

Densité de trafic émergente pour des véhicules intelligents communicants guidés par heuristique

Philippe Morignot, Oyunchimeg Shagdar, Fawzi Nashashibi

► **To cite this version:**

Philippe Morignot, Oyunchimeg Shagdar, Fawzi Nashashibi. Densité de trafic émergente pour des véhicules intelligents communicants guidés par heuristique. Applications Pratiques de l'Intelligence Artificielle, Jun 2015, Rennes, France. hal-01168090

HAL Id: hal-01168090

<https://hal.inria.fr/hal-01168090>

Submitted on 29 Jun 2015

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.

Densité de trafic émergente pour des véhicules intelligents communicants guidés par heuristique

Philippe Morignot¹, Oyunchimeg Shagdar^{1,2}, Fawzi Nashashibi¹

¹ INRIA, équipe-projet RITS, Domaine de Voluceau, B.P. 105, 78150 Le Chesnay, France
prenom.nom@inria.fr

² VEDECOM, 77, rue des Chantiers, 78000 Versailles, France

Résumé : Dans cet article, nous étudions la densité et le comportement émergent du trafic, composé de plusieurs centaines de véhicules intelligents, en fonction de la communication véhicule-à-véhicule (V2V) (pour qu'un véhicule perçoive le trafic) et d'heuristiques de planification de chemin dynamique (pour qu'un véhicule atteigne sa destination) en environnement urbain. Les modes de communication idéale / réaliste / aucune sont croisés avec les heuristiques boussole / vers-plus-peuplé / vers-moins-peuplé pour mesurer la vitesse moyenne de trajet de chaque véhicule, modélisé par un automate à états finis. Le modèle de communication V2V, basé sur des modèles de propagation de signal et sur MAC (*medium access control*), est présenté. Nos expériences, des simulations comprenant jusqu'à 400 véhicules en environnement urbain réaliste, montrent que la communication et les heuristiques conduisent à une meilleure vitesse moyenne globale qu'une absence de communication ; et que, à chaque fois qu'il y a un chemin secondaire, fuir le trafic conduit à des performances globales meilleures que suivre le trafic.

Mots-clés : Véhicules intelligents, Systèmes Multi-Agents, Communication.

1 Introduction

La conduite coopérative automatisée fait l'objet de nombreux travaux de recherche dans des domaines scientifiques comme la robotique, l'intelligence artificielle, les systèmes multi agents et la communication. Le but est d'obtenir une conduite collective à la fois sûre et intelligente. Si des études montrent le potentiel des communications V2V (véhicule-à-véhicule) pour une conduite automatisée plus sûre et plus souple (Sakaguchi *et al.* (1999), Bento *et al.* (2012), Xu *et al.* (2002)), il n'est pas encore clair de savoir si les technologies de standardisation peuvent intégrer les strictes demandes de la conduite automatisée. De plus, si la décision dans le contrôle de véhicules individuels est basée sur les communications V2V, la performance de ces communications devrait beaucoup influencer la "qualité" du comportement collectif. Plus encore, puisque les décisions liées à la planification de chemin influent sur la densité de trafic, elles influent donc sur la performance des communications sans fil. A notre connaissance, l'interdépendance entre communication et comportement de véhicules automatisés est encore peu explorée.

Xu *et al.* (2002) ont étudié comment le taux de pénétration de la communication améliore l'effort de freinage de véhicules individuels. Sakaguchi *et al.* (1999) ont défini un protocole de communications entre et à l'intérieur de pelotons de véhicules pour le contrôle sécuritaire des pelotons. Mehani & de La Fortelle (2007) définissent des échanges de messages de haut niveau entre véhicules et superviseur (l'infrastructure), qui sont requis pour la planification de trajectoire sur des routes qui se croisent.

Populaire *et al.* (1993) et Briot & Demazeau (2001) ont étudié la communication sous le paradigme des systèmes multi agents, mais définissent des protocoles de communication pour le langage naturel en soi (*les actes de langage*) et ignorent l'émission / réception physique de messages.

Dans cet article, nous combinons différents modes de communication V2V avec différentes heuristiques de planification de chemin dynamique, sur une population de plusieurs centaines

de véhicules intelligents, pour observer une éventuelle convergence (émergence ou phénomène global non prévu par chaque agent individuel) vers un trafic fluide. Pour étudier l'influence de la communication sur la qualité du comportement collectif, des modèles de communication V2V, particulièrement un modèle de propagation signal et un modèle MAC (Medium Access Control), sont utilisés.

La section suivante présente notre modèle et la section 3 présente nos résultats expérimentaux ; la dernière section résume notre contribution.

2 Modèle

2.1 Environnement

Nous considérons un environnement urbain avec des rues orientées exclusivement nord-sud et est-ouest (type quartier de Manhattan). Les rues perpendiculaires se croisent aux intersections ; les rues parallèles sont séparées par la même distance. Pour ne pas limiter le mouvement des véhicules, nous supposons que les rues bouclent aux bordures de l'environnement (environnement circulaire), i.e., l'extrémité la plus à droite (resp. en haut) d'une rue est-ouest (resp. nord-sud) rejoint son extrémité gauche (resp. en bas). Une rue est composée de deux voies, droite et gauche ; les véhicules circulent sur la voie de droite (conduite nord-américaine). Les feux de croisement sont modélisés aux 4 voies entrantes de chaque intersection, 2 par 2, tous avec la même phase (pas d'onde verte).

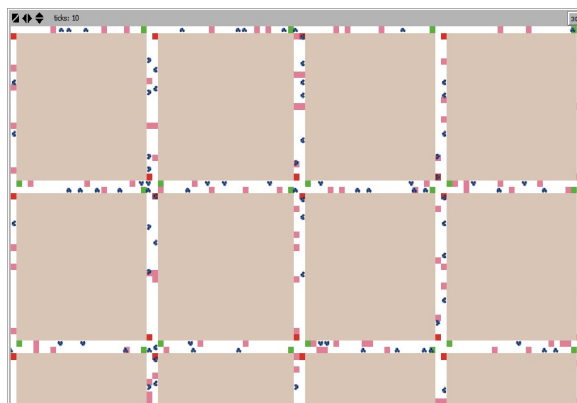


FIGURE 1 – Topologie de l'environnement : les véhicules intelligents (icônes bleues) circulent sur la voie de droite des rues (pixels blancs) jusqu'à une destination (pixels roses), chaque croisement possède un feu de signalisation par voie entrante (pixels verts / rouges).

2.2 Véhicules intelligents

2.2.1 Automate à états finis

Le comportement de chaque véhicule intelligent est modélisé par un automate à états finis (une boucle sur 5 états séquentiels) :

1. Aller tout droit sur sa voie, et accélérer (augmenter la vitesse de 1 pixel/tic par tic) jusqu'à la vitesse limite (identique pour tous les véhicules), ou freiner à cause d'autres véhicules (évitement d'obstacles) ou de feux rouges (respect du code de la route) ;
2. Si un véhicule intelligent atteint un croisement, communication possible avec les autres véhicules dans les 4 directions (N / S / E / O) pour déterminer les véhicules perçus ;

3. Choisir une direction de sortie parmi les 4 possibles (N / S / E / O) ;
4. Suivre un plan de 1- à 4-étapes (voir 2.2.2) pour aller à cette sortie, en évitant une collision avec d'autres véhicules à ce croisement ;
5. Aller à l'état 1, jusqu'à ce que le temps limite (fin de simulation) soit écoulé.

Un véhicule intelligent reste sur une voie (état 1) sans dépasser, i.e., nous supposons qu'il y a une ligne continue au milieu de chaque rue.

Quand un véhicule intelligent a atteint sa destination (état 1), une nouvelle destination aléatoire lui est assignée (tout point sur une voie qui n'est pas à un croisement), pour que les voitures roulent constamment.

2.2.2 Croisement

Les véhicules intelligents suivent un plan de 1- à 4- étapes pour traverser un croisement et atteindre la voie de sortie qu'ils ont choisi par heuristique (état 4 de l'automate précédent). Les rues sont composées de deux voies et les véhicules circulent sur la voie de droite d'une rue, ce qui conduit à 4 pixels par croisement, notés de 1 à 4 (voir Fig. 2). Si un véhicule, $V1$, doit faire un virage à droite, il va tout droit jusqu'au pixel 1, puis fait un virage à droite, puis va tout droit (plan en 1 étape) ; Si $V1$ doit aller tout droit au croisement, il va tout droit jusqu'au pixel 1, puis jusqu'au pixel 2, puis va tout droit (plan en 2 étapes) ; Si $V1$ doit faire un virage à gauche, il va tout droit jusqu'au pixel 1, puis jusqu'au pixel 2, puis fait un virage à gauche jusqu'au pixel 3, puis va tout droit (plan en 3 étapes) ; Si $V1$ doit faire demi-tour, il va tout droit jusqu'au pixel 1, puis jusqu'au pixel 2, puis fait un virage à gauche au pixel 3, puis fait un second virage à gauche au pixel 4, puis va tout droit (plan en 4 étapes).

Chaque changement de direction, pour un virage à droite ou à gauche, est réalisé en additionnant / retranchant 90 degrés à la direction courante du véhicule (voir e.g. Au & Stone (2010) pour des modèles de trajectoire plus précis).

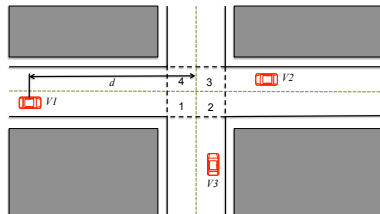


FIGURE 2 – 4 pixels à un croisement, notés de 1 à 4, pour un plan jusqu'à 4 étapes pour la traversée d'un croisement. Les 3 autres cas (N / S / O) peuvent être obtenus par rotation.

Les mêmes règles qu'en 2.2.1 sur l'accélération / freinage sont valables pour la traversée d'un croisement : ceci est suffisant pour assurer un évitement d'obstacle, et donc la sécurité pendant cette phase. Par exemple, nous avons observé que des véhicules ayant choisi de faire un virage à gauche à un croisement, attendent sur leur pixel 2, dans le plan en 3 étapes précédent, que d'autres véhicules passent sur la voie opposée, avant d'aller tout droit à leur pixel 3 lorsque plus aucun véhicule ne passe, et ensuite aller tout droit vers leur voie de sortie.

2.2.3 Heuristiques

A un croisement (état 4 de l'automate en 2.2.1), chaque véhicule intelligent peut toujours choisir entre 4 directions : à droite, tout droit, à gauche et derrière (le véhicule fait demi-tour). Juste avant d'entrer dans un croisement, chaque véhicule intelligent utilise une heuristique,

identique pour tous les véhicules, pour choisir une des 4 sorties du croisement menant à sa prochaine voie.

Boussole. Le véhicule intelligent est supposé équipé d'un capteur GPS, qui permet de déterminer une ligne droite (vol d'oiseau) entre sa position courante et sa destination. Cette heuristique choisit l'angle le plus petit en valeur absolue entre la direction d'une voie de sortie N / S / E / O et cette droite idéale, implémentant ainsi le chemin le plus court. Aucune communication V2V n'est nécessaire.

Vers le moins peuplé ("Anti Fourmi"). Comme avant, les 4 angles en valeur absolue formés par les 4 directions de sortie avec le droite idéale sont calculés. Si l'angle le plus petit correspond au chemin le plus court (voir heuristique précédente), le deuxième plus petit angle pourrait aussi conduire le véhicule à sa destination, e.g., aller tout droit et prendre un virage à droite est presque équivalent à faire un virage à droite puis faire un virage à gauche — le chemin est seulement un peu plus long. Pour choisir entre ces 2 angles, le véhicule effectue une communication V2V pour percevoir le nombre d'autres voitures dans chacune de ces deux directions. Si un des 2 angles possède un trafic strictement inférieure à l'autre, cet angle-là est choisi (ce peut donc être le deuxième) : cette heuristique cherche ainsi à éviter le trafic. Sinon (trafic identique pour les 2 angles), le premier meilleur angle est choisi (heuristique Boussole).

Vers le plus peuplé ("Fourmi"). Cette heuristique, proche dans l'esprit des algorithmes d'optimisation par colonie de fourmis Dorigo & Stützle (2004), est identique à la précédente sauf sur le choix entre les deux meilleurs angles : si un des 2 meilleurs angles possède un trafic strictement inférieur à l'autre, le *deuxième* meilleur angle est choisi. Cette heuristique, l'opposée de la précédente (un test est inversé), choisit l'angle le plus peuplé entre ces deux meilleurs angles.

Cependant, lorsque les deux dernières heuristiques choisissent le deuxième meilleur angle plusieurs fois de suite, cela peut conduire les véhicules à dévier "trop" de leur chemin vers leur destination et de la rater. Aussi, lorsqu'un véhicule est "assez proche" (e.g., un paté de maison) de sa destination, il bascule de l'heuristique "Fourmi" ou "Anti Fourmi" à l'heuristique "Boussole". Cette zone d'attraction de la destination force l'heuristique "Boussole" vers la fin du chemin d'un véhicule.

2.3 Communication V2V

2.3.1 Propagation du signal en environnements urbains

En raison de sa simplicité, le modèle two-ray ground (TRG) est couramment utilisé pour l'environnement LOS (Line of Sight). Nous étudions l'applicabilité de TRG à un scénario d'intersection de route en comparant les modèles aux résultats du modèle de lancer de rayon pour le système IEEE 802.11p pour la bande de fréquence 10 MHz et le puissance de transmission 20 dBm Bib (2010). TRG calcule la qualité du signal en utilisant un modèle d'espace libre pour les distances proches et un modèle à 2 rayons pour les distances lointaines :

$$L_{trg}[dB] = \begin{cases} L_{fs} = 20 \log_{10}(4\pi \frac{d}{\lambda}), & \text{si } d \leq d_c \\ L_{tr} = 20 \log_{10}(\frac{d^2}{h_t h_r}), & \text{sinon} \end{cases} \quad (1)$$

Ici, d est la distance entre l'émetteur et le récepteur, λ est la longueur d'onde, et h_t and h_r sont les hauteurs d'antenne du transmetteur et du récepteur, respectivement. d_c est l'étendue de la zone de Fresnel $d_c = 4\pi h_t h_r / \lambda$.

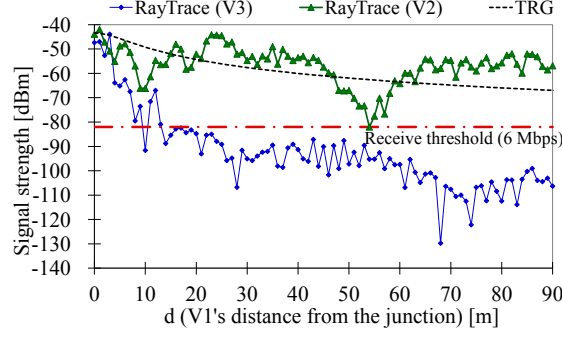


FIGURE 3 – Les puissances reçues à V2 et V3 de V1 sont calculées en utilisant les modèles ray-tracing et TRG.

Sur Fig. 3, l'estimation de lancer de rayon est faite pour un scénario de croisement de route en supposant que les bâtiments hauts sont à chaque coin (voir Fig. 2). Les puissances de réception aux noeuds V2 et V3, qui sont de 15 m et 30 m depuis l'intersection respectivement, sont calculées pour des signaux émis par V1. Comme montré sur la figure, V1 et V2 sont sur la même route, qui coupe celle de V3. Malgré le fait que 2 rayons seulement soient pris en compte, TRG peut estimer grossièrement la puissance du signal qui est sur la même route que le transmetteur (V2). La caractéristique de la puissance de réception à V3, d'un autre coté, baisse rapidement sous le seuil de réception de 6 Mbps de taux de codage (qui est le réglage typique pour des applications de sécurité) dès que la distance de V1 depuis la jonction est supérieure à 10 mètres, ce qui est dû à l'évidence à un blocage de signal. Nos résultats indiquent que la puissance du signal du récepteur peut être estimée par le modèle *TRG* pour des véhicules qui sont sur la même route que le transmetteur, et qu'il est difficile d'attendre des communications entre véhicules sur des routes qui se croisent, à moins que la distance à la jonction soit très petite.

2.3.2 Modèle MAC

L'ETSI a défini les trames CAM (*cooperative awareness message*) pour l'échange d'information périodique entre véhicules et infrastructure, ce qui permet aux usagers de la route de connaître l'existence et l'état d'un autre usager Bib (2009). Nous proposons que les trames CAM servent effectivement à des applications de planification de chemin. Cette sous section présente un modèle MAC simple pour caractériser la performance de transmission CAM entre véhicules. Comme nous considérons un seul type de trafic d'information et que les CAMs sont des paquets d'émission, il suffit d'exprimer le comportement du protocole par une chaîne de Markov à une dimension. Dans ce cas, la probabilité de réception réussie d'une trame CAM donnée à un récepteur donné est calculée comme

$$P_s = (1 - \tau)^{N-1}. \quad (2)$$

Où N est le nombre d'usagers et τ est la probabilité d'accès au canal, qui peut être formulé comme :

$$\tau = q \times \left[1 + \frac{W-1}{2(1-p_k)} \right]^{-1}. \quad (3)$$

Ici, W est la taille minimale de la fenêtre de contention, p_b est la probabilité du canal d'être occupé, et q est la probabilité d'un paquet en attente au noeud. Les détails du modèle Markov sont présentés dans Shagdar *et al.* (2013).

3 Expérimentations

Des expériences avec le modèle de la section 2 ont été réalisées en utilisant l'environnement logiciel NetLogo Wilensky (1999), un outil graphique de simulation multi agents — des expériences réelles avec des centaines de véhicules intelligents automatisés semblent impossibles de nos jours. La figure 1 illustre le scénario urbain lorsque la distance entre deux rues parallèles est supposée être de 200 mètres.

Nous avons mené des investigations sur les performances des comportements "Fourmi" et "Anti Fourmi", lorsque les véhicules 1) ne communiquent pas, 2) ont une information complète sur tous les autres véhicules (communication idéale, i.e., aucune erreur de communication), et 3) communiquent suivant la technologie IEEE 802.11p (communication réaliste). La communication "réaliste" est implémentée en suivant les modèles PHY (propagation de signal) et MAC introduits dans la section précédente. En appliquant le modèle TRG, nous obtenons une portée de transmission de 500 mètres et une portée de perception de 800 mètres pour les véhicules sur la même rue. Sans perdre beaucoup en généralité, nous supposons que les véhicules à un croisement sont dans la portée de transmission les uns des autres. Dans nos expériences, les véhicules individuels se comportent selon un automate à états finis (voir Section 2) et envoient des messages CAM (200 octets) toutes les 100 ms. La probabilité de succès pour un message CAM d'un véhicule donné est calculée pour les autres véhicules dans la portée de transmission selon le modèle MAC (Eqs. (3) – (2)).

Chaque point des figures 4 et 5 représente une simulation jusqu'au tic d'horloge 10 000.

3.1 Influence de la communication

La figure 4 (a) compare l'écart-type du nombre de véhicules sur des rues : dans la communication idéale, la stratégie "Fourmi" crée une distribution de véhicules extrêmement biaisée (e.g., la plupart des véhicules sont dans la même rue), alors que la stratégie "Anti Fourmi" montre un usage de la route plus équilibré. C'est prévisible parce que dans la stratégie "Fourmi", les véhicules sont attirés par les autres véhicules, et créent ainsi des routes encombrées. Au contraire, dans la stratégie "Anti Fourmi", les véhicules essaient de prendre des rues désertes, créant ainsi une situation où il n'y a ni route trop encombrée ni route déserte.

Pour la communication "réaliste", si l'écart-type est encore une fois plus grand pour "Fourmi" que pour "Anti Fourmi", la différence est petite, ce qui montre que les deux stratégies échouent à produire le comportement collectif espéré. Le comportement collectif peut être très différent du comportement "attendu" s'il y a des erreurs de communication.

La figure 4 (b) compare la probabilité de succès d'une communication réaliste pour les cas "Fourmi" et "Anti Fourmi" : la probabilité de succès se dégrade avec l'augmentation du nombre de véhicules (augmenter "N" dans Eq. (2) conduit à une dégradation de la probabilité de succès). Plus généralement, on s'attend à ce que, puisque le comportement "Fourmi" crée des routes encombrées, l'erreur de communication est plus importante dans le cas "Fourmi" que dans le cas "Anti Fourmi". Cependant, si la probabilité de succès est meilleure pour "Anti Fourmi", la différence est très petite, ce qui est expliqué par la figure. 4 (a). A cause des erreurs de communication, les stratégies "Fourmi" et "Anti Fourmi" ne produisent pas de comportements prévisibles, i.e., celui de la communication "idéale". La distribution des véhicules n'est pas trop biaisée pour le cas "Fourmi", donc "N" dans Eq. (2) n'est pas très différent pour les cas "Fourmi" et "Anti Fourmi".

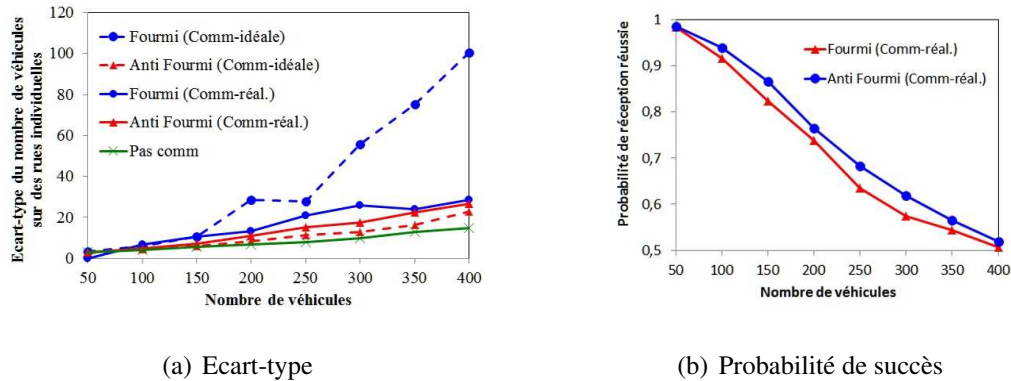


FIGURE 4 – (a) Comparaison de l'écart-type du nombre de véhicules sur les rues. (b) Probabilité de succès des trames CAM.

3.2 Comportements émergents

Pour chaque simulation et à chaque tic d'horloge, la moyenne de la vitesse instantanée vers la destination (mesurée en pixel / tic) de chaque véhicule est calculée. Cette vitesse, mise à jour à chaque fois qu'un véhicule atteint sa destination, est la distance manhattan (incluant l'environnement circulaire / bouclé) entre la destination précédente (ou le point de départ, au tic = 0) et la destination courante, divisé par le nombre de tics écoulés pour qu'un véhicule fasse le trajet d'une destination à l'autre.

Pour chaque simulation (chaque point de Fig. 5 (a) et (b)), une stabilisation de la vitesse-vers-destination vers une certaine valeur est observée, après une montée abrupte au début de la courbe, durant 2 à 3000 tics. Pour éviter cette augmentation et ne comparer que des valeurs stabilisées, nous traçons (i) la moyenne des valeurs sur les 6000 derniers tics parmi 10 000 (voir Fig. 5 (a)), ce qui laisse 4000 tics pour passer cette montée, et (ii) la dernière valeur (voir Fig. 5 (b)).

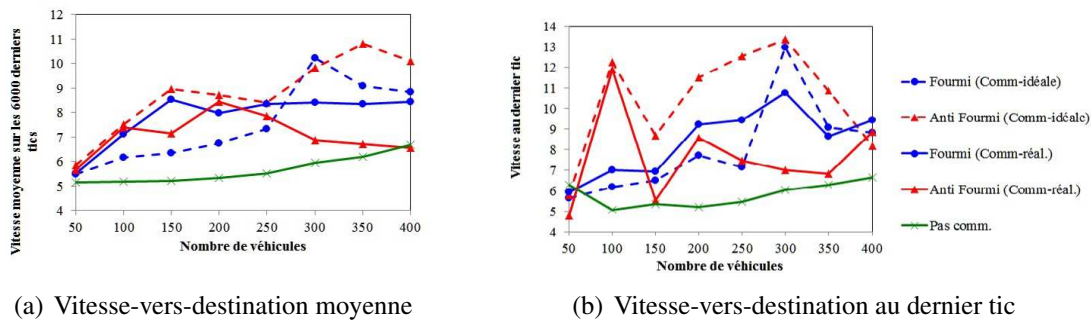


FIGURE 5 – (a) Moyenne sur les 6000 derniers tics d'horloge de la vitesse-vers-destination instantanée moyenne de chaque véhicule, en fonction du nombre de véhicules. (b) Dernière valeur (au tic = 10000) des mêmes mesures que dans (a).

Les figures 5 (a) et (b) suggèrent que : (1) L'influence de la communication est importante sur les performances du comportement émergent, i.e., "pas de communication" fournit la pire vitesse-vers-destination, des véhicules suivant aveuglément leur chemin vers leur destination sans communiquer est pire que toute autre heuristique de planification de chemin avec communication. (2) Lorsque la communication est idéale, le comportement "Anti Fourmi" est nettement meilleur que "Fourmi", i.e., lorsqu'il y a le choix, s'échapper du trafic conduit à de meilleures vitesses-vers-destination que suivre le trafic. (3) Lorsque la communication est réaliste, la différence entre les comportements "Anti Fourmi" et "Fourmi" est plus petite en comparaison de la communication idéale, mais l'heuristique "Fourmi" se comporte légèrement mieux

pour un grand nombre de voitures.

4 Conclusion

Dans cet article, nous avons étudié les performances du trafic émergent de plusieurs centaines de véhicules uniformes, en fonction des modes de communication V2V et d'heuristiques de planification dynamique de chemin en environnement urbain. Une implémentation du modèle suggère que la communication et les heuristiques conduisent à une meilleure vitesse moyenne émergente (i.e., un trafic global avec de meilleures performances) qu'une absence de communication (i.e., des véhicules ne faisant que suivre aveuglément leur boussole jusqu'à destination) ; et que fuir le trafic conduit à des performances globales meilleures que suivre le trafic.

Nos travaux futurs comprennent la différenciation des véhicules (rôle / groupe / agent) et une topologie différente pour l'environnement (e.g., rues courbes).

Références

- (2009). ETSI TR 102 638 ; Intelligent Transport Systems (ITS) ; Vehicular communications ; Basic set of Applications. Draft V1.0.4.
- (2010). IEEE Standard for Information technology — Telecommunications and information exchange between systems — Local and metropolitan area networks — Specific requirement, Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Std 802.11p-2010.
- AU T.-C. & STONE P. (2010). Motion planning algorithms for autonomous intersection management. In *Bridging the Gap Between Task and Motion Planning*.
- BENTO L. C., PARAFITA R. & NUNES U. (2012). Intelligent traffic management at intersections supported by v2v and v2i communications. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2012 15th International IEEE Conference on*, p. 1495–1502 : IEEE.
- J.-P. BRIOT & Y. DEMAZEAU, Eds. (2001). *Principes et Architecture des Systèmes Multi-Agents*. Traité IC2, Hermès.
- DORIGO M. & STÜTZLE T. (2004). *Ant Colony Optimization*. MIT Press.
- MEHANI O. & DE LA FORTELLE A. (2007). Trajectory planning in a crossroads for a fleet of driverless vehicles. In *Computer Aided Systems Theory—EUROCAST 2007*, p. 1159–1166. Springer.
- POPULAIRE P., DEMAZEAU Y., BOISSIER O. & SICHMAN J. (1993). Description et implémentation de protocoles de communication en univers multi-agents. *Ieres Journées Francophones sur l'IAD et les SMA, AFCET & AFIA, Toulouse, IRIT*.
- SAKAGUCHI T., UNO A. & TSUGAWA S. (1999). Inter-vehicle communications for merging control. In *Vehicle Electronics Conference, 1999.(IVEC'99) Proceedings of the IEEE International*, p. 365–370 : IEEE.
- SHAGDAR O., DANIEL A. & PRIMAK S. (2013). Beacon delivery over practical v2x channels. In *ITS Telecommunications (ITST), 2013 13th International Conference on*, p. 68–73 : IEEE.
- WILENSKY U. (1999). NetLogo, available online at <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>. *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston*.
- XU Q., HEDRICK K., SENGUPTA R. & VANDERWERF J. (2002). Effects of vehicle-vehicle/roadside-vehicle communication on adaptive cruise controlled highway systems. In *Vehicular Technology Conference, 2002. Proceedings. VTC 2002-Fall. 2002 IEEE 56th*, volume 2, p. 1249–1253 : IEEE.