si son débit sortant $Debit_s$ est supérieur à $DebitMaxEmb_s$, considérer qu'un embouteillage ne peut pas être présent sur cette brique et supprimer le résultat de fusion (ne pas l'afficher au conducteur) concernant l'information d'embouteillage sur cette brique.
- Sinon, si $Debit_s \leq DebitMaxEmb_s$ et son débit entrant $Debit_e$ est supérieur ou égal à son débit sortant $Debit_s$, ne pas vieillir le résultat de fusion obtenu sur cet événement.
- Sinon, si $Debit_s \leq DebitMaxEmb_s$ et son débit entrant $Debit_e$ est inférieur à son débit sortant $Debit_s$, gérer la résorption de l'embouteillage comme suit :
 - S'il s'agit de la première fois, préparer le renforcement du résultat de fusion obtenu sur cet événement en sauvegardant la date actuelle qui sera utilisée pour la gestion de l'obsolescence de l'événement : $d_{deb} = date_actuelle$. Le seuil de résorption $Reso = \frac{NbVB}{Debit_s - Debit_e}$ correspond à la durée nécessaire pour qu'un nombre $NbVB$ de véhicules ne soit plus présent sur la brique (cas extrême où la capacité d'une brique atteint son maximum $NbVB$). Dans ce cas, continuer à afficher au conducteur la présence de l'embouteillage sur cette brique.
 - Sinon, si le seuil d'obsolescence est atteint $\Delta(d_o, date_actuelle) > Reso$, ne plus afficher au conducteur la présence de l'embouteillage sur cette brique.
 - Sinon, renforcer le résultat obtenu sur cet événement avec un taux de renforcement $\nu = \frac{\Delta(d_{deb}, date_actuelle)}{Reso}$ et afficher le résultat obtenu au conducteur.

Transférer le trafic après la disparition de l'événement ralentissant

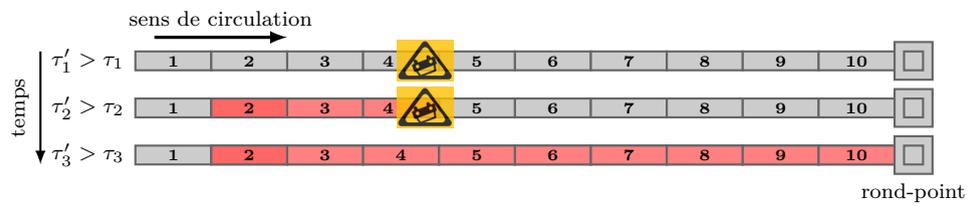
La deuxième piste d'amélioration consiste à mieux gérer le transfert de trafic suite à la réception d'un message informant de la disparition de l'événement ralentissant qui a généré l'embouteillage.

Dans les méthodes proposées dans le chapitre précédent, l'influence d'une information concernant un embouteillage est générée de la même façon sans prendre en compte la chronologie des événements connues dans la base du véhicule.

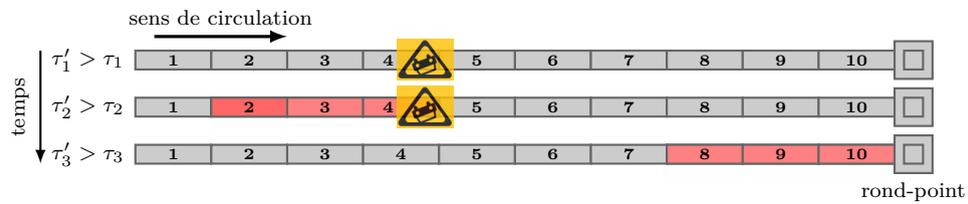
Prenons l'exemple décrit dans la figure 4.11 où un embouteillage se crée sur les quatre briques numérotées de 1 à 4 suite à un accident. Le véhicule reçoit un message informant de la présence de l'accident, puis un message informant de la présence d'un embouteillage sur la brique n°2. L'influence de ce dernier porte sur les briques précédant l'accident : n°3 et n°4. Plus tard, l'accident disparaît et le véhicule reçoit cette information. Avec les méthodes proposées dans le chapitre précédent, l'influence du message informant de la présence d'un embouteillage sur la brique n°2 porte sur les briques qui précèdent le prochain événement ralentissant, en l'occurrence il s'agit dans cet exemple des briques n°3 à n°9. Cette méthode peut être améliorée en transférant le trafic connu précédemment sur les briques n°2 à n°4 aux briques situées après le prochain événement ralentissant ; celles influencées deviennent uniquement les briques n°7 à n°9.



(a) Réalité terrain.



(b) Base du véhicule sans le transfert du trafic.



(c) Base du véhicule avec le transfert du trafic.

FIGURE 4.11 – Exemple illustrant l’amélioration des méthodes proposées pour gérer les embouteillages avec le transfert du trafic.

Notons qu'après la disparition de l'accident, le transfert de trafic se fait progressivement dans la réalité. Cela peut être modélisé en utilisant des paramètres avancés de la carte tels que les débits entrant et sortant, comme décrit dans la section précédente.

4.5 Adaptabilité des méthodes proposées au mode centralisé dans les VANET

Les méthodes proposées peuvent être adaptées au mode centralisé, décrit dans la section 1.3.2.

Dans ce mode, un seul centre de fusion existe, les véhicules permettent seulement la création des messages afin de les communiquer au centre de fusion. Ce dernier est en charge de fusionner tous les messages créés par les véhicules et de leur envoyer uniquement le résultat de la fusion qui sera affiché aux conducteurs. L'intelligence est donc gérée uniquement dans le centre de fusion, qui peut utiliser les différentes méthodes proposées pour gérer différents types d'événement. L'espace mémoire et la capacité de calcul n'étant pas des limites du centre de fusion, les méthodes où les messages initiaux sont gardés dans la base du centre de fusion sont parfaitement adaptées à ce mode.

La figure 4.12 illustre l'architecture du mode centralisé et donne un exemple pour un événement e sur la route. Les véhicules créent des messages informant de la présence ou de l'absence de l'événement, communiquent ces messages au centre de fusion (ces messages ne sont pas gardés dans la base des véhicules), reçoivent régulièrement le résultat de la fusion de la part du centre de fusion et ce dernier est affiché au conducteur.

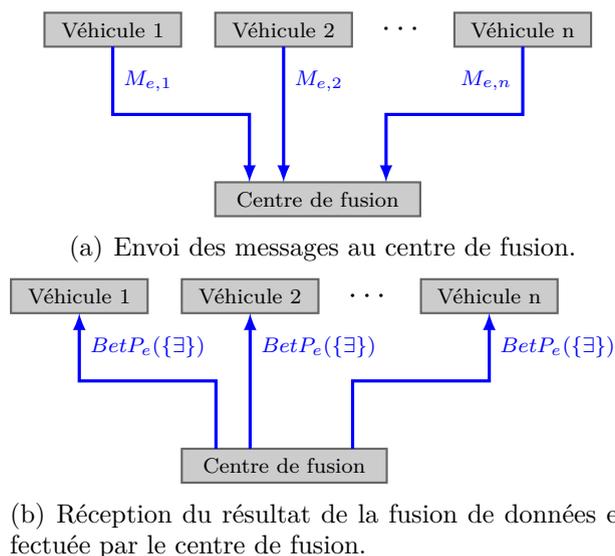


FIGURE 4.12 – Fusion de données centralisée.

4.6 Conclusions

Les derniers travaux réalisés pendant la thèse ont été exposés dans ce chapitre. Ils incluent des perspectives et des améliorations des méthodes proposées dans les chapitres 2 et 3. Ces travaux ont mis en évidence l'intérêt et la richesse des fonctions de croyance pour gérer au mieux différents types d'événements sur la route dans les réseaux de véhicules. L'étape suivante consiste à développer des simulations pour tester les méthodes proposées dans ce chapitre.

Conclusion et perspectives

Aujourd'hui, les avancées technologiques profitent plus que jamais au secteur de l'automobile. Différents travaux de recherche ont été lancés à travers le monde pour augmenter la sécurité sur la route, réduire les encombrements du trafic et la pollution et apporter plus de confort aux conducteurs.

Dans les réseaux de véhicules, les informations échangées peuvent être très nombreuses, elles proviennent souvent de sources hétérogènes. Un véhicule qui détient la croyance concernant la présence d'un événement sur la route ne connaît pas toujours avec certitude la vraie réponse. Dans les travaux présentés dans ce manuscrit, différentes méthodes utilisant des fonctions de croyance sont proposées et comparées, permettant de gérer dans un environnement sans infrastructure les informations imparfaites concernant des événements sur la route. Ces méthodes considèrent que les événements locaux et les événements étendus géographiquement n'ont pas les mêmes caractéristiques et les traitent différemment. Le cas particulier des embouteillages, qui sont étendus et très dynamiques, est étudié. Un résumé des méthodes proposées dans les chapitres 2 et 3 est rappelé dans le tableau 4.3.

Différentes stratégies sont étudiées : garder les messages initiaux ou le résultat de la fusion dans la base des véhicules ; ignorer la présence des événements avec le temps ou supposer qu'ils disparaissent avec le temps ; considérer la mise à jour du monde ; et influencer le voisinage pour gérer l'étendu des embouteillages.

Garder les messages initiaux dans la base des véhicules permet de mieux gérer les événements locaux, en analysant finement toutes les informations acquises. Les expérimentations exposées montrent l'utilité de considérer que les événements locaux disparaissent avec le temps. L'emploi du renforcement vers l'absence de l'événement s'avère donc plus adapté que l'affaiblissement pour gérer le vieillissement des informations quand le seuil de suppression des messages peut être réglé.

Concernant les événements étendus, les expérimentations ont montré l'intérêt de la mise à jour du monde quant à la gestion des embouteillages qui sont très dynamiques. L'influence du voisinage pour gérer l'étendu des encombrements de trafic permet de prédire la situation globale de la route.

Des perspectives développées ont été présentées dans le chapitre 4. Une adaptation du mécanisme d'influence a été proposée pour les travaux et les brouillards. Ce travail a permis une généralisation de ce mécanisme, où l'objectif est de garantir au mieux l'adéquation à la

Tableau 4.3 – Méthodes proposées.

(a) Gérer les événements locaux.

Méthode	Combinaison
1 Garder les messages initiaux, affaiblir	Conjonctive
2 Garder les messages initiaux, renforcer	
3 Garder le résultat de la fusion, affaiblir	Conjonctive ou prudente
4 Garder le résultat de la fusion, renforcer	
5 Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, affaiblir	Conjonctive
6 Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, renforcer	

(b) Gérer les événements étendus : cas des embouteillages.

Méthode	Combinaison
1 Garder les messages initiaux, mettre à jour le monde, influencer	Conjonctive
2 Garder le résultat de la fusion, mettre à jour le monde, influencer	Conjonctive ou prudente

réalité des informations données aux conducteurs. Des améliorations des méthodes gérant les embouteillages ont été proposées, où des paramètres avancées de la carte peuvent être utilisés comme les débits entrant et sortant des rues. La prise en compte de l'historique des messages pour le vieillissement des informations concernant les événements locaux a permis d'améliorer la performance des méthodes où l'affaiblissement est utilisé pour prédire la disparition des événements. Mais le renforcement vers l'absence de l'événement reste la meilleure solution de vieillissement sans prendre en compte les informations historiques. Enfin la résistance des méthodes aux fausses informations a été testée et leur adaptabilité au mode de fusion centralisé a été montrée. Notons que les travaux réalisés dans ce chapitre méritent d'être étudiés en profondeur.

La discrétisation des cartes en briques nous a permis de développer et d'évaluer les méthodes simplement. Mais la généralisation des travaux à l'hétérogénéité des rues dans l'environnement routier est nécessaire dans les travaux futurs. Notons que l'incertitude concernant la localisation et la date des informations échangées peut également être gérée en utilisant des fonctions de croyance.

Le simulateur utilisé nous a permis de mettre en avant les contributions de la thèse et de tester les différentes méthodes proposées fondées sur des fonctions de croyance. Les scénarios développés sont simples et illustrent les atouts et les faiblesses des différents mécanismes comparés. Notons également que cet outil a permis à notre laboratoire LGI2A de collaborer avec le projet européen NISTO (*New Integrated Smart Transport Options*) qui a débuté en juin 2013 et durera jusqu'à décembre 2015. Cependant, ce simulateur a atteint ses limites et un choix parmi les différents simulateurs proposés dans la littérature (section 1.2.3) doit

être fait pour intégrer les travaux futurs. Cela permettra de s'approcher le plus possible de la réalité dans la simulation des déplacements des véhicules et des événements sur la route. Des scénarios comprenant un nombre important de rues et de véhicules seront réalisables. De plus, cela permettra d'évaluer pour chacune des méthodes proposées le temps de calcul et la mémoire consommée qui sont des critères importants dans les VANET.

Dans les travaux présentés, les événements sont saisis par les conducteurs. Cela peut être réalisé par les capteurs des véhicules intelligents pour améliorer la précision de leur localisation et pour plus de confort. Les simulations peuvent être réalisées en grandeur nature pour étudier leur adaptabilité aux environnements réels et leur robustesse quant à la gestion d'un nombre important de messages.

Publications

Revue internationale

M. BOU FARAH, D. MERCIER, É. LEFÈVRE et F. DELMOTTE : A high-level application using belief functions for exchanging and managing uncertain events on the road in vehicular ad-hoc networks. *Annals of Telecommunications : special issue on belief functions and uncertainty management in networks and telecommunication*, 69 :185–199, April 2014.

Conférences internationales

M. BOU FARAH, D. MERCIER, F. DELMOTTE, É. LEFÈVRE et S. LAGRUE : Methods handling accident and traffic jam information with belief functions in VANETs. *3rd International Conference on Belief Functions, BELIEF 2014, Oxford, United Kingdom*, pages 124–133, September 2014.

M. BOU FARAH, D. MERCIER, É. LEFÈVRE et F. DELMOTTE : Exchanging dynamic and imprecise information in V2V networks with belief functions. *16th International IEEE Conference on Intelligent Transport Systems, ITSC 2013, The Hague, The Netherlands*, 967–972, October 2013.

M. BOU FARAH, D. MERCIER, É. LEFÈVRE et F. DELMOTTE : Towards a Robust Exchange of Imperfect Information in Inter-Vehicle Ad-Hoc Networks using Belief Functions. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, IV 2011, Baden-Baden, Germany*, 436–441, June 2011.

Conférence nationale

M. BOU FARAH, D. MERCIER, É. LEFÈVRE et F. DELMOTTE : Un processus V2V d'échanges et de gestion d'informations imparfaites basé sur des fonctions de croyance. *21e Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications, LFA 2012, Compiègne, France*, November 2012.

Bibliographie

- [1] China's growth leads to problems down the road. 2010-08-27. retrieved 2010-09-20. <http://www.nytimes.com/2010/08/28/world/asia/28china.html>.
- [2] Contrat de licence de logiciel libre CeCILL-B : http://www.cecill.info/licences/Licence_CeCILL-B_V1-fr.html.
- [3] The great crawl of china. the economist. 2010-08-26. retrieved 2010-09-20. <http://www.economist.com/node/16909167>.
- [4] MANET IETF working group www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html.
- [5] Organisation Mondiale de la Santé : <http://http://www.who.int>.
- [6] Simulateur VMES (Vehicle Message Exchange Simulator) implémenté dans le cadre de la thèse de Mira Bou Farah : <http://www.lgi2a.univ-artois.fr/spip/spip.php?article941>.
- [7] Specification of the bluetooth system, december 1999. <http://www.bluetooth.com>.
- [8] Tables de loi normale : <http://www.agro-montpellier.fr/cnam-lr/statnet/tables.htm>.
- [9] Welcome to the world's worst traffic jam. the guardian. 2010-08-23. retrieved 2010-09-20. <http://www.guardian.co.uk/technology/2010/aug/23/worlds-worst-traffic-jam>.
- [10] C. ADLER, C. SCHROTH et M. STRASSBERGER : Context-adaptive information dissemination in VANETs - maximizing the global benefit. *Proceedings of Communications Systems and Networks*, 2006.
- [11] M. AEBERHARD, S. PAUL, N. KAEMPCHEN et T. BERTRAM : Object existence probability fusion using dempster-shafer theory in a high-level sensor data fusion architecture. *Intelligent Vehicles Symposium, IV 2011, Baden-Baden, Germany*, pages 770–775, June 2011.
- [12] C.E. ALCHOURRÓN, P. GÄRDENFORS et D. MAKINON : On the logic of theory change : partial meet contraction and revision functions. *Journal of Symbolic Logic*, 50(2):510–530, 1985.
- [13] J. ANDA, J. LEBRUN, D. GHOSAL, C.-N. CHUAH et M. ZHANG : VGrid : Vehicular adhoc networking and computing grid for intelligent traffic control. *In IEEE 61st Vehicular Technology Conference VTC 2005 Spring, 29th May - 1st June, Stockholm, Sweden*, pages 2905–2909, 2005.

- [14] A. APPRIOU : Probabilités et incertitudes en fusion de données multi-senseurs. *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, 11:27–40, 1991.
- [15] M. ARTIMY, W. ROBERTSON et W. PHILLIPS : Connectivity in inter-vehicle ad hoc networks. *Canadian conference on electrical and computer engineering*, 1:293–298, 2004.
- [16] Advanced Safety Vehicle ASV program : <http://www.mlit.go.jp>.
- [17] A. AYOUN et P. SMETS : Data association in multi-target detection using the transferable belief model. *International Journal of Intelligent Systems*, 16:1167–1182, 2001.
- [18] F. BAI, H. KRISHNAN, V. SADEKAR, G. HOLLAND et T. ELBATT : Towards characterizing and classifying communication-based automotive applications from a wireless networking perspective. In *IEEE Workshop on Automotive Networking and Applications (AutoNet)*, 2006.
- [19] R. BALDESSARI, B. BÖDEKKER, M. DEEGENER, A. FESTAG, W. FRANZ, C. KELLUM, T. KOSCH, A. KOVACS, M. LENARDI, C. MENIG et AL. : Car-2-car communication consortium-manifesto. *Car-2-Car Communication Consortium*, 2007.
- [20] S. BASAGNI, M. CONTI et S. GIORDANO : *Mobile Ad Hoc Networking*. Wiley-IEEE Press, August 2004.
- [21] S.S. BLACKMAN : *Introduction to Sensor Systems*. Sensor Tracking and Data Fusion. Artech House, Norwood, Massachusetts, 1988.
- [22] J.J. BLUM, A. ESKANDARIAN et L.J. HOFFMAN : Challenges of intervehicle ad hoc networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 5(4):347–351, 2004.
- [23] M. BOU FARAH, D. MERCIER, F. DELMOTTE, É. LEFÈVRE et S. LAGRUE : Methods handling accident and traffic jam information with belief functions in vanets. *3rd International Conference on Belief Functions, BELIEF 2014, Oxford, United Kingdom, September 26-28*, pages 124–133, 2014.
- [24] M. BOU FARAH, D. MERCIER, É. LEFÈVRE et F. DELMOTTE : Towards a robust exchange of imperfect information in inter-vehicle ad-hoc networks using belief functions. *Intelligent Vehicles Symposium, IV 2011, Baden-Baden, Germany*, pages 436–441, June 2011.
- [25] M. BOU FARAH, D. MERCIER, É. LEFÈVRE et F. DELMOTTE : Un processus V2V d'échanges et de gestion d'informations imparfaites basé sur des fonctions de croyance. *21e Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications, LFA 2012, Compiègne, France*, pages 71–78, November 2012.
- [26] M. BOU FARAH, D. MERCIER, É. LEFÈVRE et F. DELMOTTE : Exchanging dynamic and imprecise information in V2V networks with belief functions. *16th International IEEE Conference on Intelligent Transport Systems, ITSC 2013, The Hague, The Netherlands*, pages 967–972, October 2013.
- [27] M. BOU FARAH, D. MERCIER, É. LEFÈVRE et F. DELMOTTE : A high-level application using belief functions for exchanging and managing uncertain events on the road in vehicular ad-hoc networks. *Annals of telecommunications : special issue on belief*

- functions and uncertainty management in networks and telecommunication*, 69:185–199, April 2014.
- [28] Car 2 car communication consortium c2c-cc : <http://www.car-to-car.org>.
- [29] CarTalk project (2001-2004) : <http://www.cartalk2000.net>.
- [30] J. CHEN, Y.-. LEE, H. ZHOU, M. GERLA et Y. SHU : Robust ad hoc routing for lossy wireless environment. In *Proceedings of the 2006 IEEE Conference on Military Communications*, MILCOM 2006, pages 1672–1678, Piscataway, NJ, USA, 2006. IEEE Press.
- [31] T.M. CHEN et V. VENKATARAMANAN : Dempster-shafer theory for intrusion detection in ad hoc networks. *IEEE Internet Computing*, 9:35–41, 2005.
- [32] V. CHERFAOUI, T. DENÈUX et Z.L. CHERFI : Distributed data fusion : application to confidence management in vehicular networks. *International Conference on Information Fusion*, FUSION 2008, pages 846–853, 2008.
- [33] International Campus on Safety and Intermodality in Transportation CISIT project (2009-2013) : <http://www.cisit.org>.
- [34] B.R. COBB et P.P. SHENOY : On the plausibility transformation method for translating belief function models to probability models. *International Journal of Approximate Reasoning*, 41(3):314–330, April 2006.
- [35] Communication for eSafety 2 COMeSafety2 project (2011-2013) : <http://comesafety2.org/>.
- [36] S. CORSON et J. MACKER : Mobile Ad hoc Networking (MANET) : Routing protocol performance issues and evaluation considerations. *rfc 2501*, 1999.
- [37] Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems CVIS project (2006-2009) : <http://www.cvisproject.org>.
- [38] S. DAS, A. NANDAN, G. PAU, M.Y. SANADIDI et M. GERLA : SPAWN : a swarming protocol for vehicular ad-hoc wireless networks. In Kenneth P. LABERTEAUX, Raja SENGUPTA, Chen-Nee CHUAH et Daniel JIANG, éditeurs : *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, VANET 2004, pages 93–94, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [39] B.V. DASARATHY : Information fusion - what, where, why, when, and how ? editorial. *Information Fusion*, 2(2):75–76, 2001.
- [40] B. DEFUDE, T. DELOT, S. ILARRI, J-L ZECHINELLI-MARTINI et N. CENERARIO : Data aggregation in VANETs : the VESPA approach. *Mobiquitous'08 First International Workshop on Computational Transportation Science (IWCTS)*, ACM digital library, Dublin, Ireland, 2008.
- [41] M.H. DEGROOT : *Optimal Statistical decisions*. McGraw-Hill, New York, 1970.
- [42] L. DELGROSSI : The future of the automobile vehicle safety communications, stanford university, April 2014.
- [43] T. DELOT, N. CENERARIO, S. ILARRI et S. LECOMTE : A cooperative reservation protocol for parking spaces in vehicular ad hoc networks. *6th International Conference*

- on Mobile Technology, Applications and Systems, Mobility Conference 2009, ACM Digital Library, Best Paper Award, Nice (France), 2009.*
- [44] A.P. DEMPSTER : Upper and lower probabilities induced by multivalued mapping. *Annals of Mathematical Statistics*, 38:325–339, 1967.
- [45] A.P. DEMPSTER : A generalization of bayesian inference. *Journal of Royal Statistical Society, Serie B*, 30:205–247, 1968.
- [46] T. DENÈUX : Application du modèle des croyances transférables en reconnaissance de formes. *Traitement du Signal*, 14(5):443–451, 1998.
- [47] T. DENÈUX : A neural network classifier based on dempster-shafer theory. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, 30(2):131–150, 2000.
- [48] T. DENÈUX : The cautious rule of combination for belief fonctions and some extensions. *9th International Conference on Information Fusion, FUSION 2006, Florence, Italy, July 10-13*, pages 1–8, 2006.
- [49] T. DENÈUX : Conjunctive and disjunctive combination of belief fonctions induced by non distinct bodies of evidence. *Artificial Intelligence*, 172:234–264, 2008.
- [50] T. DENÈUX et P. SMETS : Classification using belief fonctions : the relationship between the case-based and model-based approaches. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B*, 6:1395–1406, 2006.
- [51] Drive C2X project (2011-2014) : <http://www.drive-c2x.eu/project>.
- [52] Driving Safety Support Systems DSSS : <http://www.utms.or.jp/english/system/dsss.html>.
- [53] D. DUBOIS et H. PRADE : A note on measures of specificity for fuzzy sets. *International Journal of General Systems*, 10:279–283, 1985.
- [54] D. DUBOIS et H. PRADE : A set-theoretic view of belief fonctions : logical operations and approximations by fuzzy sets. *International Journal of General Systems*, 12:193–226, 1986.
- [55] D. DUBOIS et H. PRADE : Representation and combination of uncertainty with belief fonctions and possibility measures. *Computational Intelligence*, 4:244–264, 1988.
- [56] D. DUBOIS et H. PRADE : Focusing vs. belief revision : A fundamental distinction when dealing with generic knowledge. In D.M. GABBAY, R. KRUSE, A. NONNENGART et H.J. OHLBACH, éditeurs : *ECSQARU-FAPR*, volume 1244, pages 96–107. Springer Verlag, 1997.
- [57] B. DUCOURTHIAL, V. CHERFAOUI et T. DENÈUX : Self-stabilizing distributed data fusion. In Andréa W. RICHA et Christian SCHEIDELER, éditeurs : *SSS*, volume 7596 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 148–162. Springer, 2012.
- [58] B. DUCOURTHIAL, Y. KHALED et M. SHAWKY : Conditional transmissions : a communication strategy for highly dynamic vehicular ad hoc networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology, special issue on vehicular communication networks*, 56(6):3348–3357, November 2007.
- [59] H.F. DURRANT-WHYTE : Sensor models and multisensor integration. *International Journal of Robotics Research - Special Issue on Sensor Data Fusion*, 7(6):97–113, 1988.

- [60] N. EL ZOGHBY, V. CHERFAOUI, B. DUCOURTHIAL et T. DENÈUX : Distributed data fusion for detecting sybil attacks in VANETs belief functions : Theory and applications. *Proceedings of the 2nd International Conference on Belief Functions. Compiègne, France*, 164:351–358, 2012.
- [61] T. ELBATT, S. GOEL, G. HOLLAND, H. KRISHNAN et J. PARIKH : Cooperative collision warning using dedicated short range wireless communications. *In Proceedings of the 3rd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks, VANET 2006*, pages 1–9, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [62] J. ESTEBAN, A. STARR, R. WILLETTS, P. HANNAH et P. BRYANSTON-CROSS : A review of data fusion models and architectures : Towards engineering guidelines. *Neural Computing and Applications*, 14(4):273–281, 2005.
- [63] K. EVENSEN : CALM versus DSRC – complementary technologies. *Proceedings of 10th World Congress on ITS, Madrid. ERTICO (ITS Europe)*, 2003.
- [64] S. FABRE, A. APPRIOU et X. BRIOTTET : Presentation and description of two classification methods using data fusion based on sensor management. *Information Fusion*, 2(1):49–71, 2001.
- [65] K. FALL et K. VARADHAN : ns notes and documentation <http://www.isi.edu/nsnam/ns/nsdocumentation>, 2000.
- [66] A. FESTAG, H. FÜSSLER, H. HARTENSTEIN, A. SARMA et R. SCHMITZ : FleetNet : Bringing car-to-car communication into the real world. *11th World Congress on Intelligent Transport Systems, ITS 2004*, 2002.
- [67] A. FESTAG, G. NOECKER, M. STRASSBERGER, A. LÜBKE, B. BOCHOW, M. TORRENT-MORENO, S. SCHNAUFER, R. EIGNER, C. CATRINESCU et J. KUNISCH : Now-network on wheels : Project objectives, technology and achievements. *6th International Workshop on Intelligent Transportations (WIT), Hamburg, Germany*, 2008.
- [68] European Field Operational Test on Safe, Intelligent and Sustainable Road Operation FOTsis project (2011-2014) : <http://www.fotsis.com/>.
- [69] W. FRANZ, H. HARTENSTEIN et B. BOCHOW : Internet on the road via inter-vehicle communications. *Workshop der Informatik 2001 : Mobile Communications over Wireless LAN : Research and Applications, Gemeinsame Jahrestagung der GI und OCG*, 2001.
- [70] J.A. FREEBERSYSER et B. LEINER : Ad hoc networking. chapitre A DoD Perspective on Mobile Ad Hoc Networks, pages 29–51. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 2001.
- [71] M. FRODIGH, P. JOHANSSON et P. LARSSON : Wireless ad hoc networking – the art of networking without a network. *Ericsson Review N°4*, 2000.
- [72] H. FÜSSLER, M. MAUVE, H. HARTENSTEIN, M. KASEMANN et D. VOLLMER : Location-based routing for vehicular ad-hoc networks. *Int. Conf. on Mobile Computing and Networking, MobiCom 2002*, 2002.
- [73] H. FÜSSLER, J. WIDMER, M. KÄSEMANN, Martin MAUVE et H. HARTENSTEIN : Contention-based forwarding for mobile ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 1(4):351–369, 2003.

- [74] P. GÄRDENFORS : Conditionals and changes of belief. *I. Niiniluoto and R. Tuomela (Eds.). The Logic and Epistemology of Scientific Change, Acta Philosophica Fennica*, 30:381–404, 1978.
- [75] GeoNet project (2008-2011) : <http://www.geonet-project.eu>.
- [76] GeoNet. final GeoNet architecture design, February 2010. GeoNet deliverable D1.2.
- [77] D.L. HALL : *Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion*. Artech House, Inc., Norwood, MA, USA, 1992.
- [78] H. HARTENSTEIN et K.P. LABERTEAUX : A tutorial survey on vehicular ad hoc networks. *Comm. Mag.*, 46(6):164–171, june 2008.
- [79] W.R. HEINZELMAN, J. KULIK et H. BALAKRISHNAN : Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. *Int. Conf. on Mobile Computing and Networking, MobiCom 1999*, 1999.
- [80] B. HOFMANN-WELLENHOF, H. LICHTENEGGER et J. COLLINS : *Global Positioning System : Theory and Practice*. Springer-Verlag, 1997.
- [81] C. HOWSON et P. URBACH : *Scientific Reasoning : the Bayesian Approach (3rd edition)*. Open Court Publishing Company, ISBN 978-0812695786, 2005.
- [82] 19th ITS World Congress, Vienna, Austria, 22 to 26 October 2012 : <http://2012.itsworldcongress.com>.
- [83] IPv6 ITS Station Stack ITSSv6 project (2011-2014) : <https://project.inria.fr/itssv6/fr>.
- [84] J. JAKUBIAK et Y. KOUCHERYAVY : State of the art and research challenges for VANETs. *Consumer communications and networking conference. CCNC 2008. 5th IEEE*, pages 912–916, 2008.
- [85] Japan Automobile Research Institute JARI : <http://www.jari.or.jp>.
- [86] D. JIANG et L. DELGROSSI : IEEE 802.11p : towards an international standard for wireless access in vehicular environments. *Vehicular technology conference, IEEE*, pages 2036–2040, October 2008.
- [87] D. JIANG, V. TALIWAL, A. MEIER, W. HOLFELDER et R. HERRTWICH : Design of 5.9 GHz DSRC-based vehicular safety communication. *IEEE Wireless Communications magazine*, 13(5):234–264, October 2006.
- [88] D.B. JOHNSON et D.A. MALTZ : Dynamic source routing in ad-hoc wireless networks. *Mobile Computing, T. Imielinski and H. Korth, Eds., Kluwer*, 1996.
- [89] D.B. JOHNSON, D.A. MALTZ et Y.C. HU : The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks (DSR) IETF internet draft, work in progress, draft-ietf-manet-dsr-09.txt. April 2003.
- [90] J. JUBIN et J.D. TORNOW : The darpa packet radio network protocols. *Proceedings of the IEEE*, 75(1):21–32, January 1987.
- [91] R.E. KAHN : The organization of computer resources into a packet radio network. *IEEE Transactions on Communications*, pages 169–178, January 1977.

- [92] E. KAPLAN : *Understanding GPS – Principles and applications*. Artech House, 2nd edition édition, December 2005.
- [93] B. KARP et H.T. KUNG : GPSR : greedy perimeter stateless routing for wireless networks. *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 243–254, January 2000.
- [94] H. KATSUNO et A. MENDELZON : On the difference between updating a knowledge base and revising it. In J.F. ALLEN, R FIKES et E SANDEWALL, éditeurs : *KR*, pages 387–394. Morgan Kaufmann, April 1991.
- [95] B.S. KERNER et H. REHBORN : Experimental properties and characteristics of traffic jams. *Physical Review E*, 53(2):1297–1300, 1996.
- [96] B.S. KERNER et H. REHBORN : Experimental properties of complexity in traffic flow. *Physical Review E*, 53(5):4275–4278, 1996.
- [97] B. KHALEGHI, A. KHAMIS, F.O. KARRAY et S.N. RAZAVI : Multisensor data fusion : A review of the state-of-the-art. *Information Fusion*, 14(1):28–44, 2013.
- [98] T. KOSCH, C.J. ADLER, S. EICHLER, C. SCHROTH et M. STRASSBERGER : The scalability problem of vehicular ad hoc networks and how to solve it. *IEEE Wireless Communications Magazine*, 13:22–28, 2006.
- [99] D. KRAJZEWICZ, J. ERDMANN, M. BEHRISCH et L. BIEKER : Recent development and applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, 5(3-4):128–138, December 2012.
- [100] M. KURDEJ, J. MORAS, V. CHERFAOUI et Ph. BONNIFAIT : Controlling remanence in evidential grids using geodata for dynamic scene perception. *International Journal of Approximate Reasoning*, 55(1):355–375, January 2014.
- [101] J. LANG et P. MULLER : Plausible reasoning from spatial observations. *Proceedings of the 17th Conference in Uncertainty in Artificial Intelligence*, pages 285–292, 2001.
- [102] K.C. LEE, U. LEE et M. GERLA : Survey of routing protocols in vehicular ad hoc networks. *Advances in Vehicular Ad-Hoc Networks : Developments and Challenges, IGI Global*, October 2009.
- [103] I. LEVI : The enterprise of knowledge. *MIT Press, Kambridge, MA*, 1980.
- [104] F. LI et Y. WANG : Routing in vehicular ad hoc networks : a survey. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2(2):12–22, 2007.
- [105] M.E. LIGGINS, D.L. HALL et J. LLINAS : *Handbook of multisensor data fusion : theory and practice, Second Edition*. Electrical engineering and applied signal processing series. CRC Press, Boca Raton, FL, London, New York, 2008.
- [106] Y.-W. LIN, Y.-S. CHEN et S.-L. LEE : Routing protocols in vehicular ad hoc networks : A survey and future perspectives. *Journal of Information Science and Engineering*, 26(3):913–932, 2010.
- [107] C. LOCHERT, H. HARTENSTEIN, J. TIAN, H. FÜSSLER, D. HERMANN et M. MAUVE : A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments. *Intelligent Vehicles Symposium, IV 2003*, 2003.

- [108] C. LOCHERT, B. SCHEUERMANN, M. CALISKAN et M. MAUVE : The feasibility of information dissemination in vehicular ad-hoc networks. *Forth Annual Conference on Wireless On demand Network Systems and Services, WONS 2007*, pages 92–99, 2007.
- [109] R.C. LUO et M.G. KAY, éditeurs. *Multisensor Integration and Fusion for Intelligent Machines and Systems*. Ablex Publishing Corp., Norwood, New Jersey, USA, 1995.
- [110] M. MAUVE, A. WIDMER et H. HARTENSTEIN : Hybrid neural-based decision level fusion architecture : application to road traffic collision avoidance. *Optical Engineering*, 37(2):370–377, 1998.
- [111] D. MERCIER : Belief functions contextual discounting and canonical decompositions. *International Journal of Approximate Reasoning*, 53(2):146–158, 2012.
- [112] D. MERCIER, T. DENGÈUX et M.-H. MASSON : Belief function correction mechanisms. *Studies in Fuzziness and Soft Computing, B. Bouchon-Meunier et al. (Eds.)*, 249:203–222, January 2010.
- [113] D. MERCIER, B. QUOST et T. DENGÈUX : Refined modeling of sensor reliability in the belief function framework using contextual discounting. *Information Fusion*, 9(1):246–258, 2006.
- [114] H. B. MITCHELL : *Multi-Sensor Data Fusion : An Introduction*. Springer Publishing Company, Incorporated, 1 édition, 2007.
- [115] P.L.J. MORSINK, R. HALLOUZI, I. DAGLI, C. CSEH, L. SCHAFERS, M. NELISSE et D.D. BRUIN : CarTalk 2000 : Development of a cooperative adas based on vehicle-to-vehicle communication. *Intelligent Transport Systems and Services*, 2003.
- [116] H. MOUSTAFA et Y. ZHANG : Vehicular networks : techniques, standards, and applications. *CRC Press*, 2009.
- [117] M. MUNZ et K. DIETMAYER : Using dempster-shafer-based modeling of object existence evidence in sensor fusion systems for advanced driver assistance systems. *Intelligent Vehicles Symposium, IV 2011, Baden-Baden, Germany*, pages 776–781, 2011.
- [118] R.R. MURPHY : Sensor and information fusion improved vision-based vehicle guidance. *IEEE Intelligent systems*, 13(6):49–56, 2008.
- [119] T. NADEEM, S. DASHTINEZHAD, C. LIAO et L. IFTODE : TrafficView : Traffic data dissemination using car-to-car communication. *ACM Sigmoblie Mobile Computing and Communications Review, Special Issue on Mobile Data Management*, 2004.
- [120] E.F. NAKAMURA, A.A.F. LOUREIRO et A.C. FRERY : Information fusion for wireless sensor networks : Methods, models, and classifications. *ACM Computing Surveys*, 39(3), 2007.
- [121] A. NANDAN, S. DAS, G. PAU, M. GERLA et M.Y. SANADIDI : Co-operative downloading in vehicular ad-hoc wireless networks. *In Proceedings of the 2nd Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services, WONS 2005*, WONS 2005, pages 32–41, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.
- [122] M. NEKOVÉE : Sensor networks on the road : the promises and challenges of vehicular ad hoc networks and grids. *Workshop on ubiquitous computing and e-Research*, 2005.

- [123] Network on Wheels NoW project (2004-2008) : <http://www.network-on-wheels.de>.
- [124] J. NZOUONTA, N. RAJGURE, G. WANG et C. BORCEA : VANET routing on city roads using real-time vehicular traffic information. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(7):3609–3626, September 2009.
- [125] S. OLARIU et M.C. WEIGLE : *Vehicular networks : from theory to practice*. Chapman & Hall/CRC, 1 édition, 2009.
- [126] Open Vehicular Secure Platform OVERSEE : <https://www.oversee-project.com>.
- [127] D. PAGAC, E.M. NEBOT et H. DURRANT-WHYTE : An evidential approach to map-building for autonomous vehicles. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(4):623–629, 1998.
- [128] S.N. PATHAK et U. SHRAWANKAR : Secured communication in real time VANET. *Second International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, Nagpur*, pages 1151–1155, 2009.
- [129] V. PATHAK, D. YAO et L. IFTODE : Securing location aware services over VANET using geographical secure path routing. *Proceedings of the International Conference on Vehicular Electronics and Safety – ICVES*, pages 346–353, 2008.
- [130] B. PAUL et M.J. ISLAM : Survey over VANET routing protocols for vehicle to vehicle communication. *Journal of Computer Engineering (IOSRJCE)*, ISSN : 2278-0661, ISBN : 2278-8727, 7:1–9, 2012.
- [131] C.E. PERKINS : *Ad Hoc Networking*. Addison-Wesley Professional, 1 édition, 2008.
- [132] C.E. PERKINS et E.M. ROYER : Ad-hoc on-demand distance vector routing. *In Proceedings of the Second IEEE Workshop on Mobile Computer Systems and Applications, WMCSA 1999*, pages 90–100, Washington, DC, USA, 1999. IEEE Computer Society.
- [133] C.E. PERKINS, E.M. ROYER et S. DAS : Ad hoc on demand distance vector (AODV) routing. *IETF RFC 3561*, 2003.
- [134] F. PICHON, D. DUBOIS et T. DENÈUX : Relevance and truthfulness in information correction and fusion. *International Journal of Approximate Reasoning*, 53(2):159–175, 2012.
- [135] F. PICHON, D. MERCIER, F. DELMOTTE et É. LEFÈVRE : Truthfulness in contextual information correction. *3rd International Conference on Belief Functions, BELIEF 2014, Oxford, United Kingdom, September 26-28*, pages 11–20, 2014.
- [136] M. PIORKOWSKI, M. RAYA, A.L. LUGO, P. PAPADIMITRATOS, M. GROSSGLAUSER et J.-P. HUBAUX : TraNS : Realistic joint traffic and network simulator for VANETs. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 11, January 2008.
- [137] Preparing Secure Vehicle-to-X Communication Systems PRESERVE project (2011-2014) : <http://www.preserve-project.eu>.
- [138] PReVENTive and Active Safety Applications PReVENT project (2004-2008) : <http://www.prevent-ip.org>.
- [139] Z. RAWASHDEH et S. MAHMUD : Intersection collision avoidance system architecture. *Consumer communications and networking conference. CCNC 2008. 5th IEEE*, pages 493–494, 2008.

- [140] M. RAYA, P. PAPADIMITRATOS, V.D. GLIGOR et J.-P. HUBAUX : On data-centric trust establishment in ephemeral ad hoc networks. *INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE*, 2:545–550, April 2008.
- [141] E.M. ROYER et C.-K. TOH : A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks. *IEEE Personal Communications*, 1999.
- [142] Smart Vehicles on Smart Roads SAFESPOT project (2006-2009) : <http://www.safespot-eu.org>.
- [143] L.J. SAVAGE : *Foundations of Statistics*. Wiley, New York, 1954.
- [144] French cooperative system pilot scoopf : <http://www.carfutur.com/tag/projet-scoo>.
- [145] S.-M. SENOUCI et T.M. RASHEED : Modified location-aided routing protocols for control overhead reduction in mobile ad hoc networks. *In Network Control and Engineering for QoS, Security and Mobility, IV*, pages 137–146, 2007.
- [146] G. SHAFER : *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press, Princeton, N.J., 1976.
- [147] P. SMETS : *Un modèle mathématico-statistique simulant le processus du diagnostic médical*. Thèse de doctorat, Université Libérale de Bruxelles, 1978.
- [148] P. SMETS : Belief functions : the disjunctive rule of combination and the generalized bayesian theorem. *International Journal of Approximate Reasoning*, 9:1–35, 1993.
- [149] P. SMETS : The canonical decomposition of a weighted belief. *International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI 1995, Montréal, Canada*, pages 1896–1901, 1995.
- [150] P. SMETS : The application of the transferable belief model to diagnostic problems. *International Journal of Intelligent Systems*, 13:127–157, 1998.
- [151] P. SMETS : The Transferable Belief Model for quantified belief representation. *Handbook of Defeasible Reasoning and Uncertainty Management Systems. D. M. Gabbay and P. Smets (Ed.)*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1:267–301, 1998.
- [152] P. SMETS : The application of the matrix calculus to belief functions. *International Journal of Approximate Reasoning*, 31(1-2):1–30, October 2002.
- [153] P. SMETS : Decision making in a context where uncertainty is represented by belief functions. *Belief Functions in Business Decisions. Srivastava R. and Mock, T.J. (Ed.) Physica-Verlag, Heidelberg, Germany*, pages 17–61, 2002.
- [154] P. SMETS : Decision making in the TBM : The necessity of the pignistic transformation. *International Journal of Approximate Reasoning*, 38(2):133–147, 2005.
- [155] P. SMETS : Analyzing the combination of conflicting belief functions. *Information Fusion*, 8:387–412, October 2007.
- [156] P. SMETS et R. KENNES : The Transferable Belief Model. *Artificial Intelligence*, 66:191–243, 1994.

- [157] L. SOMBE : A glance at revision and updating in knowledge bases. *International Journal of Intelligent Systems*, 9, 1994.
- [158] I. STOJMENOVIĆ : Handbook of wireless networks and mobile computing. *John Wiley & Sons, Inc.*, 2002.
- [159] P. SZCZUREK, B. XU, J. LIN et O. WOLFSON : Spatio-temporal information ranking in VANET applications. *International Journal of Next-Generation Computing*, 1(1), 2010.
- [160] C.-K. THO : Ad hoc mobile wireless networks. *Protocols and Systems*. Prentice Hall, 2002.
- [161] Y. TOOR, P. MUHLETHALER, A. LAOUITI et A. de LA FORTELLE : Vehicle ad hoc networks : Applications and related technical issues. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 10(1-4):74–88, 2008.
- [162] M. TORRENT-MORENO, J. MITTAG, P. SANTI et H. HARTENSTEIN : Vehicle-to-vehicle communication : Fair transmit power control for safety-critical information. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(7):3684–3703, September 2009.
- [163] Y.-C. TSENG, S.-Y. NI et Y.-S. CHEN : The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network. *ACM Wireless Networks*, pages 152–167, 2002.
- [164] S. TSUGAWA, S. KATO, K. TOKUDA, T. MATSUI et H. FUJII : A cooperative driving system with automated vehicles and inter-vehicle communications in Demo 2000. *IEEE Intelligent Transportation Systems, Dearborn, MI*, 2000.
- [165] US Department of Transportation USDOT : <http://www.its.dot.gov>.
- [166] R. VAN RENESSE : Future directions in distributed computing. chapitre The Importance of Aggregation, pages 87–92. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003.
- [167] Vehicular Ad Hoc Networks VANET : <http://www.vanet.info>.
- [168] VESPA system : <http://www.univ-valenciennes.fr/R0I/SID/tdelot/vespa/index.html>.
- [169] Vehicle Infrastructure Integration Consortium VIIC : <http://www.vehicle-infrastructure.org>, <http://www.its.dot.gov/vii>.
- [170] Vehicle safety consortium, task 3 final report - identify intelligent vehicle safety applications enabled by DSRC, vehicle safety communications project, 2005, 2005.
- [171] VSC final report, US DOT, vehicle safety communications project DOT HS 810 591, 2006.
- [172] VSC-A final report, US DOT, vehicle safety communications applications (VSC-A) project DOT HS 810 073, 2009.
- [173] L. WALD : Some terms of reference in data fusion. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 37(3):1190–1193, May 1999.
- [174] E.L. WALTZ et J. LLINAS : *Multisensor Data Fusion*. Artech House, Inc., Norwood, MA, USA, 1990.

- [175] S.Y. WANG, C.L. CHOU, C.H. HUANG, C.C. HWANG, Z.M. YANG, C.C. CHIOU et C.C. LIN : The design and implementation of the NCTUns 1.0 network simulator. *Computer Networks*, 42(2):175–197, 2003.
- [176] 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 Standard 802.11p, 2010.
- [177] L. WISCHOF, A. EBNER et H. ROHLING : Information dissemination in self-organizing intervehicle networks. *IEEE Transportation on Intelligent Transportation Systems*, 6(1), March 2005.
- [178] Q. XU, T. MAK, J. KO et R. SENGUPTA : Vehicle-to-vehicle safety messaging in DSRC. In Kenneth P. LABERTEAUX, Raja SENGUPTA, Chen-Nee CHUAH et Daniel JIANG, éditeurs : *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, VANET 2004, pages 19–28. ACM, 2004.
- [179] K. YASUTO : DSRC standards for multiple applications, oki electric industry. *11th World Congress on ITS, Nagoya, Japan*, 2004.
- [180] J. YIN, T. ELBATT, G. YEUNG, B. RYU, S. HABERMAS, H. KRISHNAN et T. TALTY : Performance evaluation of safety applications over DSRC vehicular ad hoc networks. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, VANET 2004, pages 1–9, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [181] S. YOUSEFI, M. MOUSAVI et M. FATHY : Vehicular ad hoc networks (VANETs) : Challenges and perspectives. pages 761–766, June 2006.
- [182] L.A. ZADEH : Fuzzy sets. *Information and Control*, 8:338–353, 1965.
- [183] L.A. ZADEH : Fuzzy sets as a basis for theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 1:3–28, 1978.
- [184] S. ZEDADALLY, R. HUNT, Y.-S. CHEN, A. IRWIN et A. HASSAN : Vehicular ad hoc networks (VANETs) : status, results, and challenges. *Telecommunication Systems*, 50(4):217–241, 2012.
- [185] L. ZHANG, D. GAO, W. ZHAO et H.-C. CHAO : A multilevel information fusion approach for road congestion detection in VANETs. *Mathematical and Computer Modelling*, 58:1206–1221, September 2013.
- [186] J. ZHAO et G. CAO : VADD : Vehicle-Assisted Data Delivery in vehicular ad hoc networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57(3):1910–1922, 2008.

Annexe A

Exemple d'implémentation dans des Smartphones

Une application a été développée sur smartphones par Mohamed Amir Esseghir au sein du laboratoire LGI2A pour montrer la faisabilité des travaux réalisés. La méthode implémentée est la première méthode proposée pour gérer les événements locaux dans le chapitre 2, où les messages initiaux sont gardés dans la base des véhicules et l'affaiblissement est utilisé pour prendre en compte le vieillissement des messages.

Il s'agit d'une application Android¹ testée avec des smartphones de la marque HTC. Ces derniers échangent leurs données en utilisant la technologie de communication Bluetooth (voir section 1.2.3).

Cette application permet au conducteur de créer un message, comme l'illustre la figure A.1. Dans cet exemple, le conducteur informe qu'un accident est présent et y attribue une confiance égale à 66%.

Les messages sont communiqués entre smartphones. Chaque smartphone construit sa propre synthèse de la situation de la route et l'affiche au conducteur. Un exemple est donné dans la figure A.2, où différents types d'événements sont affichés au conducteur avec les informations suivantes pour chaque événement : son type, la probabilité pignistique de sa présence, la distance séparant le véhicule de cet événement, la date du dernier message informant de sa présence.

La version utilisée du Bluetooth n'est pas récente et requiert un temps important pour échanger les informations. Pour cela, nous n'avons pas pu tester cette application en grandeur nature.

Ces travaux, publiés dans [27], ont montré la faisabilité de l'implémentation des fonctions de croyance dans des applications smartphones et la capacité de ces derniers à gérer et fusionner un nombre important de messages.

1. Android est un système d'exploitation mobile open-source pour smartphones.

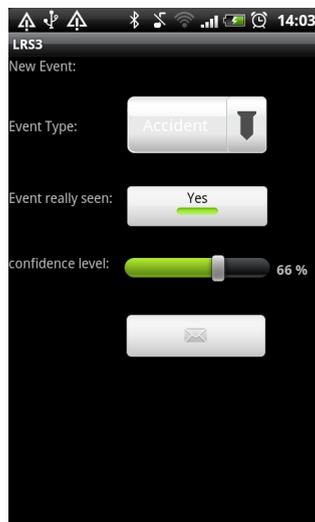


FIGURE A.1 – Application smartphone : création d'un message informant de la présence d'un accident.

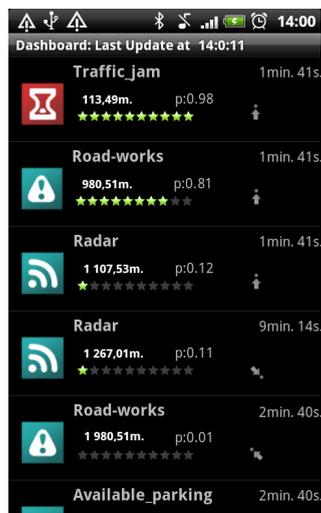


FIGURE A.2 – Application smartphone : synthèse des événements sur la route donnée au conducteur.

