

Coordination de la limitation variable de la vitesse et du contrôle d'accès en cas de rétrécissement

Boumediene KAMEL, Amar BENASSER, Daniel JOLLY

Univ Lille Nord de France, F-59000 Lille, France

UArtois, LGI2A, F-62400 Béthune, France

kamel_boume2002@yahoo.fr, amar.benasser@univ-artois.fr, daniel.jolly@univ-artois.fr

Résumé— Dans le cadre de la commande du flux de trafic, l'article présente une étude d'un cas particulier de réseau qui contient une rampe d'entrée et un rétrécissement en aval avec pour objectif de minimiser le Temps Total Passé (TTP) par les conducteurs dans le réseau. Le modèle Metanet est choisi pour présenter les résultats de simulation. Ce genre de réseau est étudié dans [1] où la stratégie ALINEA et son extension Proportionnel-Intégral (PI) ont été appliquées. Dans cet article, nous avons choisi d'appliquer la coordination de la limitation variable de la vitesse et du contrôle d'accès afin d'améliorer les conditions de circulation en réduisant les effets de la congestion. Une amélioration des flux a été remarquée et par conséquent une diminution du TTP a été réalisée.

Mots-clés— Modèle Metanet, contrôle d'accès, terme d'anticipation, limitation variable de la vitesse, coordination.

I. INTRODUCTION

Les autoroutes ont été construites pour faciliter la circulation des biens et des personnes grâce à leurs grandes capacités et leurs tracés. Cependant, ces autoroutes connaissent des problèmes liés à l'augmentation des nombres de véhicules les empruntants. Ces problèmes sont principalement les congestions récurrentes et non récurrentes qui apparaissent sur ces autoroutes surtout pendant les heures de pointe. En général, une demande de trafic forte n'est pas la seule cause d'apparition de congestions : elle est associée à la géométrie de la route. En effet, une congestion est susceptible de se former, aussi, en cas de rétrécissement : c'est-à-dire si la capacité en amont d'un point sur l'autoroute dépasse la capacité en aval de ce point. Alors, nous pouvons constater qu'un rétrécissement se produit pour plusieurs configurations, par exemple, une diminution du nombre de voies, une rampe d'entrée, une zone de péage, etc.

Le phénomène de la congestion dégrade localement (totalemment selon sa propagation en amont) les conditions de circulation et l'utilisation des infrastructures. Ainsi, les observations montrent des effets négatifs de la congestion, parmi ces effets est la *chute de capacité* qui se produit dès qu'une congestion se forme, elle est localisée juste devant cette congestion [2]. La chute de capacité est une diminution de la capacité (flux maximal qui peut être accueilli), elle empêche une utilisation optimale de l'autoroute et elle allonge le temps que les usagers de la route passent dans le réseau routier.

Puisque la cause essentielle d'apparition de congestion est l'augmentation de la demande, une meilleure gestion ou exploitation de la demande de trafic semble la meilleure solution pour éliminer, réduire ou au moins retarder la formation des congestions. Selon [3], l'application des mesures

de contrôle adéquates telles que : le contrôle ou la régulation d'accès, les systèmes de guidage et information aux conducteurs et la limitation variable de la vitesse peuvent servir à cet objectif.

Le contrôle d'accès est l'utilisation de feux de signalisation appropriés ou de barrières physiques placées pour contrôler le débit de véhicules entrant à l'autoroute à partir d'une bretelle ou à partir d'une autre voie rapide (régulation d'accès autoroute sur autoroute). Le contrôle d'accès est utilisé quand le trafic n'est ni léger ni trop dense. Selon [4], [5], [6], [7] le contrôle d'accès a montré son efficacité dans l'amélioration du flux et de la vitesse. Le principal inconvénient du contrôle d'accès est qu'il conduit à de longues files d'attente et par conséquent à des retards sur ces rampes. Cela conduit ainsi à bloquer le réseau secondaire. Le lecteur peut se référer à [8] pour un état de l'art sur le contrôle d'accès et [9] pour son évaluation.

Le contrôle d'accès peut être coordonné avec d'autres actions ou mesures de contrôle comme la limitation variable de la vitesse. La limitation variable de la vitesse est utilisée dans plusieurs pays en Europe et aux États Unis, et est peut être mise en œuvre à l'aide des Panneaux à Message Variable (PMV). Elle est utilisée en générale pour des raisons de sécurité, où une réduction de 20-30% du nombre des accidents peut être atteinte, ainsi que pour la réduction des émissions du gaz carbonique [10]. Des résultats indiquent aussi un effet d'homogénéisation de vitesse (faibles différences entre les vitesses individuelles) [11]. D'autres études ont montrés son impact positif sur l'amélioration des conditions de circulation dégradée à cause d'une gestion [12].

Dans cet article nous cherchons à améliorer les conditions de circulation sur un réseau autoroutier, représenté sur la figure 1, contenant un rétrécissement (diminution de nombre de voies) et une rampe d'entrée en amont. Ce genre de réseau a été étudié par [1] en appliquant la stratégie ALINEA et son extension Proportionnel-Intégral (PI). Nous appliquons ici la coordination de la limitation variable de la vitesse et du contrôle d'accès pour améliorer le flux afin de diminuer le Temps Total Passé par les conducteurs dans le réseau (TTP).

La section II décrit le problème et le modèle Metanet du réseau. La section III présente la stratégie de commande. les résultats de simulation sont donnés dans la section IV, alors que la section V finit par une principale conclusion et des perspectives.

II. RÉSEAU DES EXPÉRIMENTATIONS

A. Description du problème

Dans cet article nous considérons le réseau autoroutier de la figure 1. Il s'agit d'une voie rapide de longueur 11 km contenant une rampe d'entrée et un rétrécissement respectivement à 4 km et 7 km de l'origine $o1$. Le rétrécissement est dû à la suppression d'une des voies de circulation. Dans cette configuration, la capacité de la chaussée en amont du rétrécissement dépasse celle en aval du rétrécissement. La rampe d'entrée est aussi une configuration de rétrécissement puisque la capacité en amont de la rampe dépasse la capacité en aval. En effet, si le flux de trafic en amont du rétrécissement est (la demande) supérieur à la capacité en aval, la congestion se forme et elle se propage en amont.

Par ailleurs, lorsqu'une congestion se crée, le phénomène de *chute de capacité* se produit : le flux d'écoulement du réseau (devant la congestion) devient inférieur à la capacité. Cette chute de capacité accentue la congestion et augmente le TTP.

Pour pallier à ce problème, deux mesures de contrôle vont être mises en œuvre. D'une part, un contrôle d'accès est effectué à l'aide de feux de signalisation au niveau de la rampe d'entrée. l'objectif est de définir le flux de la rampe accédant à la section principale pour lequel la densité du segment, à lequel la rampe est connectée, ne dépasse pas une densité cible γ_T (comportement désiré). La file d'attente qui risque d'être créée à cause du contrôle d'accès sera maintenue en dessous d'une valeur maximale afin d'éviter de déplacer la congestion au niveau des réseaux secondaires. D'autre part, la limitation dynamique de la vitesse est coordonnée avec le contrôle d'accès, comme son complément, de manière à réduire le TTP. La limitation de la vitesse est appliquée dans les trois segments qui précèdent la rampe d'entrée (cf. figure 1).

B. Modèle Metanet et description du réseau

Dans cet article nous utilisons le modèle du second ordre METANET et son extension pour modéliser notre réseau autoroutier. Le lecteur pourra trouver une description complète des principes généraux sur lesquelles repose le modèle original dans [13], [14], [4] et [15].

Le modèle original ne prend pas en considération la limitation variable de la vitesse. Ainsi, certains travaux ont défini un modèle qui tient compte de l'impact de la limitation variable de vitesse sur le trafic [12]. Plus précisément les auteurs proposent un diagramme fondamental qui dépend de la limitation de vitesse. Plus récemment, l'effet de la limitation de vitesse sur le diagramme fondamental a été étudié de manière empirique [16]. Ces résultats ont permis de proposer un modèle qui inclut l'effet de la limitation de vitesse sur le diagramme fondamental [10].

Notre réseau autoroutier, modélisé par METANET, est composé de deux origines (l'origine de la section principale est notée $o1$ et celle de la rampe d'entrée est notée $o2$), et deux nœuds, le nœud $o3$ du début du rétrécissement et le nœud $o4$ de la fin du rétrécissement, quatre liens (d'indice m) correspondant aux sections de l'autoroute, avec $m \in \{L1, L2, L3, L4\}$, et une destination (notée $d1$). Les quatre liens ont les mêmes caractéristiques. Le nombre de voies d'un lien m est noté λ_m où $\lambda_{L1} = \lambda_{L2} = \lambda_{L4} = 2$ et

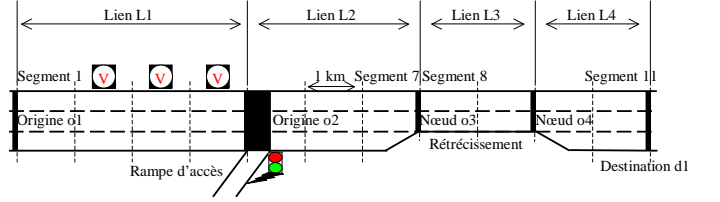


Fig. 1: Réseau autoroutier avec une rampe d'entrée et un rétrécissement

$\lambda_{L3} = 1$ et la rampe ne compte qu'une seule voie.

Le temps et l'espace sont discrétisés. Le pas de temps discret est noté T ($T = 10$ s). Chaque lien m est divisé en segments (indice i) d'une longueur $L = 1$ km (4 segments pour $L1$, 3 pour $L2$, 2 pour $L3$ et 2 pour $L4$). La longueur des liens $L1$, $L2$, $L3$ et $L4$, est, respectivement, 4 km, 3 km, 2 km et 2 km. Les capacités des origines sont notées Q_{cap}^{o1} et Q_{cap}^{o2} et la destination $d1$ a un flux non limité. Chaque segment i d'un lien m est caractérisé par la densité $\rho_{m,i}(k)$ (en véh/km/voie), la vitesse moyenne $v_{m,i}(k)$ (en km/h), et le flux de sortie $q_{m,i}(k)$ (en véh/h) au temps discret $t = kT$, où $k = 1, 2, \dots$ est un entier naturel.

Les flux qui accèdent à la chaussée principale à partir des origines $o1$ et $o2$ sont, respectivement notés $q_{o1}(k)$ et $q_{o2}(k)$. Ces différentes grandeurs évoluent dans le temps suivant les équations qui vont être décrites.

Le flux de sortie de chaque segment est égal à la densité multipliée par la vitesse moyenne et le nombre de voies de ce segment :

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

La densité du segment est égale à la densité précédente plus le flux de sortie du segment en amont, moins le flux de sortie du segment lui-même

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

où :

$$\begin{cases} q_{L1,0} = q_{o1} \\ q_{L2,0} = q_{L1,4} + q_{o2} \\ q_{L3,0} = q_{L2,3} \\ q_{L4,0} = q_{L3,2} \end{cases} \quad (3)$$

Les équations (1) et (2) sont fondées sur des principes physiques et sont exactes, les équations qui décrivent les dynamiques de la vitesse et la relation entre la densité et la vitesse désirée sont heuristiques.

La vitesse moyenne à l'instant $k+1$ égale la vitesse moyenne à l'instant k plus un terme de relaxation qui exprime que les conducteurs essaient d'atteindre la vitesse désirée $V_e(\rho)$, un terme de convection qui exprime la croissance de la vitesse (décroissance) causée par le flux de véhicules entrants, et un terme d'anticipation qui exprime la décroissance (croissance) de la vitesse à cause de la croissance (décroissance) de la densité du segment en aval.

$$v_{m,i}(k+1) = v_{m,i}(k) + \frac{T}{\tau} (V_e(\rho_{m,i}(k)) - v_{m,i}(k)) + \frac{T}{L} v_{m,i}(k) (v_{m,i-1}(k) - v_{m,i}(k)) - \frac{\nu T}{\tau L} \frac{\rho_{m,i+1}(k) - \rho_{m,i}(k)}{\rho_{m,i}(k) + \kappa} \quad (4)$$

où τ, ν , et κ sont les paramètres du modèle, avec :

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

où a est un paramètre du modèle, v_f est la vitesse libre, et ρ_{crit} est la vitesse critique à laquelle le flux de trafic est maximal.

Les conditions aux limites de l'équation (4) nécessitent de définir les variables $v_{L1,0}, v_{L2,0}, v_{L3,0}, v_{L4,0}, \rho_{L1,5}, \rho_{L2,4}, \rho_{L3,3}$ et $\rho_{L4,3}$. Nous supposons que :

$$\begin{cases} v_{L1,0}(k) = v_{L1,1}(k) \\ v_{L2,0}(k) = v_{L1,4}(k) \\ v_{L3,0}(k) = v_{L2,3}(k) \\ v_{L4,0}(k) = v_{L3,2}(k) \\ \rho_{L1,5}(k) = \rho_{L2,1}(k) \\ \rho_{L2,4}(k) = \rho_{L3,1}(k) \\ \rho_{L3,3}(k) = \rho_{L4,1}(k) \\ \rho_{L4,3}(k) = \min(\rho_{L4,2}(k), \rho_{crit}) \end{cases} \quad (6)$$

Pour prendre en considération la diminution de la vitesse causée par le phénomène de fusionnement dû à la rampe, le terme

$$-\frac{\delta T q_{o2}(k) v_{L2,1}(k)}{L \lambda_{L2} (\rho_{L2,1}(k) + \kappa)} \quad (7)$$

est ajouté à (4) pour $m = L2, i = 1$, où δ est un paramètre du modèle. Aussi, pour prendre en considération la décroissance de la vitesse, à cause du rétrécissement, dans le segment qui précède le rétrécissement, le terme

$$-\frac{\phi T \Delta \lambda_{L2} \rho_{L2,3}(k) v_{L2,3}^2(k)}{L \lambda_{L2} \rho_{crit}} \quad (8)$$

est ajouté à (4) pour $m = L2$ et $i = 3$, où $\Delta \lambda_{L2} = \lambda_{L2} - \lambda_{L3}$ et ϕ est un paramètre du modèle.

Pour les segments 2, 3, 4 où la vitesse est contrôlée, le diagramme fondamental décrit par l'équation (5) change à cause de l'application de la commande de vitesse [12], [16], [10]. Nous avons choisi l'approche de Hegyi : selon Hegyi et ses collaborateurs, à cause de la limitation de la vitesse, la nouvelle vitesse désirée $V'_e(\rho_{L1,i})$ dans les segments $i \in \{2, 3, 4\}$ est le minimum entre la vitesse désirée sans commande $V_e(\rho_{L1,i})$, et la vitesse limite $v_{L1,i,contrôle}$ affichée sur le panneau à message variable (PMV) :

$$V'_e(\rho_{L1,i}(k)) = \min(V_e(\rho_{L1,i}(k)), v_{L1,i,contrôle}(k)) \quad (9)$$

Dans cet article, le facteur de non-conformité n'est pas considéré parce qu'il est supposé que les conducteurs respectent la limitation de vitesse.

Les origines sont modélisées par un simple modèle d'origine. La longueur de la file d'attente de l'origine o (notées ω_o) égale à la longueur de la file d'attente précédente plus la demande $d_o(k)$, moins le flux de sortie $q_o(k)$:

$$\forall o \in \{o1, o2\}, \omega_o(k+1) = \omega_o(k) + T(d_o(k) - q_o(k)) \quad (10)$$

Le flux de sortie $q_{o2}(k)$ de l'origine $o2$ (rampe d'entrée) dépend des conditions de trafic de la section principale et du débit d'accès $r(k)$, où $r(k) \in [0, 1]$. Plus précisément,

$q_{o2}(k)$ est le minimum de trois quantités : le flux disponible à l'instant k (file d'attente plus la demande), le flux maximal qui peut accéder à la section principale selon les conditions de celle-ci, et le flux maximal autorisé par le débit d'accès $r(k)$

$$q_{o2}(k) = \min\left[d_{o2}(k) + \frac{\omega_{o2}(k)}{T}, Q_{cap}^{o2} \min\left(r(k), \frac{\rho_{max} - \rho_{L2,1}(k)}{\rho_{max} - \rho_{crit}}\right)\right] \quad (11)$$

où ρ_{max} est la densité maximale du lien $L2$ et $Q_{cap}^{o2} = \rho_{crit} \cdot V_e(\rho_{crit})$ est la capacité de l'origine $o2$.

Selon [12], le flux q_{o1} est calculé comme suit :

$$q_{o1}(k) = \min\left(d_{o1}(k) + \frac{\omega_{o1}(k)}{T}, q_{lim,L1,1}(k)\right) \quad (12)$$

où :

$$q_{lim,L1,1}(k) = \begin{cases} \lambda_{L1} v_{L1,1}(k) \rho_{crit} \left[-a \ln\left(\frac{v_{L1,1}(k)}{v_f}\right)\right] \frac{1}{a} & \text{si } v_{L1,1}(k) < V_e(\rho_{crit}) \\ \lambda_{L1} Q_{cap}^{o1} & \text{si } v_{L1,1}(k) \geq V_e(\rho_{crit}) \end{cases} \quad (13)$$

où $Q_{cap}^{o1} = \rho_{crit} \cdot V_e(\rho_{crit})$ est la capacité par voie du lien $L1$. Finalement, le système est régi par l'équation d'état (14) :

$$x(k+1) = f(x(k), u(k), d(k)), \quad (14)$$

où u est le vecteur de commande, d le vecteur de perturbation et le vecteur d'état x est composé des densités $\rho_{m,i}$ et des vitesses moyennes $v_{m,i}$ de chaque segment i de chaque lien m et ainsi que la longueur des files d'attentes ω_{o1}, ω_{o2} . Le vecteur de commande est composé des variables $v_{L1,i,contrôle}$ des segments où la commande est appliquée et du débit d'accès $r(k)$. Le vecteur de perturbation est composé des demandes d_{o1}, d_{o2} .

L'objet de la partie suivante est d'établir une commande qui permette de diminuer le TTP. Ce temps tient compte du temps passé par les véhicules dans le réseau ainsi que le temps d'attente dans la file d'attente. Il est défini de la manière suivante :

$$TTP = \sum_{m,i,k} LT \cdot \lambda_m \rho_{m,i}(k) + \sum_{o,k} T \cdot \omega_o(k)$$

III. COORDINATION DE LA LIMITATION VARIABLE DE LA VITESSE ET DU CONTRÔLE D'ACCÈS

Si les demandes des origines $o1$ et $o2$ sont fortes, alors elles ne pourront pas être absorbées par le réseau à cause de la capacité limitée de ce dernier, en plus la présence de la rampe d'entrée et du rétrécissement est une cause suffisante pour la formation d'une congestion. Pour réduire l'effet de cette congestion qui ne peut pas être annulée, deux mesures de contrôle sont appliquées : une régulation d'accès au niveau de la rampe d'entrée ainsi que des limitations variables de vitesse sur la chaussée principale en amont de la rampe. Nous traitons le cas où la régulation d'accès est appliquée seule puis celui où elle est appliquée en coordination avec les limitations de vitesse.

A. Contrôle d'accès

Dans cette approche, nous utilisons la loi de conservation définie dans (2) pour exprimer le débit d'accès, le lecteur pourra trouver plus de détail dans [17], [18], [19]. L'idée de base est de définir un débit d'accès pour lequel la densité du segment 1 du lien $L2$ ne dépasse pas une densité cible y_T . Le contrôle d'accès est lancé si la densité d'un segment notée ρ_X atteint y_T . Le débit d'accès est défini par l'équation suivante :

$$r(k) = \begin{cases} 1 & \text{si } \rho_X < y_T, \\ \max(0, \min(1, r1(k))) & \text{si } \rho_X \geq y_T \text{ et } \omega_{o2} < \omega_{o2}^*, \\ \frac{d_{o2}(k)}{Q_{cap}^2} & \text{si } \omega_{o2} \geq \omega_{o2}^* \text{ et } \rho_X \geq y_T \end{cases} \quad (15)$$

$$r1(k) = \frac{1}{Q_{cap}^{o2}} \cdot \left(L\lambda \frac{y_T - \rho_{L2,1}(k)}{T} - q_{L1,4}(k) + q_{L2,1}(k) \right)$$

où,

$$\rho_X = \begin{cases} \rho_{L2,1} & \text{ou,} \\ \rho_{L2,3} & \text{ou,} \\ \rho_{L3,1} \end{cases} \quad (16)$$

Comme la congestion est susceptible de se former au début dans le segment 1 du lien $L3$ (rétrécissement) ou le segment 1 du lien $L2$ (rampe d'entrée), nous avons choisi ρ_X égale à une de ces deux densités ou la densité du segment 3 du lien $L2$. Dans la section des résultats nous montrons les valeurs du TTP par rapport à chacun de ces choix.

B. Coordination du contrôle d'accès et de la limitation dynamique de la vitesse

Cette partie est consacrée à proposer une coordination entre le contrôle d'accès défini au dessus et la limitation dynamique de la vitesse dans un objectif de minimiser le TTP. En ce qui concerne le contrôle d'accès, nous appliquons les lois de commande définies au paragraphe III-A, avec $\rho_X = \rho_{L2,1}$. Pour définir la loi de commande de vitesse, nous jouons sur le terme d'anticipation, cette loi de commande est utilisée dans [18]. Dans ce cas de réseau, et pour les segments 2, 3, 4 du premier lien, nous définissons :

$$v_{L1,i,control}(k) = v_{m,i}(k) + \frac{T}{\tau} (V(\rho_{m,i}(k)) - v_{m,i}(k)) + \frac{T}{L} v_{m,i}(k) (v_{m,i-1}(k) - v_{m,i}(k)) - \frac{\nu T}{\tau L} \Omega_{L1,i}(k) \quad (17)$$

où,

$$\Omega_{L1,i}(k) = \frac{\rho_{L1,i+1}(k) - \rho_{L1,i}(k)}{\rho_{L1,i}(k) + \kappa} + Cste_i, \text{ for } i \in \{2, 3, 4\} \quad (18)$$

où $Cste_i$ est une constante pour laquelle le choix est libre.

L'idée est de choisir la bonne valeur de la constante $Cste_i$, donc de $\Omega_{L1,i}(k)$ pour le segment i , pour déterminer la vitesse de commande $v_{L1,i,control}(k)$ afin de réduire le TTP. La constante ici est positive et est choisie une seule fois pour toute la simulation, mais elle diffère d'un segment

à un autre. Pour les segments 2, 3 et 4, les constantes $Cste_i$ sont choisies positives. Cela signifie que pour ces segments la vitesse de contrôle est inférieure à celle qu'on y observerait si aucune limitation de vitesse n'était appliquée. Ainsi, ces faibles vitesses de contrôle permettent de limiter le flux de véhicules.

La limitation de vitesse n'est pas appliquée tout le temps. Elle est déclenchée par une certaine condition. Plusieurs simulations ont été réalisées avec une condition différente de déclenchement de la commande de vitesse. Cette condition peut être l'un des trois événements suivants :

- la longueur de la file d'attente atteint son maximum $\omega_{o2}^* = 150$ véh,
- la densité $\rho_{L2,3}$ franchit le seuil ρ_S ,
- la densité $\rho_{L3,1}$ franchit le seuil ρ_S

Ces choix viennent du fait que la congestion touche au début ces deux segments.

IV. RÉSULTATS DES SIMULATIONS

A. Scénario des demandes

Comme mentionné ci-dessus, nous considérons le réseau autoroutier de la figure 1. Ainsi, les paramètres du modèle sont choisis de la littérature et sont donnés par [13] : $\tau = 18$ s, $\kappa = 40$ véh/voie/km, $\nu = 60$ km²/h, $\rho_{max} = 180$ véh/voie/km, $\delta = 0.0122$, $\phi = 2.98$, $a = 1.867$, $\rho_{crit} = 33.5$ véh/voie/km, $v_f = 102$ km/h. Pour ces valeurs, nous obtenons pour le lien $L1$ une capacité par voie de $Q_{cap}^{o1} = 2000$ véh/h.

Le scénario des demandes est représenté sur la figure 2 : la demande de la section principale, à l'origine $o1$, a une valeur constante de 1000 véh/h pendant 20 minutes puis elle augmente à 4000 véh/h durant 40 minutes. Elle continue à augmenter pour atteindre 5150 véh/h pendant 10 minutes et reste constante pendant une durée d'une heure et demi. Finalement elle diminue à 4000 véh/h puis à 1000 véh/h. La demande de la rampe est constante égale à 500 véh/h pendant 10 minutes puis elle augmente pendant 50 minutes pour atteindre 1350 véh/h. Ensuite, elle reste constante pendant une heure et demi. Enfin, elle diminue à 500 véh/h.

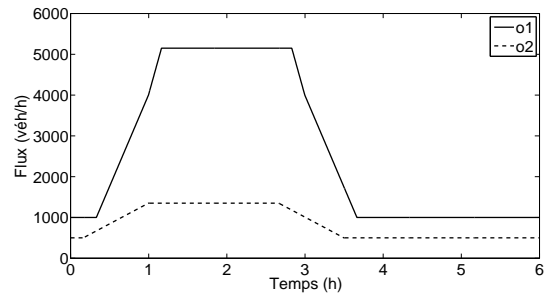


Fig. 2: Scénario de demandes

B. Résultats

Les demandes du scénario choisies sont trop fortes. Il est donc inévitable qu'une congestion se forme. Les simulations présentent les résultats obtenus lorsqu'aucune commande n'est appliquée et montrent ce qu'apporte le contrôle d'accès lorsqu'il est appliqué seul d'une part, et lorsqu'il est coordonné d'autre part.

donné avec les limitations variables de vitesse d'autre part. Le modèle METANET est utilisé pour présenter les résultats de simulation.

Les résultats du cas sans commande sont représentés sur la figure 3 : le rétrécissement présent au niveau du segment 1 du lien $L3$ et la rampe d'entrée présente au niveau du segment 1 du lien $L2$ sont les deux types de goulot d'étranglement. Leur présence peut provoquer, lorsque la demande est forte, des congestions. Au niveau du rétrécissement et quand le flux accédant au rétrécissement dépasse la capacité du rétrécissement, une congestion se forme. Pour cette raison, la densité croît d'abord dans le segment 1 du lien $L3$ qui correspond à une formation de congestion puis elle se propage en amont à travers tous les autres segments jusqu'au premier segment du lien $L1$ puis vers l'origine $o1$ où se crée une file d'attente importante qui atteint approximativement 3 500 véh. Quand la demande de l'origine $o1$ diminue à 1 000 véh/h, la file d'attente diminue et les densités restent constantes. À la fin, quand la file d'attente s'annule, la congestion se résorbe de l'amont vers l'aval et le réseau atteint sa stabilité et revient à son état fluide. Le TTP dans ce cas est de 12 707 véh-h.

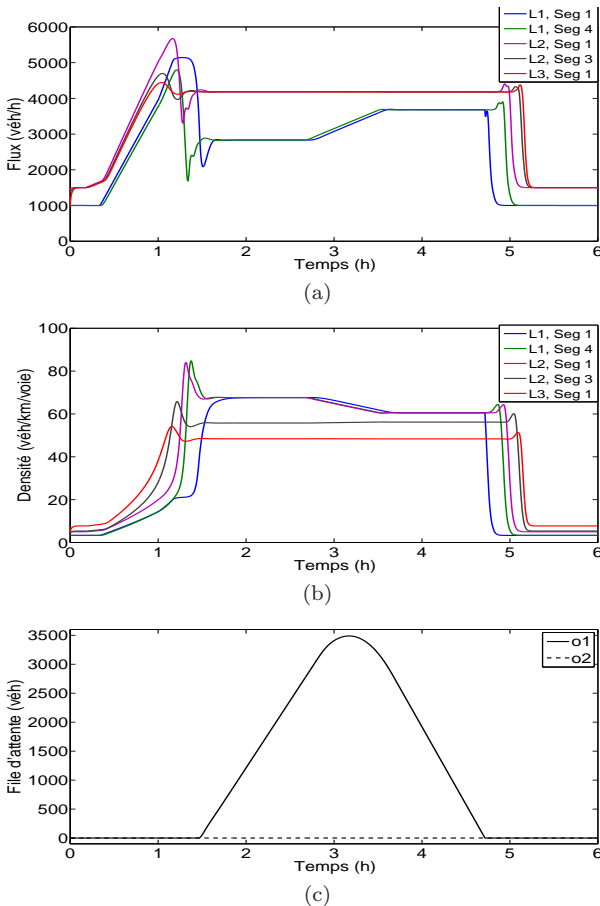


Fig. 3: Cas sans commande

Le tableau I résume les résultats de simulation du contrôle d'accès appliqué seul en fonction des densités ρ_X .

Les résultats sont proches, le meilleur résultat est obtenu pour $\rho_X = \rho_{L2,1}$, pour une densité cible $y_T = 18$ véh/voie/km. Donc, nous avons obtenu un meilleur résultat pour des mesures effectués au niveau de la rampe d'entrée.

TABLE I: TTP pour les différentes valeurs de y_T

Densité cible y_T	19	18	17
TTP pour $\rho_X = \rho_{L2,1}$ (véh-h)	12 632	12 620	12 656
amélioration (%)	0.59	0.7	0.40
TTP pour $\rho_X = \rho_{L2,3}$ (véh-h)	12 635	12 623	12 660
amélioration (%)	0.56	0.66	0.37
TTP pour $\rho_X = \rho_{L3,1}$ (véh-h)	12 640	12 628	12 665
amélioration (%)	0.52	0.62	0.33

Ainsi, pour une densité cible y_T égale à 18. Cette valeur correspond dans le diagramme fondamental à un flux de 1 600 véh/h, et à 4 800 véh/h pour les trois voies du lien $L2$. Comme le rétrécissement était la première cause d'apparition de congestion, il était évident pour réduire l'effet de cette congestion de garder le flux en amont du rétrécissement proche de la capacité du rétrécissement qui est de 4 000 véh/h pour 2 voies, ce qui explique la valeur 18 de la densité cible.

La figure 4 présente les courbes pour le meilleur résultat ($\rho_X = \rho_{L2,1}$, $y_T = 18$). Le contrôle d'accès, selon les courbes des flux, peut améliorer la situation du réseau et par conséquent réduire le TTP. Une amélioration remarquable des flux de sortie des segments en aval de la rampe, par exemple le flux du segment 1 du lien $L3$ atteint 4 400 véh/h. Le contrôle d'accès améliore le flux mais malheureusement cette augmentation ne dure pas longtemps à cause de la contrainte de la file d'attente au niveau de l'origine $o2$ qui ne peut pas dépasser les 150 véhicules. Dès que la file d'attente atteint son maximum, plus de véhicules sont autorisés à accéder à la section principale et la congestion devient inévitable.

De plus, les densités montrent que la densité au niveau du segment 1 du lien $L2$ se stabilise à $y_T = 18$ véh/voie/km jusqu'à que la file d'attente à l'origine $o2$ atteint sa valeur maximale ω_{o2}^* de 150 véhicules. Cette stabilisation de la densité à y_T ne dure pas longtemps à cause des fortes demandes. Quand la demande à l'origine $o1$ diminue à 1 000 véh/h, sa file d'attente décroît jusque sa disparition et par conséquent la disparition de la congestion. Le meilleur TTP dans ce cas est de 12 620 véh-h avec une amélioration de 0.7% par rapport au cas sans commande.

Le contrôle d'accès peut être couplé avec des limitations de vitesse. Dans notre cas, une limitation de vitesse est appliquée dans chacun des trois derniers segments du premier lien.

Les tableaux II, III et IV montrent les résultats vis-à-vis de l'amélioration du TTP. D'après ces tableaux et les tests de simulation effectués, le meilleur résultat est obtenu pour les deux densités, cible $y_T = 22$ et seuil $\rho_S = 26$ avec une amélioration de 3.04 % du TTP. Les vitesses de commande proposées aux conducteurs peuvent atteindre des valeurs faibles de l'ordre de 10 km/h, ce qui rend l'acceptation des conducteurs délicate. Ce problème peut être résolu en informant les conducteurs que la limitation de vitesse rentre dans l'intérêt de tous pour réduire le TTP et par conséquent réduire les retards dus à la congestion.

La loi de commande (équations (17) et (18)) nécessite

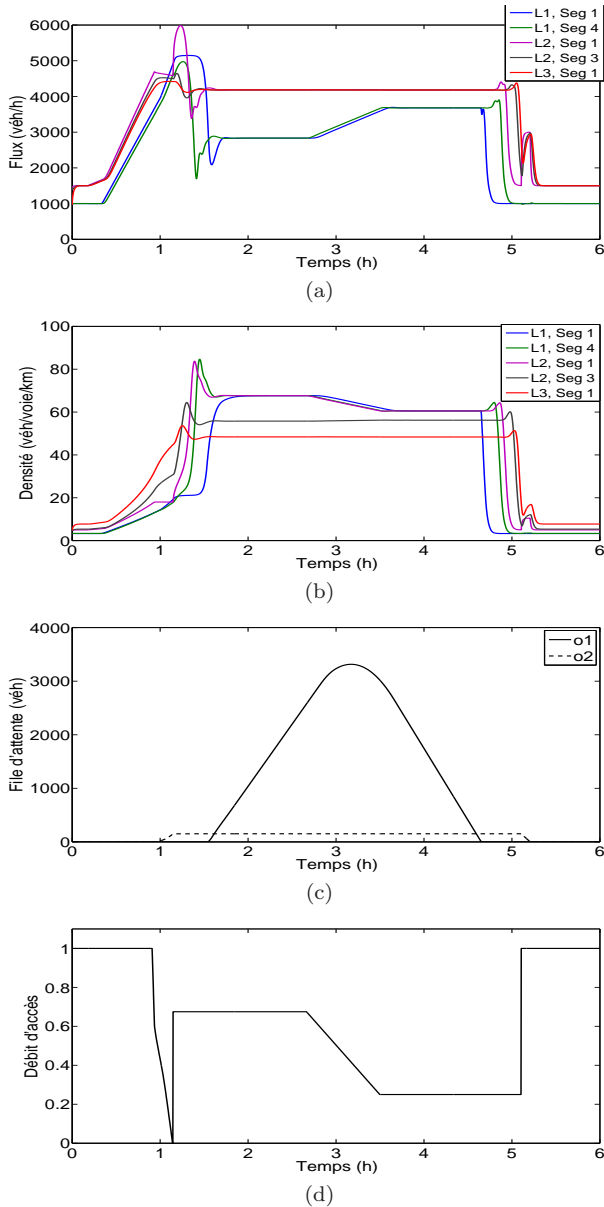


Fig. 4: Résultats du contrôle d'accès pour $y_T = 18$ et $\rho_X = \rho_{L2,1}$

d'attribuer des valeurs aux constantes $Cste_i$: nous sélectionnons aléatoirement 30 n-uplets. Pour chaque valeur de ρ_S , nous effectuons un test avec chaque n-uplet et nous conservons le n-uplet qui donne le meilleur résultat en terme de diminution de TTP. Le n-uplet qui donne le meilleur résultats est donné dans le tableau V.

La limitation dynamique de la vitesse montre son efficacité dans la réduction du TTP et sert comme complément du contrôle d'accès. Cette limitation permet de réduire les flux de sortie des segments où elle est appliquée et cause ainsi une faible densité dans le segment 1 du lien $L2$ qui permet ainsi d'améliorer le flux de sortie de la rampe pour atteindre la densité cible.

V. CONCLUSION

Nous avons appliqué dans cet article la coordination de la vitesse variable et du contrôle d'accès sur un réseau auto-

TABLE II: TTP pour les différentes valeurs de densité avec un déclenchement par rapport à la file d'attente

Densité cible y_T	17	16	15	14
TTP (véh-h)	12 410	12 601	12 810	13 032
amélioration (%)	2.34	0.84	-0.81	-2.56

TABLE III: TTP pour les différentes valeurs de densité $\rho_{L2,3}$

Densité cible y_T	21	21	22	22
Densité cible ρ_S	17	18	17	18
TTP (véh-h)	12 525	12 422	12 508	12 409
amélioration (%)	1.43	2.24	1.57	2.43

roucier particulier qui contient une rampe d'entrée et un rétrécissement. Le Temps Total Passé (TTP) par les conducteurs dans le réseau a été amélioré de 3.04% par rapport au cas sans commande. Le contrôle d'accès appliqué seul n'a permis d'obtenir qu'une amélioration de 0.7% par rapport au cas sans commande. La complexité de l'algorithme qui est basée que le terme d'anticipation rend son implémentation chose pas aisée. Nous pensons dans les travaux de recherche à venir de simplifier l'algorithme en gardant toujours son utilité dans l'objectif de réduction du TTP. Ainsi, les constantes devraient être calculées en fonction de l'état de trafic.

REMERCIEMENTS

Ce travail est financé par l'Union Européenne, l'état français et la région du Nord Pas-de-Calais (France).

RÉFÉRENCES

- [1] W. Yibing and M. Papageorgiou, "Local ramp metering in the case of distant downstream bottlenecks," *Intelligent Transportation Systems Conference, 2006. ITSC '06. IEEE*, pp. 426–431, Sept. 2006.
- [2] M. J. Cassidy and J. Rudjanakanoknad, "Increasing the capacity of an isolated merge by metering its on-ramp," *Transportation Research Part B : Methodological*, vol. 39, pp. 896–913, Dec. 2005.
- [3] C. Chen, Z. Jia, and P. Varaiya, "Causes and cures of highway congestion," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 21, no. 6, pp. 26–32, 2001.
- [4] 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, pp. 361–370, Sept. 1990.
- [5] M. Papageorgiou, H. Hadj-Salem, and F. Middelham, "ALINEA local ramp metering : Summary of field results," *Transportation Research Record*, vol. 1603, pp. 90–98, Jan. 1997.
- [6] T. Bellemans, B. De Schutter, and B. De Moor, "Models for traffic control," *Journal A*, vol. 43, no. 3–4, pp. 13–22, 2002.
- [7] 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.
- [8] M. Papageorgiou and A. Kotsialos, "Freeway ramp metering : An overview," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 3, pp. 271–281, 2002.
- [9] J. R. Scariza, *Evaluation of Coordinated and Local Ramp Metering Algorithm Using Microscopic Traffic Simulation*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Civil and Environmental Engineering, 2003.
- [10] R. C. Carlson, I. Papamichail, M. Papageorgiou, and A. Messmer, "Optimal motorway traffic flow control involving variable speed limits and ramp metering," *Transportation Science, submitted*, 2009.

TABLE IV: TTP pour les différentes valeurs de densité $\rho_{L3,1}$

Densité cible y_T	21	21	22	22
Densité cible ρ_S	25	26	25	26
TTP (véh-h)	12 388	12 324	12 391	12 321
amélioration (%)	2.51	3.01	2.48	3.04

TABLE V: Les valeurs des constantes pour les différents segments i

Segment i	2	3	4
$Cste_i$	49	63	68

- [11] S. Smulders, "Control of freeway traffic flow by variable speed signs," *Transportation Research Part B : Methodological*, vol. 24, pp. 111–132, Apr. 1990.
- [12] 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, pp. 185–209, June 2005.
- [13] 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.
- [14] A. Kotsialos, M. Papageorgiou, M. Mangeas, and H. Haj-Salem, "Coordinated and integrated control of motorway networks via non-linear optimal control," *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 10, pp. 65–84, Feb. 2002.
- [15] T. U. of Crete and A. Messmer, "METANET a simulation program for motorway networks," tech. rep., Technical University of Crete, Dynamic Systems and Simulation Laboratory and Dr.-Ing. A. Messmer, Mar. 2009.
- [16] M. Papageorgiou, E. Kosmatopoulos, and I. Papamichail, "Effects of variable speed limits on motorway traffic flow," *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2047, pp. 37–48, Dec. 2008.
- [17] B. Kamel, A. Benasser, and D. Jolly, "Ramp metering by limitation of density and queue length," *Intelligent systems and automation : 2nd Mediterranean Conference on Intelligent Systems and Automation (CISA'09)*, vol. 1107, pp. 283–288, 23–25 @mar 2009. Zarzis, Tunisia.
- [18] B. Kamel, A. Benasser, and D. Jolly, "Coordination of ramp metering and variable speed limits," *12th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems (CTS'09)*, pp. 606–611, Sept. 2009.
- [19] B. Kamel, A. Benasser, and D. Jolly, "Open-loop and closed-loop control for ramp metering in traffic flow," *16th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*, Sept. 2009.

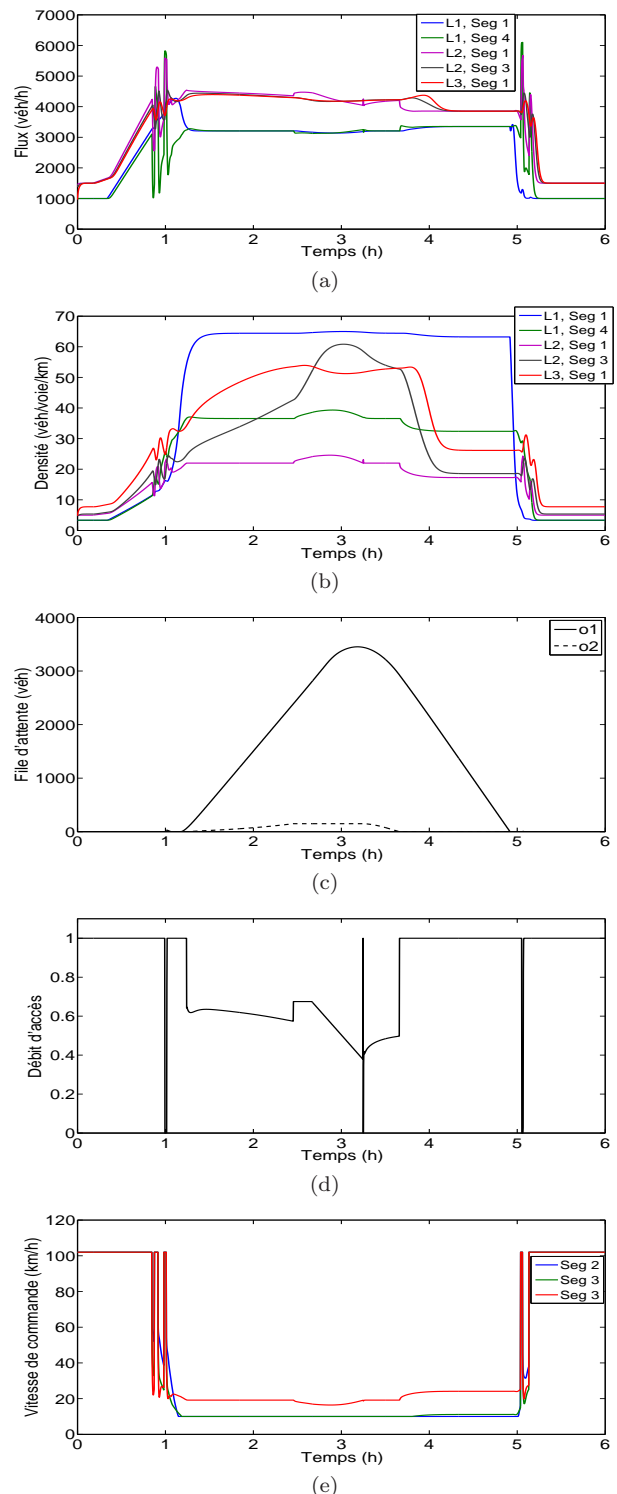


Fig. 5: Coordination du contrôle d'accès et de la limitation dynamique de la vitesse