HAL
open science

Comment les véhicules autonomes doivent-ils communiquer ?

Florent Altché, Philip Polack, Arnaud de La Fortelle

To cite this version:

Florent Altché, Philip Polack, Arnaud de La Fortelle. Comment les véhicules autonomes doivent-ils communiquer ?. Rencontres de la Mobilité Intelligente, Jan 2017, Montrouge, France. hal-01691909

HAL Id: hal-01691909

https://minesparis-psl.hal.science/hal-01691909

Submitted on 24 Jan 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Comment les véhicules autonomes doivent-ils communiquer ?

Florent Altché, Philip Polack, Arnaud de La Fortelle

Introduction

L'arrivée prochaine de véhicules autonomes sur nos routes ne fait plus guère de doute, même si le moment de leur introduction ou le degré de leur autonomie font encore débat. Il va de soi que ces véhicules seront hyper-connectés afin d'en tirer tous les bénéfices en termes de sécurité et d'efficacité ; mais aussi parce les techniques sont prêtes (standards C-ITS). Cependant cette vision optimiste cache quelques problèmes, et en particulier celui de savoir comment les véhicules autonomes doivent communiquer. Une autre question, intiment associée, est de déterminer à quoi doivent servir ces communications.

Les communications véhiculaires sont un sujet de recherche pratiquement aussi ancien que la conduite autonome, mais les deux se sont développées parallèlement. La convergence de ces techniques est évidemment très souhaitable, le véhicule autonome et connecté se transformant en un agent intelligent d'une mobilité polyvalente, mais ceci ne peut se produire sans une certaine homogénéité. Or on observe aujourd'hui que, face à une grande diversité de types de messages et de cas d'usages, la tendance est à la spécialisation des systèmes de communications, à l'image de l'*eCall* ou du *geonetworking*. Une solution est d'aller vers des quasi-monopoles où ce problème sera résolu par la plate-forme (tactique connue du « *first takes all* »). La solution que nous entreprenons d'étudier replace les véhicules autonomes et communicants comme des briques du futur Internet des Objets, en organisant les communications de telle sorte qu'une diversité inimaginable d'applications puisse en émerger.

Afin d'organiser ces communications, il est important de se demander quelles sont les informations nécessaires, qui les génère et qui en est le destinataire. Nous nous restreignons ici au cas du véhicule autonome, pour lequel la réflexion a bien progressé, mais c'est en fait un exemple assez générique et le lecteur pourra facilement transposer cette analyse à bien d'autres situations.

Le papier montrera comment des protocoles dédiés, comme le *geonetworking* peuvent être généralisés à d'autres cas d'usage, en considérant à la fois leurs propriétés intrinsèques (latence, sécurité…) et les besoins des applications de conduite. On peut en effet conduire de manière totalement autonome en prenant ses décisions seul, tout en tenant compte d'un certain nombre de signaux venant de l'extérieur. Il s'agit dans ce cas de coopération, où on opère ensemble tout en conservant son propre contrôle et ses propres objectifs. Mais on peut aller jusqu'à la coordination, où l'on ordonne ensemble les mouvements de chacun, auquel cas l'on accepte une perte partielle de contrôle en échange d'une plus grande efficacité collective. Partant des communications, c'est ainsi toute l'architecture de planification et de contrôle qui en est impactée, car il est crucial de s'assurer de la cohérence des informations afin d'avoir une cohérence des mouvements, depuis leur planification jusqu'à la commande du véhicule afin d'assurer la sécurité et l'efficacité. En retour, une compréhension fine des mécanismes de planification et de contrôle – distribués ou centralisés – permet de mieux comprendre les propriétés des informations à communiquer.

Les systèmes de communication

Il existe de nombreux aspects qui permettent de décrire les systèmes de communication, même en se limitant à ce qui touche au véhicule autonome : canal physique (p. ex. fréquence), protocoles utilisés (IEEE, IETF, propriétaires...), structures de partage des données (p. ex. centralisée, hiérarchique, distribuée : voir Figure 1) ou encore caractéristiques (bande passante, latence…). Le but de ce papier étant de montrer qu'une certaine hétérogénéité est bénéfique à l'introduction de la conduite autonome, nous allons reprendre une dichotomie commode : communications distribuées V2V (véhicule – véhicule) ou communication centralisée V2I (véhicule – infrastructure). Le lecteur averti pourra facilement élargir les raisonnements à une vision plus fine.

On associe facilement les communications V2V aux réseaux distribués, ad-hoc, pair-à-pair et à faible latence. Ils sont créés en associant des nœuds du réseau de façon dynamique (réseau ad hoc) puis en leur permettant de diffuser des messages (routage). Plus on veut envoyer des messages loin dans le réseau, plus le problème d'adressage et de routage est difficile : les réseaux V2V sont donc essentiellement conçus pour être *locaux*. Le principal avantage d'une architecture de communication distribuée réside dans sa capacité à accommoder un grand nombre de véhicules : puisque chaque acteur apporte ses propres capacités de communication au réseau déjà existant, l'impact d'un nouveau véhicule sur les besoins de bande passante est relativement limité. Conséquence de cet avantage, le principal inconvénient des réseaux V2V est l'incohérence : elle peut être temporelle (il n'y a pas de garantie de synchronicité), spatiale (portée pratique limitée) ou topologique (à la limite le réseau peut se fragmenter).

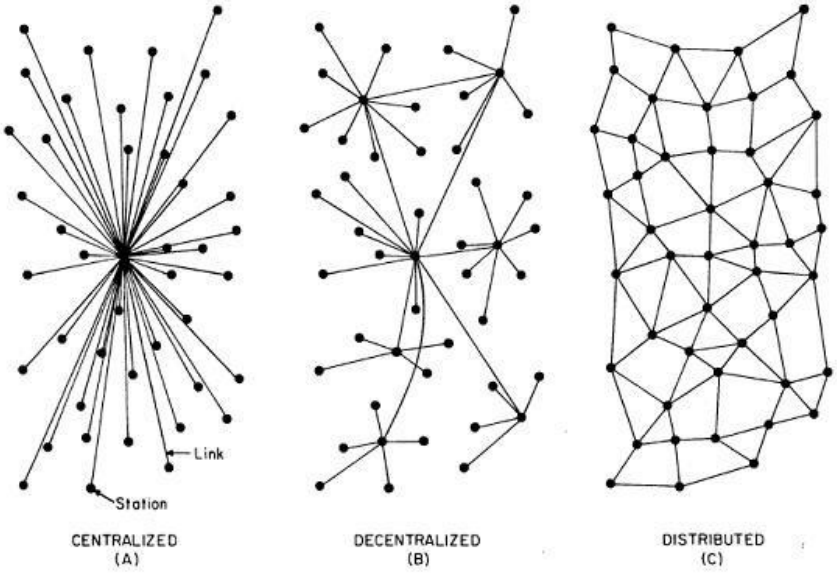

Figure 1 : Illustration d'un réseau centralisé (gauche), hiérarchique (centre) ou distribué (droite)

À l'opposé, les communications V2I sont associées aux réseaux centralisés, stables dans le temps et dans l'espace. Le réseau est maintenu par un point central (serveur, cloud, opérateur…) et les véhicules s'y connectent au démarrage. Les communications centralisées permettent d'assurer la cohérence de l'information à l'échelle du réseau, de garantir une connectivité individuelle (puisqu'on ne dépend plus des voisins) et en général certaines garanties de service, fournies par le réseau.

De façon schématique, on peut considérer que les communications V2V portent avant tout sur des informations *locales*, ayant essentiellement des impacts à court terme, comme prévenir d'un début de freinage ou d'une intention de changer de file. Au contraire, les communications V2I sont intéressantes pour transmettre des informations ayant une portée importante dans l'espace ou le temps, par exemple pour partager son itinéraire (avec des applications à la gestion de la mobilité) et ainsi indiquer un choix de destination dans un rond-point ou une intersection (avec des applications en gestion de trafic ou de planification coopérative).

Concluons en insistant à nouveau sur la simplification de notre dichotomie : la réalité qui se dessine aujourd'hui est une superposition des deux types de communication, non seulement dual (V2V et V2I) mais comportant aussi des communications hybrides, centralisées à certaines échelles et distribuées à d'autres.

La communication V2V : une question de sécurité

La communication entre usagers de la route joue un rôle majeur dans la sécurité routière. Ainsi, elle est déjà omniprésente que ce soit dans les véhicules, à travers les clignotants, le feu stop, le feu de recul, le feu de détresse ou le klaxon, ou que ce soit dans les mœurs, à travers les signes de laisser-passer de la main, les signes de remerciement ou encore les appels de phares. Ces communications sont cruciales car elles permettent de signifier son intention aux autres usagers.

La communication *V2V* qui permet à deux véhicules d'échanger des informations directement entre eux est l'extension naturelle de ces moyens de communication dans le cas des véhicules autonomes. En effet, ces dernières seront capables d'échanger et d'analyser davantage d'informations que deux conducteurs humains. Le V2V permettrait ainsi d'augmenter la fiabilité du système de planification et de contrôle, mais aussi de combler les limites de perception des capteurs. On considère ainsi que les véhicules connectés seront une pièce importante de l'IoT (Internet des Objets).

Afin de discuter des modes d'utilisation de la communication V2V, nous proposons quatre scenarii illustratifs.

a. Mieux comprendre les intentions des autres usagers

Une manœuvre typique dont la sécurité serait renforcée par la présence de communication V2V est le scénario de changement de file illustré sur la Figure 2. Dans cette situation, le véhicule bleu souhaite s'intercaler entre le véhicule jaune et le véhicule rouge. Sans communication V2V, cette manœuvre serait très compliquée à réaliser pour des véhicules autonomes. En revanche, grâce à la communication V2V, le véhicule bleu va pouvoir informer le véhicule rouge de son intention. Ce dernier peut alors choisir de ralentir pour laisser suffisamment de place au véhicule bleu pour s'insérer, et peut confirmer au véhicule bleu que son intention a bien été prise en compte, rendant la manœuvre plus sûre et plus efficace.

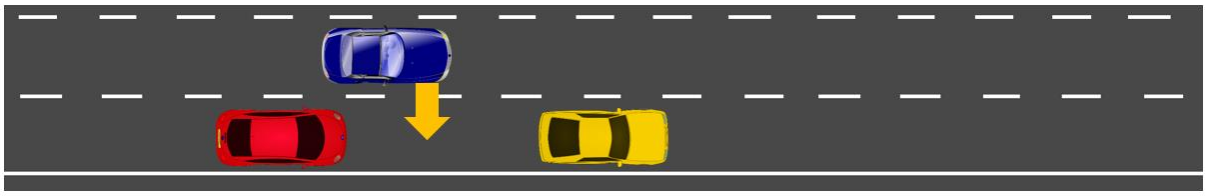

Figure 2 : Scénario de changement de file

b. Combler les limites des capteurs

Les véhicules autonomes seront par ailleurs équipés de capteurs embarqués, tels que des caméras, des RADAR, des LiDAR ou encore des capteurs ultrasons. Ils permettent grâce à un traitement de données très rapide (de l'ordre de quelques ms) de localiser les obstacles fixes et mobiles. Cependant, ces capteurs sont limités par leur portée, notamment lorsque la route est sinueuse. Ainsi, même les capteurs à longue portée sont souvent limités à une portée effective de quelques dizaines de mètres. Or, la distance de freinage d'un véhicule roulant à 110 km/h sur route mouillée est d'environ 80m. Par conséquent, si on suppose que le véhicule qui précède le véhicule rouge est arrêté (cf. Figure 3) à cause d'un bouchon, le véhicule ne va réagir qu'à partir du moment où il le voit à l'aide de ses capteurs. Cependant, compte-tenu de l'avancée du véhicule pendant le temps de traitement de l'information provenant des capteurs, le véhicule va procéder à un freinage d'urgence qui ne sera pas agréable pour le conducteur et pourrait même s'avérer dangereux pour les véhicules le suivant. Ce cas de figure devient encore plus critique si le bouchon s'est formé en sortie de virage car le champ de vision des capteurs du véhicule ne permet de voir que tardivement le véhicule précédent qui est arrêté. Par conséquent, la présence de communication *V2V* permettrait au dernier véhicule jaune d'avertir le véhicule rouge qu'il est à l'arrêt à seulement quelque dizaine de mètres devant lui.

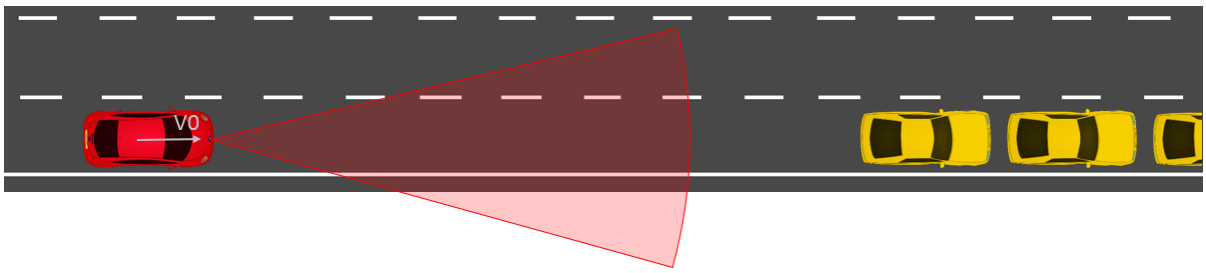

Figure 3 : limites de portée des capteurs embarqués (caméra, LiDAR, RADAR…)

Une variante de ce problème est l'occlusion des capteurs, où un obstacle empêche les capteurs de détecter un danger. Un exemple de tel scénario a été imaginé et testé par le magazine Autoplus[1] (cf. Figure 4) : en raison de la présence du véhicule bleu, le véhicule rouge ne peut détecter la présence de véhicules arrêtés plus loin. Au lieu de ralentir, le véhicule bleu maintient sa vitesse, puis change de file au dernier moment. La plupart des véhicules testés par le magazine – certes uniquement équipés de régulateurs de vitesse adaptatifs (ACC, *adaptive cruise control*) et non de fonctions d'autonomie – n'ont pas été en mesure de détecter suffisamment tôt l'obstacle pour pouvoir s'arrêter sans collision. Les techniques de communication V2V, que ce soit pour signaler la présence de véhicules arrêtés ou

[1] http://news.autoplus.fr/Volkswagen/Passat/Volkswagen-Passat-Voiture-Autonome-Vid%C3%A9o-Essai-1509565.html

partager d'éventuelles données de capteurs entre le véhicule bleu et le véhicule rouge, permettraient ici d'éviter les collisions.

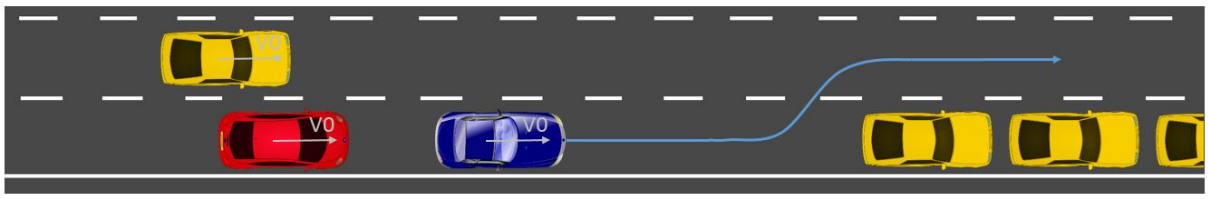

Figure 4 : Occlusion du danger

c. Assurer la stabilité en chaîne

Les systèmes équipés de régulateur de vitesse adaptatif de type *ACC*, doivent respecter deux types de stabilité : la stabilité du véhicule individuel et la stabilité du véhicule en chaîne. Dans le premier cas, l'erreur d'espacement du véhicule suiveur par rapport au véhicule leader doit tendre vers 0 lorsque ce dernier avance à vitesse constante. Dans le deuxième cas, on considère une suite de véhicules où le premier véhicule décélèrerait brutalement : il faut alors que l'erreur d'espacement entre les véhicules ne se propage pas d'une voiture à l'autre, ce qui entraînerait une probable collision à l'arrière de la chaîne. Avec une politique d'espacement fondée sur une distance constante, on peut montrer que le régulateur de vitesse adaptatif est stable individuellement mais pas en chaîne. Par conséquent, si plusieurs voitures qui se suivent sont munies d'un tel système, une collision est inévitable en cas de freinage brusque du premier. Il faut alors définir une politique d'espace fondée sur un temps constant. Cependant, ceci limite l'efficacité du transport. Une solution pour éviter ce problème est donc le C-ACC (*Cooperative adaptive cruise control*), c'est-à-dire un régulateur de vitesse adaptatif utilisant les systèmes de communication entre véhicules afin d'éviter les problèmes de stabilité. Dans ce cas, les véhicules freinent tous au même moment (au délai de communication près).

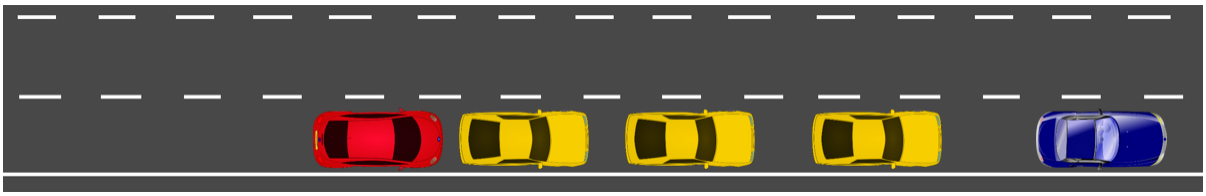

Figure 5 : Stabilité en chaîne

d. Informer d'un danger

Les nouvelles technologies de l'information permettent aujourd'hui de réduire également les accidents en avertissant les autres usagers de dangers localisés : animal sur la voie, voiture arrêtée sur la bande d'arrêt d'urgence, accidents, verglas… C'est le cas par exemple de l'application *Waze*. Ce type d'information pourrait également être communiqué automatiquement entre véhicules proches pour avertir du danger et leur permettre de réduire leur vitesse.

La communication V2I : une question d'efficacité

Si les usages de la communication V2V sont principalement d'améliorer la sécurité, la communication V2I pourrait permettre d'améliorer l'efficacité du trafic. Vraisemblablement plus lentes, à la fois en débit et en latence, que les communications V2V, les communications V2I présentent l'avantage de distinguer une hiérarchie parmi les différents acteurs. En effet, contrairement aux protocoles pair-à-pair, le serveur d'infrastructure constitue une autorité dans les communications V2I et peut, à ce titre, imposer des contraintes aux véhicules (et assurer la synchronicité). De la même manière qu'un feu de signalisation présente un caractère obligatoire contrairement à un appel de phares, ignorer des consignes reçues de l'infrastructure pourrait constituer une infraction.

Comme précédemment, nous proposons deux applications pour illustrer les usages de la communication V2I.

a. Aider la prise de décision

Considérons une intersection routière telle que présentée sur la Figure 6, où les quatre routes sont régies par des priorités à droite et tous les véhicules veulent aller tous droit. Ce type d'intersections est courant sur des routes peu fréquentées en France, et extrêmement courantes dans certains pays tels que les États-Unis (*four-way stops*). Les conducteurs sont souvent habitués à ce type de routes, et arrivent généralement à convenir d'un ordre de passage. En revanche, ce problème est extrêmement délicat pour des véhicules autonomes qui ne communiqueraient pas, et nécessiterait probablement une intervention humaine pour débloquer la situation. De même, des communications ayant lieu uniquement entre paires de véhicules sur un modèle V2V pair-à-pair ne sont pas suffisantes pour déterminer une façon de traverser l'intersection.

Dans une telle situation, on comprend rapidement l'avantage qu'un acteur extérieur – un *gestionnaire d'intersection* – prenne la décision d'un ordre de passage, permettant ensuite aux véhicules de naviguer sans blocage. Cette décision peut alors être communiquée aux véhicules ; par ailleurs, divers travaux[2] ont montré que cette décision peut être encodée de façon compacte sous la forme d'un graphe, ce qui minimise les besoins en bande passante.

Précisons, pour l'exhaustivité, que des algorithmes de consensus distribués existent et permettraient aux véhicules de l'exemple de converger vers une solution en utilisant uniquement des communications de type V2V. Toutefois, ces méthodes requièrent de nombreux échanges, et sont peu pratiques à implémenter.

[2] Jean Gregoire. Priority-based coordination of mobile robots. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2014.

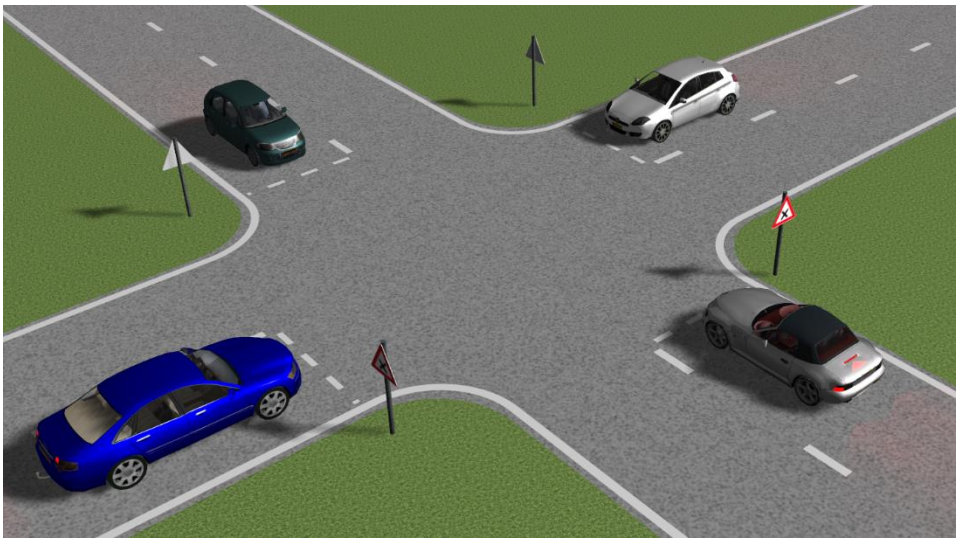

Figure 6 : Intersection à 4 priorités à droite

b. Améliorer l'efficacité du trafic

Les considérations précédentes montrent comment la communication V2I permet la prise de décision centralisée, et rend raisonnablement réaliste le fait que les véhicules se conforment à ces décisions. Une telle approche autorise une gestion du trafic infiniment plus fine que ce que permettent aujourd'hui les outils de régulation de trafic tels que les feux de signalisation ou les panneaux à messages variables.

Nous laissons volontairement de côté les usages déjà largement connus des communications V2I concernant la collecte de données au profit des gestionnaires d'infrastructures, pour nous concentrer sur les applications plus spécifiques aux véhicules autonomes. Dans la lignée du scénario précédent, on peut par exemple imaginer une gestion d'intersection entièrement automatisée, dans laquelle les feux de signalisation sont remplacés par des consignes communiquées par des messages V2I. Cette notion de gestion autonome d'intersection (*Autonomous intersection management*) a déjà été largement étudiée[3], et plusieurs familles de méthodes ont été proposées pour garantir la sécurité des véhicules tout en réduisant leur temps d'attente par rapport à l'utilisation de feux de signalisation. Par ailleurs, des algorithmes permettant de calculer un ordre de passage optimal pour un nombre arbitraire de véhicules à une intersection ont été développés[4]. Des simulations ont notamment montré[5] qu'un tel ordonnancement optimal permet de réduire grandement le temps perdu par les véhicules pour traverser une intersection. La Figure 7 compare le temps perdu relatif en utilisant une politique de « premier arrivé, premier servi », relativement comparable à l'utilisation de priorités à droite, avec le temps perdu en utilisant une politique optimale. Précisons que la politique « premier

[3] Dresner, K., & Stone, P. (2004). Multiagent traffic management: a reservation-based intersection control mechanism. In Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems - Volume 2 (pp. 530–537). IEEE Computer Society.
[4] Altché, F., Qian, X., & de La Fortelle, A. (2016). Time-optimal Coordination of Mobile Robots along Specified Paths. 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.
[5] Altché, F. and de La Fortelle, A. (2016). Analysis of optimal solutions to robot coordination problems to improve autonomous intersection management policies. 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium.

arrivé, premier servi » est elle-même plus efficace que l'utilisation de feux de signalisation pour des niveaux de trafic faibles.

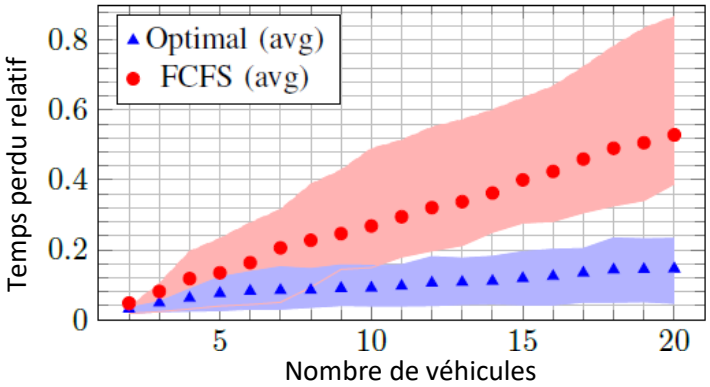

Figure 7 : Gain de temps rendu possible par un ordonnancement optimal des véhicules à une. Lecture : un temps perdu relatif de 1 indique que les véhicules mettent en moyenne deux fois plus de temps à traverser l'intersection qu'il ne leur en faudrait si l'intersection était vide.

Conclusion

On le voit, il existe de multiples manières de communiquer ainsi que de nombreuses occasions d'en bénéficier mais on peut raisonnablement classer les systèmes de communication en deux catégories principales : centralisée (V2I) ou distribuée (V2V). On obtient alors essentiellement deux types d'applications : sécurité (V2V) ou efficacité (V2I). Ces applications ont été brièvement illustrées et analysées dans le papier, mais il est très aisé d'en construire de nombreuses autres.

Ce papier laisse deux grands problèmes ouverts. Le premier est celui du « langage ». On l'a vu, chaque application demande une certaine information, que ce soit dans le V2V ou le V2I. Construira-t-on un ensemble de messages pour chaque application ? En effet, en complexifiant un peu les échanges, on aboutirait à une « langue » pour chaque type d'application. Pour lutter contre cette tendance naturelle (imagine-t-on Coyote et Waze échanger leurs messages ?), un certain nombre de standards ont vu le jour (ISO, ETSI), avec le soutien des gouvernements et de l'industrie. Le problème est que nous ne savons pas quelles seront toutes les applications à venir, et donc quelles informations seront nécessaires : ce qui est nécessaire à la bonne gestion d'une intersection automatisée ne correspond pas à un problème de dépassement. Ce problème de langage pose un risque de fragmentation des applications et donc de ralentissement du déploiement des véhicules autonomes et connectés.

Le deuxième grand problème est précisément celui de la cohérence, et le premier problème le complique singulièrement. En effet, nous ne voulons pas que notre mobilité sûre ou efficace : nous voulons les deux. Il y a même d'autres critères souhaitables pour ces systèmes complexes (passage à l'échelle, résilience, sécurité…). Même en s'en tenant à notre dichotomie, nous voyons qu'une combinaison des deux types de communication sera nécessaire pour combiner sûreté et efficacité. Mais on n'obtiendra une addition (plutôt qu'un brouillage) qu'en s'assurant que les applications sont cohérentes. Ceci pose un défi aux modèles mathématiques sous-jacents, mais aussi à l'implémentation et aux tests.

En conclusion, le véhicule autonome gagnera énormément à dialoguer avec les autres véhicules et avec l'infrastructure. Les techniques de communications sont déjà matures pour nombre d'entre elles

et sont sans cesse améliorées. On sait exploiter ces possibilités pour créer des applications coopératives qui devraient révolutionner notre mobilité. Mais il existe encore certains verrous et il est important d'en être conscient pour ne pas déployer des systèmes qui seraient trop vite désuet ou inadaptables. La flexibilité des systèmes sera donc une obligation pour qui désirera participer au déploiement des véhicules autonomes et coopératifs.

Florent ALTCHÉ est doctorant au Centre de Robotique de MINES ParisTech, en lien avec l'Ecole des Ponts ParisTech.

Il s'intéresse à la planification de trajectoires sûres et efficaces pour les véhicules autonomes dans un environnement dynamique et incertain, notamment en milieu urbain, ainsi qu'à la coordination de véhicules aux intersections.

Philip POLACK est doctorant au Centre de Robotique de MINES ParisTech, dans le cadre de la Chaire Drive For All pour les véhicules autonomes.

Il s'intéresse principalement au domaine du contrôle des véhicules autonomes en milieu hautement incertain, notamment à la cohérence et la stabilité des lois de commande avec la situation de vie dans laquelle évolue le véhicule.

Arnaud de LA FORTELLE est directeur du Centre de Robotique de MINES ParisTech, titulaire de la Chaire de Logistique Urbaine et titulaire de la Chaire Drive For All pour les véhicules autonomes.

Dans ses recherches, il a d'abord étudié les propriétés théoriques des distributions de probabilité avec des applications aux réseaux de files d'attente. Il applique ensuite ces connaissances à des réseaux de véhicules avec une attention particulière pour les cybercars et il s'est également intéressé aux problématiques de communication pour les systèmes distribués.

Actuellement son principal sujet d'intérêt est celui des systèmes coopératifs, en particulier appliqués à la conduite automatisée et à ses impacts dans une ville intelligente.