

Commande du Flux de Trafic par modèle inverse

Boumediene KAMEL, Amar BENASSER, Daniel JOLLY

Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois – LGI2A, E.A. 3926
Université d'Artois – Technoparc Futura, 62400 Béthune, France

kamel_boume2002@yahoo.fr, amar.benasser@univ-artois.fr, daniel.jolly@univ-artois.fr
<http://www.lgi2a.free.fr>

Résumé— La régulation d'accès a pour but de réduire la congestion qui pourrait survenir sur la chaussée principale. En générale, elle consiste à maintenir sur la chaussée principale la densité en deçà d'une certaine densité. Nous proposons ici une régulation d'accès en boucle ouverte qui repose sur ce principe. La méthode employée est de tenter d'inverser le modèle afin de générer une commande qui donne la densité souhaitée. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de réduire le temps de parcours total des véhicules. Ces résultats sont comparés à ceux obtenus par la méthode ALINEA.

Mots-clés— Modèle de flux de trafic, METANET, contrôle d'accès, modèle inverse.

I. INTRODUCTION

L'augmentation croissante du trafic routier peut générer des congestions. Pour réduire ses effets, plusieurs solutions sont généralement proposées. Une première solution consiste à effectuer des travaux sur le réseau routier afin d'en augmenter la capacité ou de créer de nouveaux axes routiers. Une seconde solution consiste à développer les transports en communs et surtout à inciter les usagers à les emprunter en priorité. Enfin une dernière solution consiste à réguler directement le flux de trafic en agissant sur les feux de signalisation, les panneaux à messages variables, les accès aux rampes d'entrée, etc.

L'installation de nouvelles infrastructures est souvent très difficile et très coûteuse à mettre en œuvre, de même inciter les usagers à utiliser les transports en commun n'est pas chose aisée et peut être aussi long et coûteux. C'est ainsi que les études sur les stratégies de régulation du flux de trafic ont tendance à se développer d'avantage car elles ne nécessitent en général pas de réaliser des investissements importants et sont généralement rapides en mettre en œuvre. La conception et l'implémentation de stratégies de commande efficaces permettent d'annuler, de réduire, ou uniquement de retarder l'apparition de congestions. Elles nécessitent l'utilisation de modèles issus de la théorie de trafic.

Différents modèles de trafic existent selon la granularité avec laquelle le flux de véhicules est représenté. Il existe ainsi des approches de modélisation microscopiques [5], [1], mésoscopiques [4] et macroscopiques [11], [7], [10]. Les modèles microscopiques représentent chaque véhicule qui se trouve dans le réseau. Les modèles macroscopiques assimilent le trafic à l'écoulement d'un fluide dans un conduit. Les modèles mésoscopiques regroupent un ensemble de véhicules ayant les mêmes caractéristiques : ils ont donc un niveau de granularité intermédiaire en comparaison avec

les deux types de modèles précédents. Les modèles macroscopiques sont les plus appropriés pour une exploitation des lois de commandes. En effet, la complexité des modèles microscopiques et mésoscopiques rendent difficile une régulation en temps réel.

La commande du processus de trafic autoroutier est une tâche très compliquée qui peut reposer sur plusieurs actions telles que, le contrôle d'accès, le routage et le guidage automatique, la limitation dynamique de la vitesse, la fermeture et le contrôle de voies, ou le contrôle d'accès autoroute-autoroute. Ces actions (ou stratégies) de commande peuvent être appliquées individuellement ou d'une façon collective.

Quand le trafic est dense, le contrôle d'accès améliore le flux en ajustant le taux de véhicules qui peut accéder à la route principale de manière à limiter la densité en aval.

Plusieurs travaux ont été menés sur ce sujet [8], [12], [2]. La plus connue est une boucle de rétroaction intégrale nommée ALINEA [8].

Nous proposons ici une méthode en boucle ouverte qui permet de contrôler l'accès d'une route principale en provenance d'une rampe à partir d'un modèle qui se rapproche du modèle inverse.

Cet article est organisé comme suit : après une présentation du modèle de trafic macroscopique METANET, l'idée de l'approche de la commande utilisée sera donnée. Finalement, nous présentons les résultats de simulation que l'on compare avec la méthode ALINEA.

II. MODÉLISATION

A. Description du problème

Nous considérons une voie principale sur laquelle est connectée une rampe d'entrée (figure 1). Les véhicules proviennent donc d'une des deux origines O_1 ou O_2 qui correspondent respectivement à la voie principale et à la rampe. Les demandes d_{O_1} et d_{O_2} sont les flux de véhicules qui proviennent des origines O_1 et O_2 . La longueur de la voie principale est de 6 km et la rampe se trouve à 4 km de l'origine O_1 . Le nombre de voies dans la voie principale est notée λ .

Si les flux de véhicules (qui proviennent des deux origines O_1 et O_2) excèdent la capacité de la route, une congestion est susceptible de se former sur la voie principale au niveau de la rampe d'entrée puis de se propager en amont. Afin d'éviter une telle congestion, le flux provenant de la rampe est contrôlé. L'objectif du travail est d'élaborer une commande permettant d'améliorer le temps total passé sur

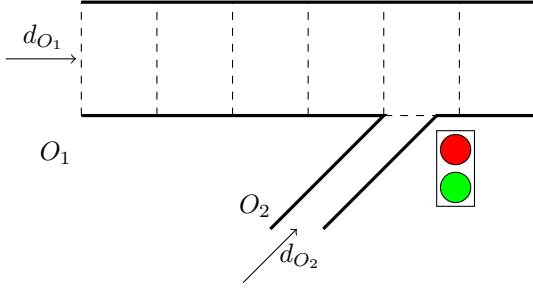


Fig. 1: Réseau routier

la route par les véhicules. Il est donc nécessaire d'effectuer une modélisation du système.

B. Le modèle METANET

Le modèle de trafic utilisé est le modèle METANET. Nous présentons la modélisation METANET du système : Le lecteur pourra trouver dans [9] une description plus complète des principes généraux sur lesquels repose ce modèle.

Le modèle METANET représente un réseau routier comme un graphe orienté. Les arcs ou les liens (indice m) correspondent aux sections de route. Chaque lien a des caractéristiques uniformes (pas de rampes d'entrée ou de sortie et pas de changements majeurs dans la géométrie du réseau). En ce qui concerne notre réseau, il est constitué de deux liens L_1 et L_2 qui correspondent à la partie de la chaussée principale qui se trouve respectivement avant et après la rampe.

Chaque lien m est divisé en N_m segments (indice i) de longueur $L = 1$ km : les liens L_1 et L_2 sont donc respectivement composés de quatre segments et deux segments. Chaque segment i du lien m est caractérisé par la densité de trafic par voie $\rho_{m,i}(k)$ (en véh/km/voie), la vitesse moyenne $v_{m,i}(k)$ et le flux de sortie $q_{m,i}(k)$, (en véh/h) où k indique le temps $t = kT$, et T est le pas de temps utilisé pour la simulation du flux de trafic. Le flux qui provient de l'origine O_1 et qui entre dans le premier segment du lien L_1 est noté q_{O_1} . De même, q_{O_2} représente le flux qui provient de la rampe d'accès et qui entre dans le premier segment du lien L_2 .

Les capacités par voie des origines O_1 et O_2 sont notées $Q_{cap}^{O_1}$ et $Q_{cap}^{O_2}$ (en véh/h/voie).

Les équations suivantes décrivent l'évolution du système dans le temps. Le flux de sortie est égal à la densité multipliée par la vitesse moyenne et le nombre de voies :

$$q_{m,i}(k) = \lambda \cdot \rho_{m,i}(k) v_{m,i}(k), \quad (1)$$

L'équation suivante exprime la conservation de la matière :

$$\rho_{m,i}(k+1) = \rho_{m,i}(k) + \frac{T}{L\lambda} \cdot [q_{m,i-1}(k) - q_{m,i}(k)], \quad (2)$$

où :

$$\begin{cases} q_{L_1,0} = q_{O_1} \\ q_{L_2,0} = q_{L_1,4} + q_{O_2} \end{cases} \quad (3)$$

La vitesse moyenne à l'instant $k+1$ est égale à la vitesse moyenne à l'instant k plus un terme de relaxation qui exprime l'intention des conducteurs à atteindre la vitesse

désirée $V(\rho)$, un terme de convection qui exprime que la vitesse croît (ou décroît) dû aux véhicules entrants dans le segment, et un terme d'anticipation qui exprime la décroissance (croissance) de la vitesse due à la croissance (décroissance) de la densité du segment en aval.

$$v_{m,i}(k+1) = v_{m,i}(k) + \frac{T}{\tau} \left(V(\rho_{m,i}(k)) - v_{m,i}(k) \right) + \frac{T}{L_m} v_{m,i}(k) \left(v_{m,i-1}(k) - v_{m,i}(k) \right) - \frac{\nu T}{\tau L_m} \frac{\rho_{m,i+1}(k) - \rho_{m,i}(k)}{\rho_{m,i}(k) + \kappa} \quad (4)$$

avec

$$V(\rho) = v_f \cdot \exp \left[-\frac{1}{a} \left(\frac{\rho}{\rho_{crit}} \right)^a \right], \quad (5)$$

où τ , ν , κ , a sont des paramètres du modèle, v_f est la vitesse libre, et ρ_{crit} est la densité critique.

Pour prendre en considération la diminution de la vitesse causée par la fusion des flux provenant de la voie principale et de la rampe d'accès, le terme de l'équation (6) est ajouté à l'équation (4) pour $m = L_2$ et $i = 1$:

$$-\frac{\delta T q_{O_2}(k) v_{m,i}(k)}{L\lambda (\rho_{m,i}(k) + \kappa)} \quad (6)$$

où δ est un paramètre du modèle.

Les équations (1) et (2) reposent sur des principes physiques et sont donc exactes alors que les équations (4) et (5) qui décrivent les dynamiques de la vitesse et la relation entre la densité et la vitesse désirée est une loi empirique.

Les origines du graphe sont modélisées par un simple modèle de file d'attente. Pour une origine O , la longueur de la file d'attente à l'instant $k+1$ est égale à longueur de la file d'attente à l'instant k plus la demande $d_O(k)$ moins le flux de sortie $q_O(k)$:

$$\forall O \in \{O_1, O_2\}, \omega_O(k+1) = \omega_O(k) + T(d_O(k) - q_O(k)) \quad (7)$$

Le flux de sortie $q_{O_2}(k)$ de la rampe dépend des conditions de trafic de la section principale et de la quantité de véhicules dans la rampe. De plus, le flux de sortie est limité par le taux $r(k) \in [0, 1]$ qui correspond au contrôle d'accès qui est effectué au niveau de la rampe.

$$q_{O_2}(k) = \min \left[d_{O_2}(k) + \frac{\omega_{O_2}(k)}{T}, Q_{cap}^{O_2} \min \left(r(k), \frac{\rho_{max} - \rho_{L_2,1}(k)}{\rho_{max} - \rho_{crit}} \right) \right], \quad (8)$$

où ρ_{max} (véh/voie/km) est la densité maximale de la voie principale.

L'origine O_1 n'étant pas de la même nature que l'origine O_2 , une expression différente de l'équation (8) a été proposée par [3] pour le flux q_{O_1} :

$$q_{O_1}(k) = \min \left(d_{O_1}(k) + \frac{\omega_{O_1}(k)}{T}, q_{lim,L_1,1}(k) \right) \quad (9)$$

où :

$$q_{lim,L_1,1}(k) = \begin{cases} \lambda v_{L_1,1}(k) \rho_{crit} \left(-a \ln \left(\frac{v_{L_1,1}(k)}{v_f} \right) \right) \frac{1}{a} & \text{si } v_{L_1,1}(k) < V(\rho_{crit}) \\ Q_{cap}^{O_1} & \text{si } v_{L_1,1}(k) < V(\rho_{crit}) \end{cases} \quad (10)$$

L'équation (4) nécessite de définir les variables $v_{L_1,0}$, $v_{L_2,0}$, $\rho_{L_1,5}$ et $\rho_{L_2,3}$. Nous supposons que la vitesse $v_{L_1,0}$ est égale à celle du premier segment du lien L_1 . La vitesse $v_{L_2,0}$ correspond à la vitesse du dernier segment du lien L_1 .

$$\begin{cases} v_{L_1,0}(k) = v_{L_1,1}(k) \\ v_{L_2,0}(k) = v_{L_1,4}(k) \end{cases} \quad (11)$$

La densité $\rho_{L_1,5}$ est égale à celle du premier segment du lien L_2 . La sortie du lien L_2 est supposée libre : la densité $\rho_{L_2,3}$ est égale à celle du segment précédent dans le cas non-congestionné et vaut ρ_{crit} dans le cas congestionné.

$$\begin{cases} \rho_{L_1,5}(k) = \rho_{L_2,1}(k) \\ \rho_{L_2,3}(k) = \min(\rho_{L_2,2}(k), \rho_{crit}) \end{cases} \quad (12)$$

Finalement, le système est régi par l'équation d'état (13)

$$x(k+1) = f_{d_{O_1}, d_{O_2}}(x(k), u(k)) \quad (13)$$

où la commande u est la variable r et le vecteur d'état x est composé des densités $\rho_{m,i}$ et des vitesses $v_{m,i}$ ($m \in \{L_1, L_2\}$ et $1 \leq i \leq N_m$) ainsi que des longueurs des files d'attente w_{O_1} et w_{O_2} . Les demandes des origines d_{O_1} et d_{O_2} sont supposés connus : si ce n'était pas le cas, il faudrait alors les considérer comme des perturbations.

III. L'APPROCHE DE COMMANDE

A. Principe

Lors des périodes de pointe une congestion peut se former sur la route principale au niveau de la rampe d'accès et se propager en amont. Le contrôle de la rampe d'accès permet de limiter le flux entrant dans la route principale en provenance de la rampe. Ce contrôle d'accès sera tel que la densité du premier segment du lien L_2 n'excède pas une certaine densité qu'on appelle la densité cible et qui sera noté y_t . Cette densité cible sera recherchée aux alentours de la densité critique. En effet, l'allure du diagramme fondamental (figure 2), qui donne le flux en fonction de la densité à l'état stationnaire, montre que la densité critique correspond à un débit maximum. Ainsi maintenir la densité $\rho_{L_2,1}$ aux alentours de ρ_{crit} permet à priori, en dégageant un maximum de véhicules, de réduire le temps de parcours total. Plusieurs régulations d'accès reposent sur ce principe. En particulier, la méthode ALINEA [8] est une commande intégrale en boucle fermée qui vise à maintenir la densité critique en aval de la rampe d'accès. La méthode utilisée par [12] consiste à contrôler l'accès à la chaussée principale de manière à rendre maximal le flux de sortie. Plus récemment, une technique fondée sur la commande prédictive utilise un filtre de Kalman pour estimer l'état du trafic [2].

La technique proposée dans cet article est d'inverser le modèle de manière à réguler la densité dans le premier segment du lien L_2 .

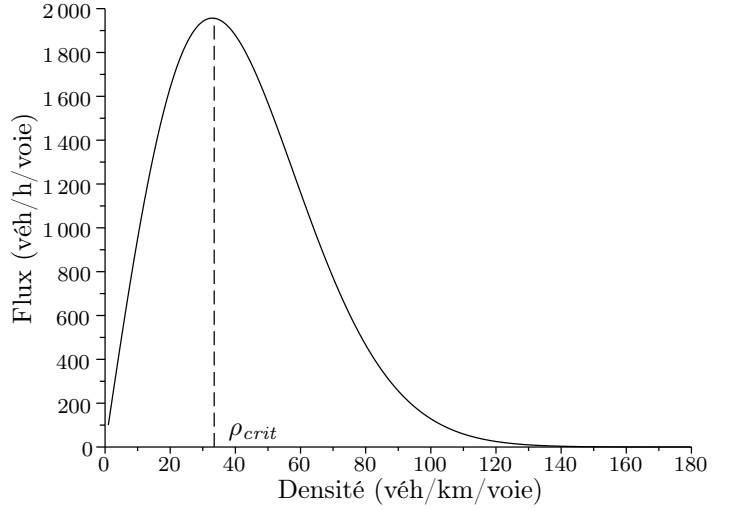


Fig. 2: Diagramme fondamental

Ainsi, il s'agit maintenant de rechercher la commande à appliquer pour que la densité ρ_{L_2} soit égale à notre densité cible y_t . Pour cela, nous allons tenter d'inverser le modèle.

B. Inversion du modèle

Le but de cette partie est d'exprimer la commande r en fonction de l'état du système.

D'après l'équation (8), pour que le modèle puisse être inversé, il est nécessaire que la demande de la rampe soit suffisante et la densité $\rho_{L_2,1}$ pas trop élevée. En effet, si ce n'était pas le cas, la densité q_{O_2} serait indépendante de la commande r : la commande n'aurait alors aucun effet sur le système. Cette condition nécessaire est exprimée par l'équation (14).

$$\begin{cases} r(k) \leq \frac{1}{Q_{cap}^{O_2}} \cdot \left(d_{O_2}(k) + \frac{w_{O_2}(k)}{T} \right) \\ r(k) \leq \frac{\rho_{max} - \rho_{L_2,1}(k)}{\rho_{max} - \rho_{crit}} \end{cases} \quad (14)$$

Dans ce cas, le flux $q_{O_2}(k)$ sortant de la rampe serait égal à $Q_{cap}^{O_2} \cdot r(k)$.

Par ailleurs, en combinant, les équations (2) et (3), on obtient :

$$q_{O_2}(k) = \frac{L\lambda}{T} \left(\rho_{L_2,1}(k+1) - \rho_{L_2,1}(k) \right) + q_{L_2,1}(k) - q_{L_1,4}(k) \quad (15)$$

Étant donné que l'on désire que $\rho_{L_2,1}(k+1) = y_t$, la commande qui est appliquée est la suivante :

$$r(k) = \max(0, \min(1, r_0(k))) \quad (16)$$

où

$$r_0(k) = \frac{L\lambda(y_t - \rho_{L_2,1}(k))}{Q_{cap}^{O_2} \cdot T} + \frac{q_{L_2,1}(k) - q_{L_1,4}(k)}{Q_{cap}^{O_2}} \quad (17)$$

La commande $r_0(k)$ permettrait d'avoir $\rho_{L_2,1}(k+1) = y_t$ si l'équation (14) était vérifiée. Par ailleurs, l'équation (16) assure que la commande $r(k)$ soit comprise entre 0 et 1.

IV. RÉSULTATS ET SIMULATIONS

Les paramètres de simulation sont ceux pris dans la littérature [6] : $\tau = 18$ s, $\kappa = 40$ véh/km/voie, $\nu = 60$ km²/h, $\rho_{max} = 180$ véh/km/voie, $\delta = 0.0122$, $a = 1.867$ et $\rho_{crit} = 33.5$ véh/km/voie. La capacité des deux origines est de 2000 véh/h/voie, le nombre de voies dans la route principale est $\lambda = 2$ et le pas de temps est $T = 10$ s

Le système réel est simulé par un modèle METANET dont les paramètres varient, à chaque pas de temps, aléatoirement autour de leur valeur moyenne.

En ce qui concerne la demande des deux origines, nous considérons le scénario représenté par la figure 3. La demande de la section principale est constante égale à 3500 véh/h pendant deux heures. Puis elle diminue linéairement pendant 15 minutes pour atteindre une valeur plus faible égale à 1000 véh/h qui est maintenue jusqu'à la fin de la simulation. La demande de la rampe a la forme d'un créneau. La valeur minimale (respectivement maximale) est de 500 véh/h (respectivement 1500 véh/h). La valeur maximale est maintenue pendant quinze minutes. La montée et la descente durent dix minutes chacun. La montée commence au bout d'une demi-heure.

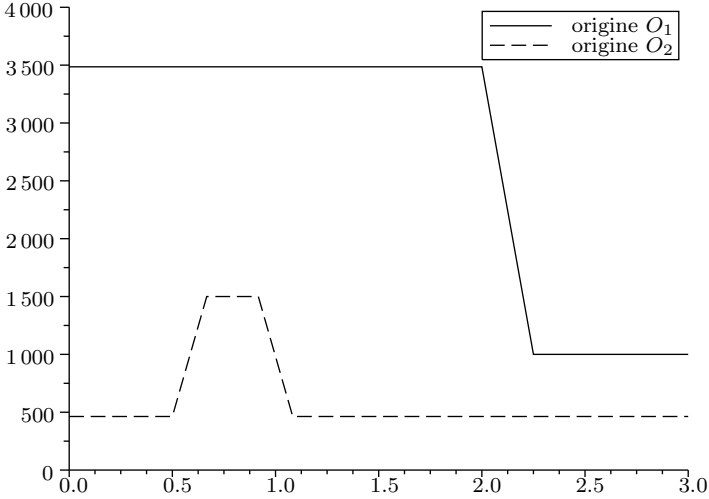
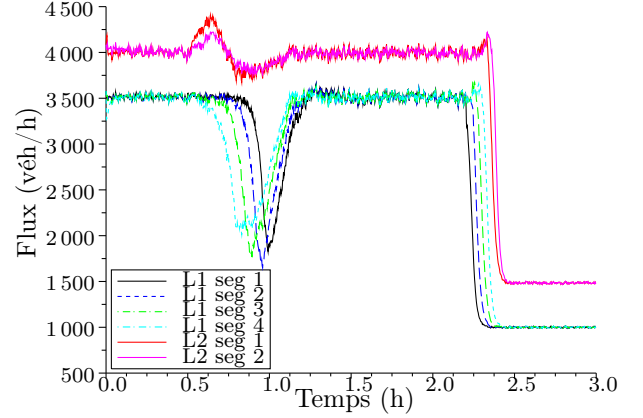


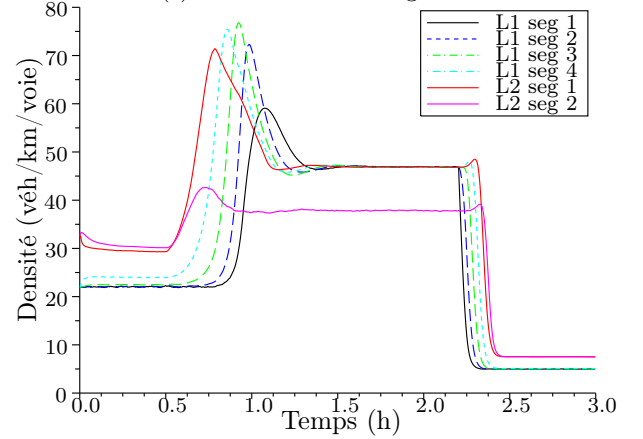
Fig. 3: Le scénario des demandes

Les résultats présentés sur la figure 4 correspondent au système non commandé. Quand la demande de la rampe d'entrée croît, la densité $\rho_{L2,1}$ du premier segment du lien L_2 (segment de la section principale où la rampe est connectée) croît et crée une congestion qui se propage en amont vers les premiers segments. Cela provoque l'apparition d'une file d'attente à l'origine O_1 d'approximativement 250 véhicules. Quand la demande de la rampe d'entrée diminue à 500 véh/h, la densité du premier segment de L_2 puis celle des segments en amont diminuent jusqu'à une valeur d'environ 48 véh/km/voie. À la fin de la simulation, lorsque la demande de la route principale diminue, la congestion disparaît, la file d'attente dans la route principale se résorbe et le trafic devient fluide.

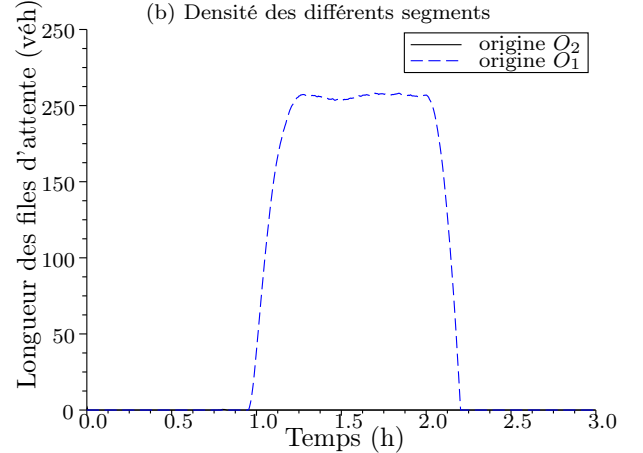
Le contrôle d'accès décrit dans cet article, a été appliqué pour différentes valeurs de la densité cible y_t . La figure 5 représente les résultats obtenus pour une densité cible de $y_t = 40$ véh/km/voie qui correspond au meilleur résultat. Nous pouvons observer que le contrôle d'accès est une solu-



(a) Flux des différents segments



(b) Densité des différents segments



(c) Longueur des files d'attente

Fig. 4: Résultats des simulations sans la mise en oeuvre d'une commande

tion au problème de congestion en gardant la densité dans le premier segment du lien L_2 égale à la densité cible, et par conséquent en maintenant le flux dans ce segment à sa valeur maximale (capacité maximale). Étant donné qu'il n'y a plus de congestion sur la route principale, aucune file d'attente ne se crée au niveau de l'origine O_1 . Par contre, une file d'attente, contenant jusqu'à 300 véhicules, apparaît au niveau de la rampe d'entrée (origine O_2).

Le tableau I représente, pour différentes valeurs de la densité cible, le temps total de parcours de notre stratégie de commande. Ce temps de parcours est calculé en tenant compte du temps passé dans les liens L_1 et L_2 ainsi que

TABLE I: Temps de parcours en fonction de la densité cible

y_t	37	38	39	40	41	42
Temps de parcours (h-véh)	1 096	1 085	1 078	1 076	1 077	1 081
Gain (%)	20.9	21.7	22.1	22.3	22.2	21.9

dans les deux files d'attente. Il est noté TTS et se calcule comme suit :

$$TTS = \lambda TL \sum_{\substack{m \in \{L_1, L_2\} \\ 1 \leq i \leq N_m \\ k \geq 0}} \rho_{m,i}(k) + T \sum_{\substack{O \in \{O_1, O_2\} \\ k \geq 0}} \omega_O(k) \quad (18)$$

Le meilleur résultat est obtenu pour une densité cible de 40 véh/km/voie. Pour cette valeur, la stratégie de commande donne un temps total de parcours de 1 076 h-véh. Dans le cas où la rampe ne serait pas contrôlée, le temps de parcours serait de 1 385 h-véh et la stratégie ALINEA (cf. figure 6) obtient un résultat de 1 177 h-véh. Ainsi, nous obtenons une amélioration de 22.3% par rapport à une absence de commande et de 8.6% par rapport à ALINEA.

V. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé une commande pour contrôler l'accès d'une route à partir d'une rampe. Le réseau routier est modélisé à l'aide d'un modèle du second ordre METANET. Le principe de la commande consiste à essayer d'inverser le modèle METANET afin que la densité au niveau de la rampe suive la consigne donnée. Nous avons montré que dans le cas du contrôle d'accès le flux a été amélioré (diminution du temps total de trajet) par rapport notamment à la stratégie ALINEA.

La commande présentée est une commande en boucle ouverte. Cela suppose que les paramètres du modèle soient très bien connus, ce qui n'est pas tout à fait réaliste vu la complexité du système. Nous envisageons maintenant d'appliquer le même principe pour élaborer une commande en boucle fermée ainsi que pour étendre ces travaux pour la coordination de plusieurs rampes d'accès ou encore pour la coordination d'une rampe d'accès avec une limitation dynamique de la vitesse.

VI. REMERCIEMENTS

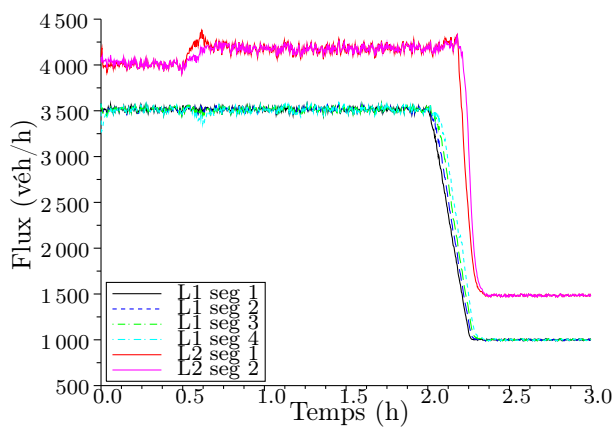
Nous remercions l'Union Européenne, la Région Nord Pas-de-Calais ainsi que l'état français d'avoir permis que ces travaux puissent être effectués.

RÉFÉRENCES

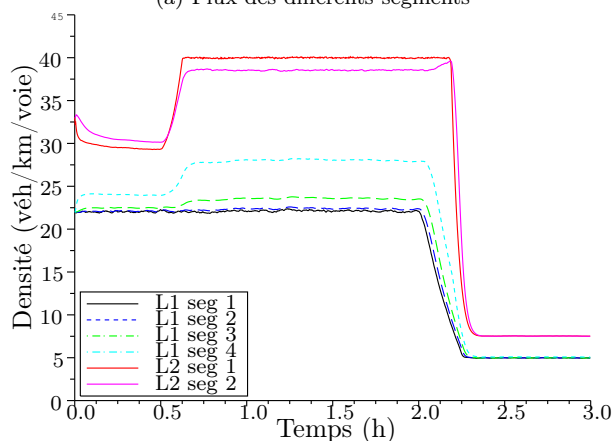
- [1] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata, and Y. Sugiyama, "Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation," *Physical Review E*, vol. 51, no. 2, pp. 1035–1042, Feb. 1995.
- [2] T. Bellemans, B. De Schutter, G. Wets, and B. De Moor, "Model predictive control for ramp metering combined with extended kalman filter-based traffic state estimation," *Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference ITSC, Toronto, Canada*, pp. 406–411, Sept. 2006.
- [3] A. Hegyi, B. De Schutter, and H. Hellendoorn, "Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable

speed limits," *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 13, no. 3, pp. 185–209, May 2005.

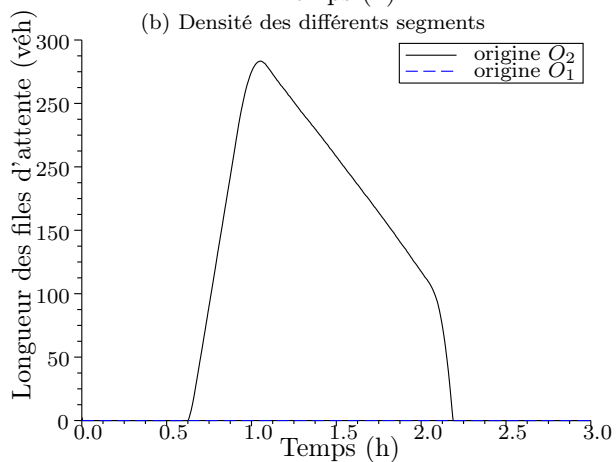
- [4] D. Helbing, "Theoretical foundation of macroscopic traffic models," *Physica A : Statistical and Theoretical Physics*, vol. 219, no. 3–4, pp. 375–390, Oct. 1995.
- [5] R. Herman, E. W. Montroll, R. B. Potts, and R. W. Rothery, "Traffic dynamics : Analysis of stability in car following," *Operations Research*, vol. 7, pp. 86–106, 1959.
- [6] A. Kotsialos, M. Papageorgiou, and A. Messmer, "Optimal coordinated and integrated motorway network traffic control," *In : Proceedings of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory (ISTTT), Jerusalem, Israel*, pp. 621–644, July 1999.
- [7] M. J. Lighthill and G. B. Whitham, "On kinematic waves. II. a theory of traffic flow on long crowded roads," *Proceedings of the Royal Society of London. Series, A Mathematical and Physical Sciences (1934-1990)*, vol. 229, no. 1178, pp. 317–345, May 1955.
- [8] M. Papageorgiou, J. M. Blosseville, and H. Hadj-Salem, "Macroscopic modelling of traffic flow on the boulevard périphérique in paris," *Transportation Research Part B : Methodological*, vol. 23, no. 1, pp. 29–47, Feb. 1989.
- [9] M. Papageorgiou, J. M. Blosseville, and H. Haj-Salem, "Modelling and real-time control of traffic flow on the southern part of boulevard périphérique in paris : Part II : Coordinated on-ramp metering," *Transportation Research Part A : General*, vol. 24, no. 5, pp. 361–370, Sept. 1990.
- [10] H. J. Payne, "Models of freeway traffic and control," *Mathematical Models of Public Systems, Simulation Council Proceedings*, vol. 1, no. 1, pp. 51–61, 1971.
- [11] P. Richards, "Shock waves on the highway," *Operations Research*, vol. 4, pp. 42–51, 1956.
- [12] E. Smaragdis, M. Papageorgiou, and E. Kosmatopoulos, "A flow-maximizing adaptive local ramp metering strategy," *Transportation Research Part B : Methodological*, vol. 38, no. 3, pp. 251–270, Mar. 2004.



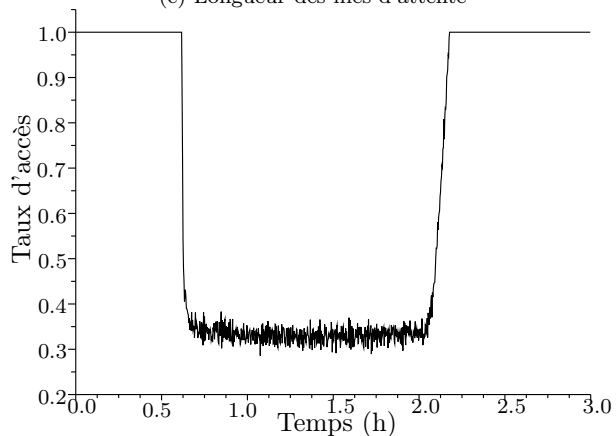
(a) Flux des différents segments



(b) Densité des différents segments

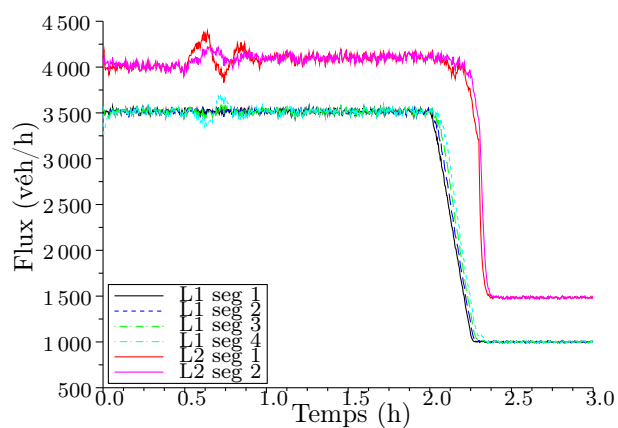


(c) Longueur des files d'attente

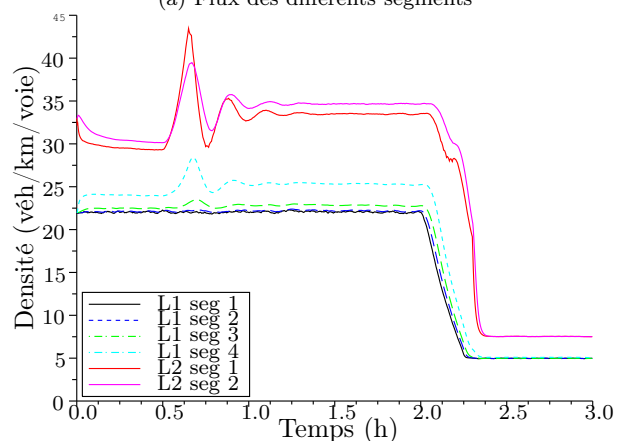


(d) Taux d'accès

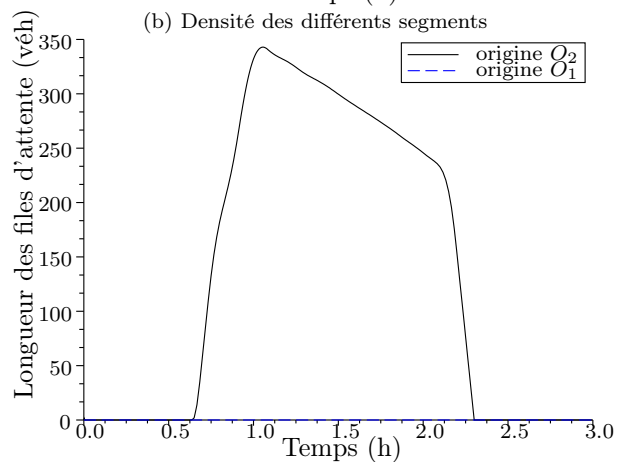
Fig. 5: Résultats des simulations avec contrôle d'accès ($y_t = 40$ véh/km/voie)



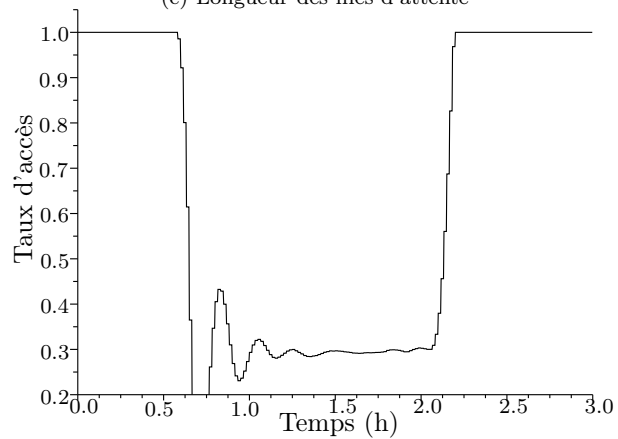
(a) Flux des différents segments



(b) Densité des différents segments



(c) Longueur des files d'attente



(d) Taux d'accès

Fig. 6: Résultats des simulations avec contrôle d'accès par Alinea