



HAL
open science

Modèle d'auto-organisation pour réseaux ad hoc véhiculaires: application à la perception élargie coopérative

Lucas Rivoirard, Martine Wahl, Patrick Sondi

► **To cite this version:**

Lucas Rivoirard, Martine Wahl, Patrick Sondi. Modèle d'auto-organisation pour réseaux ad hoc véhiculaires: application à la perception élargie coopérative. 46ème Congrès ATEC ITS France, Les Rencontres de la Mobilité Intelligente (RDMI), Jan 2019, Paris, France. pp.10. <hal-02148593>

HAL Id: hal-02148593

<https://hal.science/hal-02148593v1>

Submitted on 5 Jun 2019

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.



HAL Authorization

Modèle d'auto-organisation pour réseaux ad hoc véhiculaires : application à la perception élargie coopérative

Rivoirard Lucas, Martine Wahl, Patrick Sondi

1. Enjeux et objectifs

Les réseaux véhiculaires Ad-Hoc (VANET) permettent d'envisager une large gamme d'applications pour les systèmes de transport intelligents (STI), notamment des systèmes d'assistance au conducteur et d'automatisation de la conduite pour réduire le risque d'accident, améliorer la perception de l'environnement autour du véhicule et plus largement perfectionner la gestion du trafic routier. De nombreux défis sont à relever comme le partage des ressources limitées en bande passante du medium de communication, l'obtention d'une liaison de communication robuste malgré de courtes durées de connexions entre les véhicules ou encore une capacité du système à fournir un service de communication dans des conditions de densités disparates de véhicules au sein du réseau routier. Ces systèmes seront de plus confrontés aux évolutions des standards technologiques de communication.

2. État de l'art, descriptif de la situation

Les travaux actuels reposent en particulier sur la présence d'une infrastructure constituée d'un ensemble d'unités de bord de route (UBR) permettant des communications entre les véhicules et l'infrastructure (V2I). Cependant, le coût de déploiement de cette infrastructure est significatif au moment de l'installation et lors de la maintenance. De plus, dans l'hypothèse d'une infrastructure défaillante, un verrou scientifique est de concevoir une stratégie de communication *ad hoc* véhicule-à-véhicule (V2V) qui permette, d'une part, les communications proches nécessaires à l'échange de variables entre véhicules autonomes voisins et, d'autre part, les communications lointaines utiles à l'échange de messages d'alertes et plus largement de gestion du réseau routier. Vraisemblablement, les architectures V2I et V2V (figure 1) devront fonctionner ensemble, se compléter et coopérer afin d'assurer une continuité de service.

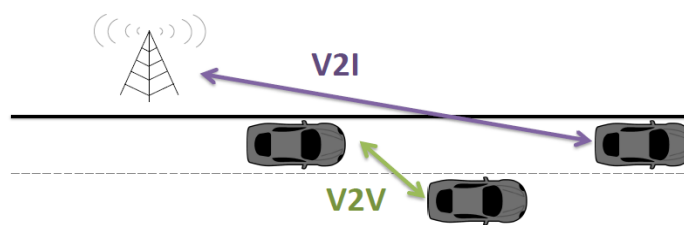


Figure 1. Illustration des échanges dans une architecture de communication V2V et V2I

Les travaux présentés dans cet article ont été menés au laboratoire COSYS-LEOST de l'IFSTTAR de 2015 à 2018. Dans de précédents articles^{1,2}, nous avons présenté l'algorithme Chaîne-branche-feuille (CBL –*Chain-Branch-Leaf*) que nous avons développé. Nous nous intéressons alors à la construction d'une infrastructure virtuelle dynamiquement stable qui repose sur des communications V2V de sorte à offrir une solution qui permettrait de pallier une panne (telle celle des UBRs) qui entraînerait une rupture du service de communication V2I. Un autre objectif de cette structure sera d'organiser les échanges entre les véhicules en limitant, dans le cas d'une communication point-à-point le nombre de véhicules intermédiaires qui rediffuseront le message initié par un véhicule à un ou des véhicules destinataires.

Dans cet article, nous montrons comment l'application coopérative et distribuée de perception élargie pourrait utiliser les services de communication de CBL et nous évaluons ses performances par simulation en termes de délais et de taux de réception.

3. Méthodes innovantes

3.1. Protocole CBL d'auto-organisation des communications V2V

L'algorithme CBL, développé à l'IFSTTAR, offre au réseau V2V les services d'une nouvelle topologie de réseau *ad hoc* qui optimise l'utilisation du réseau de communication au moyen de la définition de régions d'intérêt. CBL établit des liens et des regroupements (*clusters*) entre véhicules en fonction de la mobilité des véhicules et de la qualité de leurs liens de communication. L'algorithme construit une structure fédératrice qui rend possible aussi bien des communications entre véhicules proches (par exemple pour le partage de variables au moyen de la transmission de messages CAM^{3,4}) que des communications entre véhicules lointains (par exemple pour la transmission de messages d'alertes via des messages DENM^{2,3}). Si CBL offre une structure fédératrice similaire à celle obtenue classiquement par une architecture V2I, sa construction repose sur l'échange de messages périodiques entre les véhicules (V2V).

CBL est un algorithme proactif distribué pour lequel chaque nœud (véhicule communicant) initie et gère localement son propre processus. L'algorithme crée une hiérarchie entre les nœuds et définit deux types de nœuds (figure 2) : les nœuds « branche » (*Branch*) et les nœuds « feuille » (*Leaf*). Ces nœuds et la notion de chaîne sont définis comme suit.

Un **nœud branche** est responsable d'un groupe de nœuds feuille (*cluster*). Il est élu par d'autres nœuds (branche ou feuille) et participe à la construction d'une chaîne de véhicules relais circulant dans une même direction. Outre l'émission des messages applicatifs dont il est l'initiateur (la source), il a un rôle de relais pour des messages applicatifs initiés par d'autres nœuds sources et à destination d'un ou plusieurs véhicules destinataires distants de plus d'un

¹ « Chain-Branch-Leaf: a Clustering Scheme for Vehicular Networks Using Only V2V Communications », *Ad Hoc Networks*, vol. 68, pp. 70–84, janvier 2018.

² Lucas Rivoirard, Martine Wahl, Patrick Sondi, Marion Berbineau, Dominique Gruyer (2018). « Proposition d'une structuration dynamique d'un réseau de communication intervéhiculaire pour les ITS », RDMI 2018, Les rencontres de la mobilité intelligente, ATEC ITS FRANCE, Paris, FRANCE, 24-25 janvier 2018.

³ *Cooperative Awareness Message (CAM)* ; *Decentralized Environmental Notification Message (DENM)*.

⁴ L'ETSI a publié deux standards européens pour les ITS qui définissent les ensembles de message nécessaire pour le fonctionnement des applications ITS de sécurité coopératives et critiques : le standard EN 302 637-2 relatif à la spécification du service « *Cooperative Awareness Basic Service* » et le standard EN 302 637-3 relatif à la spécification du service « *Decentralized Environmental Notification Basic Service* » ; <http://www.etsi.org/news-events/news/851-2014-12-press-etsi-publishes-european-standards-for-intelligent-transport-systems>.

saut. Un nœud branche a en effet la capacité de retransmettre les messages à destinations d'un ensemble de nœuds : à ses nœuds feuilles ; au nœud branche situé en amont ; au nœud branche situé en aval ; à tous les nœuds branche (y compris ceux circulant dans la direction opposée).

Un **nœud feuille** est un nœud ordinaire qui établit un lien avec un nœud branche. Lorsqu'il ne détecte pas dans son voisinage un nœud branche, il élit comme nœud branche le nœud feuille de son voisinage dont la vitesse de déplacement est la plus faible et qui circule dans la même direction. Un nœud feuille ne transmet que les messages applicatifs dont il est à l'origine par diffusion à destination de son voisinage à un saut ou à son nœud branche.

Une **chaîne** est un réseau fédérateur (*backbone*) virtuel composé d'une séquence de nœuds branche. Idéalement, une chaîne est créée par direction de trafic routier. Les chaînes offrent ainsi aux nœuds branche du réseau de communication *ad hoc* des chemins pour transmettre les messages applicatifs sur des longues distances. Dans le contexte d'une route, c'est-à-dire d'une infrastructure linéaire, les chaînes se comportent comme un réseau virtuel similaire à celui qui peut être obtenu avec une infrastructure.

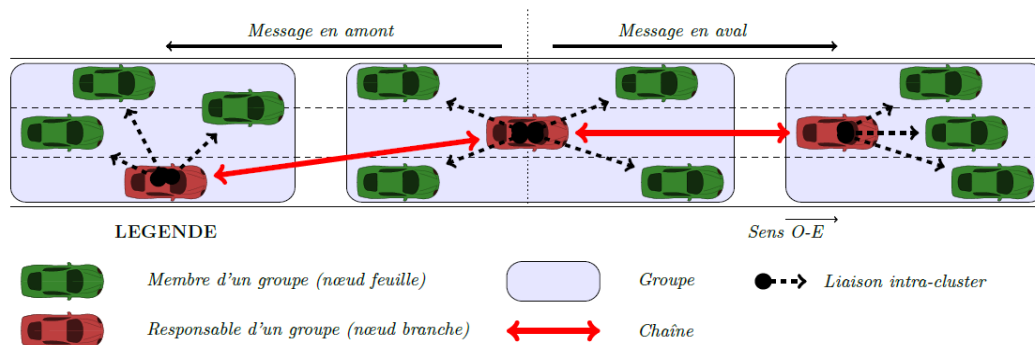


Figure 2. Illustration de la création d'une chaîne dans un cas autoroutier avec le concept d'envoi des messages en fonction du sens de circulation, en aval ou en amont du trafic

Dans la suite de notre présentation, nous supposons que chaque véhicule est équipé d'un système de localisation de type GPS et d'une interface de communication *ad hoc* sans fil de même technologie (par exemple une interface 802.11p). Cette dernière permet la communication entre véhicules dans la limite de la portée de transmission en visibilité directe.

3.2. Application de perception élargie

La perception élargie coopérative est une application de sécurité routière visant à augmenter la perception de l'environnement autour des véhicules. Grâce à l'échange coopératif des positions et des vitesses des objets perçus par les capteurs d'un véhicule, les véhicules voisins peuvent améliorer leur perception de l'environnement. La note d'orientations stratégiques pour l'action publique sur le développement des véhicules autonomes⁵ explique l'intérêt de cette application ainsi :

« Les véhicules automatisés se repèrent en croisant une perception de l'environnement (signalisation horizontale, dispositifs de retenue, signalisation verticale) par des capteurs natifs (caméras, radars, lidars) et un repérage satellitaire lié à une cartographie embarquée. Les capteurs actuellement ont une portée maximale de 100 à 200 m, ce qui paraît insuffisant

⁵ IDRAC Anne-Marie. « Développement des véhicules autonomes - orientations stratégiques pour l'action publique ». *Technical report*, Ministère de la transition écologique et solidaire, 2018.

pour l'anticipation de certaines situations ou certains événements critiques affectant la sécurité routière. Pour élargir et affiner l'horizon de perception du véhicule, des compléments permettent d'enrichir le modèle de perception et d'asseoir dans un premier temps, des procédures d'alerte du conducteur et des demandes de reprise en main. Ultérieurement, il est envisageable, selon la qualité (latence, fiabilité, précision) de ces données, que l'asservissement du véhicule s'appuie aussi sur ces compléments, permettant alors d'aborder ces situations ou événements critiques en mode automatisé. »

De cet éclairage, nous retenons qu'un véhicule acquerra une connaissance de son environnement :

- par construction locale de cette connaissance, au moyen de ses systèmes embarqués, notamment de ses capteurs de perception extéroceptifs et d'une cartographie embarquée ;
- par un accès aux connaissances distribuées de cet environnement, par exemple, parmi les véhicules de son voisinage, connaissances accessibles par le biais de ses systèmes de communication *ad hoc*. Ces derniers lui permettront en effet de recevoir les informations de son environnement à portée radio de communication.

L'application de perception élargie coopérative distribuée permet à chaque véhicule qui y participe de construire sa carte locale dynamique en prenant en compte les informations reçues des véhicules de son voisinage, informations relatives aux propres cartes locales de ces véhicules, en plus de la connaissance acquise localement par fusion des données de ses systèmes de perception embarqués. Une carte locale contient les informations actualisées des positions de l'ensemble des objets connus, dynamiques ou statiques, que rencontrent le véhicule durant son parcours.



Figure 3 : Concept de carte étendue

L'article de (Gunther, *et al.* ; 2015)⁶ étudie par simulation l'apport d'une perception élargie coopérative et distribuée, appelée perception collective, comparativement à une seule perception locale obtenue à l'aide des capteurs de perception embarqués. Cette étude est réalisée en fonction du taux de pénétration des systèmes V2X (*Vehicle-to-X*, où X peut être un véhicule ou l'infrastructure par exemple) dans un réseau routier de dimension 2607×3010 m². Elle suppose des véhicules équipés de radars permettant une perception de l'environnement, à l'avant et l'arrière du véhicule, sur une distance de 80 m et une ouverture angulaire de 60 deg., ainsi que de systèmes de communication V2X de portée radio fixe de 300 m de rayon. Elle considère aussi que ces véhicules ont la faculté de transmettre par diffusion périodique des messages CAM contenant leur position et leur état dynamique à leur voisinage ou encore de transmettre des messages propriétaires EPM (*Environmental Perception Message*) contenant

⁶ Hendrik-jorn Gunther, Oliver Trauer, and Lars Wolf. « The potential of collective perception in vehicular ad hoc networks ». *The 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST 2015)*, pages 1-5, IEEE, 2015.

l'identificateur unique des véhicules que les systèmes du véhicule transmetteur perçoivent. (Gunther, *et al.*) montrent alors qu'une perception locale enrichie des informations des seuls messages périodiques CAM suffisent à la construction des cartes locales dynamiques si tous les véhicules du réseau routier sont équipés. Par contre, pour un taux de pénétration inférieur à 100%, notamment s'il est faible (autour de 20%), la dissémination de messages EPM augmente la probabilité de la connaissance d'obstacles situés en dehors de la zone de perception ; cette probabilité croît avec le taux de pénétration. Ainsi, cette étude montre qu'un véhicule ne détectera que 20% des véhicules de son voisinage avec ses deux seuls radars. Mais, dans l'hypothèse d'un taux de pénétration de 40% des systèmes V2X, il détectera 60% d'obstacles avec l'ajout des messages de perception EPM et 80% en tenant aussi compte des messages de position CAM. L'application de perception élargie coopérative distribuée permettra donc une meilleure détection des obstacles par complémentarité et redondance des sources d'information, améliorant notamment la détection d'objets non communicants, mais aussi en donnant la possibilité de concevoir des boucles de sécurité.

3.3. Mise en œuvre de l'application de perception élargie sur CBL

L'application de perception élargie a été modélisée au-dessus de la version de l'algorithme d'auto-organisation CBL des communications V2V, de sorte à utiliser ses services de communication en voisinage proche et lointain.

Nous avons adopté l'hypothèse de (Gunther, *et al.* ; 2015)⁶ selon laquelle la perception élargie collaborative reposera sur la mise en œuvre de deux types de messages : des messages périodiques CAM et des messages propriétaires EPM. Cependant, la construction de la structure CBL repose sur la transmission périodique par les véhicules de messages véhiculant notamment leurs informations de positions et d'états dynamiques. Ces messages sont appelés messages HELLO dans notre implantation de CBL^{1,2} dans le protocole de routage OLSR⁷ (voir section 4.2 et nos précédents articles^{1,2}). Ils pourraient toutefois être mis en œuvre par l'intermédiaire de messages CAM, moyennant l'intégration du contenu nécessaire au fonctionnement de l'algorithme CBL et sous réserve qu'ils soient définis périodiquement. Le trafic généré par ces messages est expliqué dans l'article². Aussi, il ne fait pas l'objet de cette présentation. Par contre, nous définissons ici les messages propriétaires EPM en nous appuyant sur les définitions des données « objets », dynamiques et statiques, spécifiés dans (Chaabouni, *et al.* ; 2016)⁸ :

- les objets dynamiques nécessitent 24 octets par objet, pour le codage de leur date, position, vitesse, accélération et taille ;
- les objets statiques ont une taille de 18 octets chacun dédiés au codage de leur date, position et taille.

Un message EPM d'un véhicule comporte autant d'objets dynamiques et statiques que le véhicule en détecte (voir section 4.2).

L'application de perception élargie suppose que chaque véhicule transfère les informations de position et de cinématique des objets détectées à ses voisins. Ces derniers les fusionnent alors avec leurs propres données et les intègrent à leur carte locale. Pour accroître la distance de perception, les informations sur les objets des cartes locales peuvent être propagées en aval ou en amont du trafic routier à plus d'un saut de communication selon les besoins des applications de conduites. Cependant, un partage et une propagation systématique non contrôlée de

⁷ T. Clausen et al. (2003). « Optimized link state routing protocol (OLSR) », IETF, no. RFC 3626, 2003.

⁸ Nader Chaabouni, Abdelhakim Senhaji Had, Jihene Rezugui, and Soumaya Cherkaoui. « Setting up an extended perception in a vehicular network environment: A proof of concept ». In Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2016 IEEE, pages 1-7. IEEE, 2016.

l'ensemble des objets des cartes locales engendrera un effondrement des ressources limitées du réseau. De plus, notre objectif de modélisation de l'application de perception est d'évaluer les délais de transmission et les taux de réception des paquets de données pour ce type d'application. Pour réaliser ces mesures, il est nécessaire de tracer les flux des paquets transmis. Ceci se fait en diffusant les données à l'attention de sous-ensembles identifiés de nœuds de communication.

C'est pourquoi nous avons opté pour le scénario de simulation suivant qui, d'une part, spécifie la destination des messages EPM et, d'autre part, limite aux nœuds branche l'autorisation de partager et propager le contenu de leur carte locale :

- les nœuds feuille de CBL transmettent, à destination de leur nœud branche relais, leurs messages EPM contenant les informations sur les objets (statiques et dynamiques) qu'ils ont détecté au moyen de leurs propres capteurs ;
- les nœuds branche, après fusion de ces informations avec les informations de leur propre carte locale, transmettent à leurs nœuds feuille et au nœud branche en amont de la chaîne, leurs messages EPM contenant l'ensemble des informations sur les objets de leur carte local. Ces nœuds branche permettent ainsi l'extension « de la perception avant » des nœuds situés à l'arrière et dans leur voisinage.

4. Évaluation de performances et interprétations

Dans cette section, nous présentons, tout d'abord, le trafic routier modélisé, puis le « système réseau » modélisé, enfin, l'analyse des résultats obtenus.

4.1. Route et trafic routier simulés

Nous avons modélisé les trajectoires de véhicules circulant sur une section de 10 km de l'autoroute A27, à deux fois deux voies, qui relie la ville française Lille à la Belgique (figure 4), en exploitant l'enregistrement des données du trafic routier réalisé par la Direction interdépartementale des routes du Nord (DIRN) le 6 avril 2017.

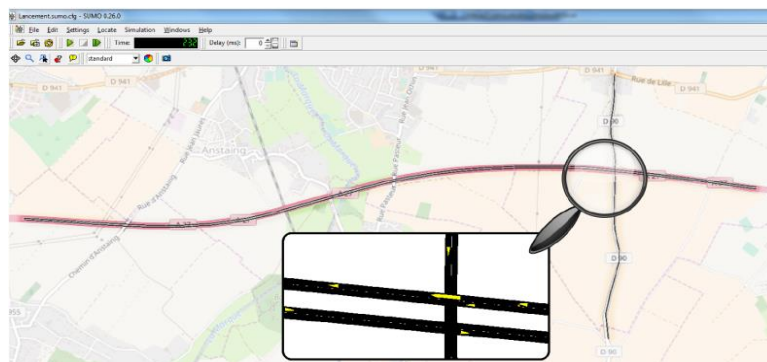


Figure 4 : Modélisation SUMO du réseau routier constitué de l'autoroute A27 à deux fois deux voies (route horizontale) et de la route à deux voies à sens unique D90 (route verticale).

Les données de trafic de la DIRN, présentées en figure 5, ont été mesurées par des boucles électromagnétiques placées à l'intérieur de la chaussée.

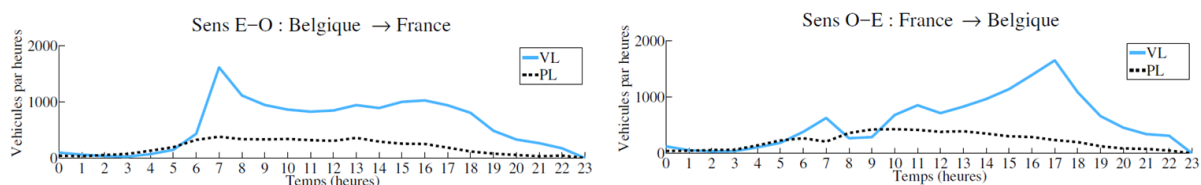


Figure 5. Densité de véhicules sur l'autoroute A27 le 6 avril 2017, obtenue à partir de boucles électromagnétiques placées sous la chaussée en fonction du type de véhicule

Ces données ont été transformées en trajectoire de véhicules au moyen du simulateur de trafic routier SUMO⁹ en utilisant le modèle de poursuite paramétré par défaut. Ce modèle est une variante du modèle Krauß : chaque véhicule circule jusqu'à sa vitesse désirée, tout en maintenant une distance de sécurité parfaite avec le véhicule leader. La limite de vitesse est fixée à 130 km/h, ce qui correspond à la limite légale de vitesse sur les autoroutes en France. Nous avons défini deux types de véhicules : les voitures et les poids lourds. Ces véhicules sont modélisés par un ensemble de paramètres dont les valeurs sont résumées dans le tableau suivant.

Symbole	Description	Unité	Valeur pour les voitures	Valeur pour les camions
<i>Acc</i>	Capacité d'accélération des véhicules	m/s ²	2	1
<i>Dcc</i>	Capacité de décélération des véhicules	m/s ²	3	2
<i>L</i>	Longueur du véhicule	m	5	15
σ	Imperfection du pilote	[0 ; 1]	0,5	0,5
τ	Temps minimum désiré par le conducteur	s	1	1
<i>MinGap</i>	Interdistance entre deux véhicules à l'arrêt	m	2,5	5
<i>MaxSpeed</i>	Vitesse maximale du véhicule	Km/h	150	130
<i>SpeedFactor</i>	Coefficient multiplicateur de limite de vitesse	-	1	0,84
<i>SpeedDev</i>	Écart-type du <i>speedFactor</i>	-	0,1	0,1

4.2. Système réseau simulé

Le simulateur de protocoles de communication à événements discrets OPNET Riverbed Modeler a été utilisé pour simuler le système. Le système modélisé est un réseau *ad hoc* de véhicules équipés de cartes IEEE 802.11p configurées avec un débit de 12 Mbps. La puissance de transmission est réglée sur 0,005 W et la sensibilité du récepteur sur -95 dBm afin d'obtenir une portée de communication de 500 m conforme à une communication de type IEEE 802.11p.

Les modules d'interfaces 802.11p et du protocole OLSR utilisés sont ceux modélisés par OPNET Riverbed Modeler. Le protocole de *clustering* CBL a été implanté par nos soins en modifiant une copie de cette modélisation d'OLSR. En outre, une trajectoire différente a été affectée à chaque nœud mobile du réseau, trajectoire provenant de celles reconstruites sous SUMO puis converties au format accepté par le simulateur OPNET. Les simulations sont exécutées durant 300 s, mais les statistiques ne sont enregistrées qu'à partir de 200 s.

⁹ S. R. Santana, J. J. Sanchez-Medina, and E. Rubio-Royo (2015). « How to Simulate Traffic with SUMO », in *Computer Aided Systems Theory*, EUROCAST'2015. Springer International Publishing, 2015, vol. 9520, pp. 773–778.

La taille des messages EPM d'un nœud feuille est ainsi estimée lors de la simulation : 1. Chaque nœud calcule le nombre de nœuds voisins dont il a connaissance dans un rayon de 100 m (portée radar) et multiplie cette valeur par 24 octets (taille des données nécessaires à la représentation d'un objet dynamique); 2. Il ajoute à la valeur obtenue en 1. la quantité de données représentant les objets statiques, soit 18 octets (taille d'un objet statique) multipliée par une valeur aléatoire comprise entre 0 et 10.

La taille des messages EPM transmis par les nœuds branche est calculée en prenant pour hypothèse que le nombre d'objets contenus dans une carte dynamique (obtenue grâce à l'échange d'EPM) est d'environ le double de ceux directement perçus (par un moyen radar par exemple), comme cela a pu être établi dans certains travaux tels que (Gunther, *et al.*)⁶. Ainsi, la taille des messages EPM d'un nœud branche est équivalente à deux fois celle calculée selon la procédure décrite précédemment pour les nœuds feuille.

Nous avons fait varier la fréquence d'envoi des messages applicatifs EPM de 2 Hz à 20 Hz avec un pas de 2 Hz (soit un intervalle d'attente entre deux messages de 50 ms à 500 ms). À chaque pas d'échantillonnage de 2 Hz, la simulation est exécutée 10 fois afin d'obtenir une valeur différente du générateur de nombre aléatoire du logiciel OPNET et d'éviter ainsi qu'une configuration particulière du réseau ne soit privilégiée.

4.3. Résultats et analyse

La figure 6 présente le délai de transmission de bout en bout d'une trame en ms (délai WLAN) en fonction de l'intervalle de temps entre deux émissions de messages applicatifs, et la figure 7 le délai d'accès au médium. Le délai WLAN diminue lorsque l'intervalle de temps augmente : il est de 0,5 ms pour un intervalle de 50 ms et de 0,1 ms pour un intervalle 500 ms. Sa valeur minimale est de 0,2 ms. Ses valeurs maximales varient et ne sont représentatives que d'une situation particulière : ces points maximums se situent en effet bien au-delà de la zone bleu clair représentant 99% des valeurs de délai.

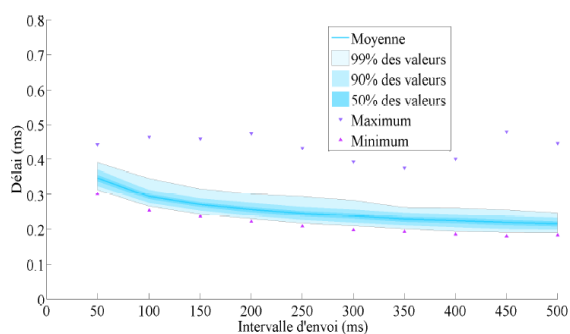


Figure 6. Délai WLAN

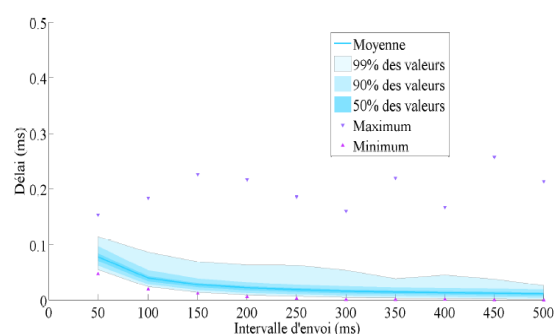


Figure 7. Délai d'accès au médium

La figure 8 montre que le taux de paquets applicatifs délivrés augmente avec l'intervalle d'envoi. Toujours supérieur à 88 %, il est en moyenne égal à 91 % pour un intervalle de temps entre deux messages applicatifs supérieur à 350 ms. Par contre, le délai IP de bout en bout du réseau (délai applicatif), figure 9, diminue avec l'augmentation de l'intervalle d'envoi. En effet, l'augmentation de l'intervalle d'envoi réduit le nombre de transmission de messages applicatifs et donc libère de la bande passante, d'une part, et le nombre moindre, qui en résulte, de tentatives d'accès au médium de chaque nœud réduit le risque de collisions et donc de perte de paquets, d'autre part.

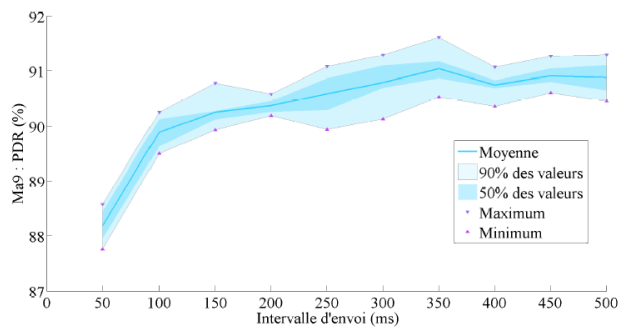


Figure 8. Taux de paquets reçus

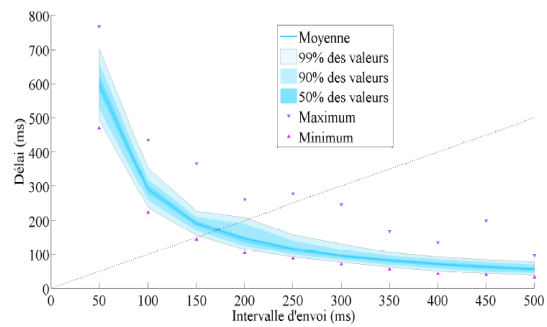


Figure 9. Délai applicatif

Les délais sont toujours inférieurs à 600 ms. L'intervalle minimal d'attente entre deux paquets applicatifs pour lequel le délai moyen de bout en bout du réseau est inférieur à cet intervalle, est déterminé à l'aide de la droite de la fonction identité (ligne en pointillée, figure 9). Cet intervalle est de 175 ms. Par conséquent, les paquets des messages applicatifs EPM émis toutes les 175 ms sont reçus avant la fin de la fenêtre temporelle de 175 ms, c'est-à-dire avant l'envoi d'un nouveau message.

5 – Conclusion et perspectives

Dans ces travaux, nous avons modélisé une application coopérative de perception élargie qui exploite les services de communication offerts par CBL. En particulier, nous avons limité la charge de cette application sur le médium en autorisant uniquement les nœuds branche à partager leur carte locale dynamique au-delà d'un saut. Nous avons montré que le réseau VANET modélisé supporte la charge apportée par le trafic applicatif de la perception élargie à partir d'une périodicité de transmission des messages applicatifs d'un nœud de 175 ms. Lorsque la durée de cet intervalle est réduite, le taux de paquets reçus devient inférieur à 90% et les délais de bout en bout peuvent atteindre des valeurs supérieures à la fréquence d'envoi. Les résultats de l'application de perception élargie sont prometteurs. Ils montrent qu'il est possible d'obtenir des délais et taux de pertes faibles selon un compromis voulu entre fréquence de messages et performances.

Une nouvelle version de CBL pour le milieu urbain est envisagée ainsi que l'étude de performances de CBL avec d'autres applications des STI. Une autre l'étude sera celle d'une architecture hybride V2V et V2I avec la structure CBL. Dans ce cas, les UBRs déployées le long des voies routières serviront de relais et, en l'absence de bornes, la structure CBL continuera de fonctionner tel que nous l'avons définie.

Remerciements :

Les auteurs remercient l'IFSTTAR et le projet ELSAT2020 pour leur soutien financier, enfin la Direction interdépartementale des routes du Nord qui a mis à notre disposition les données de trafic de l'A27. Le projet ELSAT 2020 est cofinancé par l'Union Européenne avec le Fonds européen de développement régional, par l'État et la Région Hauts de France.

Brève biographie des auteurs :



Dr. Lucas Rivoirard a obtenu le titre d'Ingénieur en génie des transports et de la mobilité de l'École nationale des travaux publics de l'État en 2015 et un Master recherche à l'INSA de Lyon. Il a travaillé trois ans à l'IFSTTAR sur la problématique des réseaux *ad hoc* véhicule-véhicule et y a préparé le doctorat en informatique de l'Université de Lille, obtenu en septembre 2018. Il a rejoint le Cerema au 1er octobre 2018 en tant que chef de projet stratégie d'exploitation et ingénierie du trafic.



Dr. Martine Wahl a obtenu le diplôme d'Ingénieur en électronique de Polytech Paris-Sud (anciennement FIUPSO) en 1991 et le doctorat de l'Institut polytechnique de Grenoble en 1997. Elle a rejoint l'IFSTTAR en tant que chercheur en 1998. Son domaine de recherche concerne les protocoles de communications de systèmes de communication, filaires (de type réseaux de terrains ou embarqués) et sans fil, en particulier pour les transports terrestres.



Dr Patrick Sondi a obtenu son doctorat en informatique en 2010 à l'Université de Valenciennes. Il a rejoint l'Université de Littoral et Côte d'Opale en tant que Maître de conférences en 2013. Ses domaines de recherche comprennent l'ingénierie des protocoles, la qualité du service, la sécurité et les simulations de réseaux sans fil, en particulier leur application dans les systèmes de transport.