



HAL
open science

Système de régulation dynamique de vitesse basé sur un contrôleur PID dans un environnement de trafic connecté

Eleonore Fauchet, Pierre-Antoine Laharotte, Kinjal Bhattacharyya,
Nour-Eddin El Faouzi

► To cite this version:

Eleonore Fauchet, Pierre-Antoine Laharotte, Kinjal Bhattacharyya, Nour-Eddin El Faouzi. Système de régulation dynamique de vitesse basé sur un contrôleur PID dans un environnement de trafic connecté. 20èmes Rencontres des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle, Jun 2022, Saint-Etienne, France. hal-03765436

HAL Id: hal-03765436

<https://hal.science/hal-03765436>

Submitted on 31 Aug 2022

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.

Système de régulation dynamique de vitesse basé sur un contrôleur PID dans un environnement de trafic connecté

E. Fauchet¹, P.A. Laharotte¹, K. Bhattacharyya¹, Nour-Eddin El Faouzi¹

¹ Univ Lyon, Univ Gustave Eiffel, ENTPE, LICIT-Eco7, F-69675 Lyon, France

Résumé

L'émergence des Véhicules Connectés (VCs) est associée à de nouvelles stratégies de régulation de trafic. Ce papier se focalise sur l'application d'un système de régulation dynamique de vitesse (VSL) dans un environnement connecté. Il est activé par des antennes de télécommunication en bord de route, et est mis en oeuvre grâce à un bouchon mobile -créé par deux VCs : un contrôleur et un agent asservi par un contrôleur PID- et non plus grâce aux VCs répartis sur le réseau. Cette méthode originale assure un contrôle effectif même à bas taux de pénétration des VCs.

Mots-clés

Systèmes de Transports Intelligents, Véhicules Connectés, Système de Régulation Dynamique de Vitesse, Bouchon mobile, Contrôleur PID

Abstract

The emergence of Connected Vehicles (CVs) is associated with new traffic control strategies. This paper focuses on the application of a Variable Speed Limit system (VSL) in a connected environment. It is activated by roadside telecommunication antennas, and is implemented through a moving bottleneck -created by two CVs : a controller and an agent controlled by a PID controller- rather than through the CVs distributed on the network. This original method ensures effective control even at low CV penetration rates.

Keywords

Intelligent Transport System, Connected Vehicles, Variable Speed Limit, Moving bottleneck, PID controller

1 Introduction

1.1 Contexte

La régulation du trafic vise à optimiser l'écoulement d'un flux de véhicules le long d'un ensemble d'infrastructures routières organisées en réseau. L'objectif consiste généralement à faire coïncider l'offre (la capacité de l'infrastructure) avec la demande locale (la quantité de véhicules en circulation) en limitant les congestions. Diverses stratégies ont été développées pour réguler les flux de trafic depuis le contrôle des flux par des feux de signalisation jusqu'à la régulation dynamique du nombre de voies. Un des objectifs de la régulation du trafic s'intéresse à limiter ou éliminer

la propagation d'une onde de congestion, qu'elle soit due à des incidents (accidents, mauvais temps, etc.) ou à des contraintes (goulot d'étranglement, voie d'insertion, etc.) sur le réseau. L'enjeu est de limiter les risques d'accident occasionnés à l'approche de ces mouvements d'accordéons (ondes de congestion) et d'optimiser les temps de parcours tout en réduisant la consommation de carburant. L'objectif suit 3 champs d'action : la sécurité, l'efficacité du trafic et l'environnement. Le principe de fonctionnement usuel consiste à détecter un événement sur le réseau, le caractériser et, si besoin, anticiper sa propagation spatiale et temporelle en vue d'appliquer une régulation adéquate en amont. Pour répondre à ce besoin, la stratégie usuelle et populaire consiste à détecter dynamiquement une onde de choc sur une voie rapide et à appliquer une limitation de vitesse aux véhicules en amont de la zone congestionnée. Dans la littérature, cette approche est appelée Régulation Dynamique des Vitesses, ou Variable Speed Limit (VSL) en anglais [10]. Avec le déploiement des Systèmes de Transports Intelligents et Connectés (C-ITS) et, par conséquent, des Véhicules Connectés (VAC), de nouveaux procédés de mise en oeuvre sont disponibles [18], notamment en tirant parti des VACs jouant le rôle de capteur-sonde du trafic et de moyen d'application de la stratégie. De telles approches utilisent les conditions courantes de trafic comme la vitesse ou le flux pour déterminer à quelle vitesse les conducteurs devraient rouler pour éviter la zone de ralentissement. On réduit, ainsi, le flux de véhicules arrivant dans cette zone pour prévenir la propagation de l'embouteillage, voire même le résoudre.

1.2 Etat-de-l'art

D'après Khondaker and Kattan [10], les premiers systèmes VSL sont basés sur une approche réactive, c'est-à-dire que leur déclenchement repose sur des valeurs seuils d'indicateurs de trafic présélectionnées et basées sur des connaissances expertes. Ce type de stratégie a démontré son efficacité pour homogénéiser les vitesses et stabiliser le trafic en réduisant les différences de vitesses entre les conducteurs. Elles permettent ainsi d'améliorer la sécurité sur le réseau. Leur limite principale réside dans leur délai de déclenchement. En effet, le temps que le système soit activé, les conditions de trafic sont souvent déjà trop dégradées pour qu'il puisse agir efficacement. Ainsi, les systèmes VSL basés sur une approche proactive et développés ensuite se fo-

calisent sur l'estimation de la propagation des états de trafic sur le réseau. [7] Ils utilisent des modèles (ex. : Model Predictive Control [9]) pour prédire les conditions de trafic futures et anticiper la propagation des ondes de choc dues à un incident plutôt que de réagir à celui-ci. En complément de ces approches proactives, se sont également développées des approches tirées de l'Intelligence Artificielle, notamment en s'appuyant sur l'Apprentissage par Renforcement (RL) [11]. Leur usage est particulièrement justifié pour identifier et déterminer la politique d'activation de la réduction de vitesse.

Par la suite, nous focalisons notre état de l'art sur la façon de mettre en œuvre, en pratique, la stratégie de régulation des vitesses. Dans un premier temps, les systèmes VSL basés sur une approche proactive ou RL reposaient sur les boucles électromagnétiques pour estimer les conditions de trafic actuelles du réseau, et sur les Panneaux à Messages Variables (PMVs) pour délivrer le contrôle et donner la limitation de vitesse. C'est le cas de l'algorithme du SPECIALIST développé par Hegyi et al. [7], [6]. Cependant, en plus de ne pas garantir des informations continues (du fait de leurs positions discrètes sur le réseau), la combinaison des boucles électromagnétiques et des PMVs n'assure un système de contrôle efficace que s'ils sont en grand nombre, ce qui occasionne un coût d'installation et de maintenance conséquent. Dans ce cadre et avec le développement des C-ITS, certaines études comme Kattan et al. [9] proposent de tirer profit des environnements connectés en utilisant des données collectées par les CVs en plus de celles issues des boucles afin de disposer d'une information continue le long du réseau et d'une réduction des coûts associés aux boucles en réduisant leur nombre. En revanche, le contrôle est toujours délivré par les PMVs. Puis, d'autres études comme Grumert and Tapani [4] ont proposé d'exploiter le potentiel d'un réseau de télécommunication non plus seulement pour collecter des données issues des VACs (en complément des boucles) et estimer les états de trafic, mais aussi pour délivrer le contrôle et imposer la limitation de vitesse grâce aux Unités de Bords de Route (UBR) et à la communication Infrastructure-Véhicule (I2V).

Dans le travail précédent [3], un système VSL reposant entièrement sur les VACs, les UBRs et la communication I2V pour estimer les états de trafic et délivrer le contrôle a été implémenté. Par opposition aux précédentes approches, dites Eulériennes car s'appuyant sur des boucles (ie capteurs localisés en un emplacement précis), cette approche est intégralement basée sur les indicateurs lagrangiens issus des VACs. Les trajectoires individuelles des VACs sont utilisées pour estimer et prédire les conditions de trafic sur le réseau de manière continue pour une meilleure activation du système VSL. Le potentiel de la communication apportée par les VACs et les UBRs est également exploité pour assurer un meilleur déclenchement de la limitation de vitesse tout en réduisant les coûts associés à l'utilisation des boucles et des PMVs. [3] montre qu'un tel système VSL satisfait des performances comparables avec un système VSL basé sur des indicateurs eulériens issus des boucles. Néanmoins, les performances du système tendent

à décroître pour de faibles taux de pénétration de CVs. Fort de ces conclusions, nous proposons d'explorer une nouvelle approche s'appuyant sur l'asservissement de deux véhicules connectés et automatisés en vue de créer un bouchon [12; 19] imposant la réduction de vitesse à l'ensemble des véhicules du flux de trafic en amont de la zone congestionnée. Cette stratégie est exposée par la suite et consiste à résoudre l'onde de choc en aval en créant un court intervalle avec une densité de véhicules nulle grâce à un bouchon mobile contrôlé.

Si les bouchons mobiles sont largement étudiés dans la littérature pour caractériser leur impact sur la capacité des routes [19] ou pour modéliser les véhicules lents (comme les transports publics) selon la théorie de l'écoulement du trafic [12], seules quelques études [5; 13; 16] les ont considérés comme une stratégie de régulation du trafic. Pourtant aucune n'a développé ou exploré la séquence complète du processus permettant de contrôler le trafic dans le contexte des Véhicules Connectés. La stratégie VSL basée sur les VC et les bouchons mobile proposée ci-dessous est une démarche VSL proactive, estimée à partir de considérations tirées de la théorie du trafic : l'approche SPECIALIST [7]. Néanmoins, cette même stratégie pourrait être appliquée en faisant appel à d'autres procédés de détection des ondes de congestion et d'autres politiques d'activation telles que celles générées par les approches d'Apprentissage par Renforcement.

1.3 Positionnement : VACs agissant comme un embouteillage mobile pour réguler le trafic

Si le potentiel de la communication I2V et des VACs pour l'élaboration de nouvelles stratégies de régulation de trafic a été montré, d'après Li et al. [14], le futur déploiement de seulement quelques Véhicules Automatisés et Connectés promet déjà le développement de nouvelles méthodes jusqu'alors irréalisables du fait de la faible compatibilité / réponse / obéissance de la conduite humaine. Ainsi, les VACs automatisés (VACs) agissant comme embouteillage mouvant sur une voie rapide peuvent être considérés comme agents de régulation de trafic. En effet, en contrôlant leur vitesse, on oblige les véhicules en amont à respecter cette limitation en les bloquant derrière un bouchon mobile.

Ce type de stratégie a déjà montré son potentiel pour réguler le trafic d'un réseau à une seule voie dans Han et al. [5], où un VAC (ou plusieurs VACs) qui freine(nt) en amont d'une zone de congestion permettent d'homogénéiser le trafic.

Également, dans Piacentini et al. [16], un seul VAC agissant en bouchon mobile est utilisé pour améliorer les conditions de trafic du réseau, et notamment, de sa voie présentant un goulot d'étranglement fixe. Sa vitesse est donc considérée comme variable de contrôle permettant de réguler les conditions de trafic en amont de la congestion grâce à un Modèle Prédicatif de Contrôle (MPC). Cette stratégie permet de réduire les émissions de carburant et les temps de parcours lorsqu'une congestion est observée. Les changements de voie des véhicules en amont potentiellement induits par le ralentissement du (ou des) VAC(s) ne sont, cependant, pas

considérés.

Ainsi, pour appliquer un système VSL sur une autoroute à 3 voies, Li et al. [13] propose d'utiliser une ligne de VACs agissant comme bouchon mobile sur les 3 voies. La formation de ce peloton en ligne est considérée possible grâce à la communication V2V mais son implémentation n'est ni précisée ni étudiée.

La principale contribution de ce papier consiste à développer une méthode, pour un segment d'autoroute à plusieurs voies (appliquée avec 2 voies), permettant d'assurer que 2 VACs se rejoignent et restent côte à côte pour former un bouchon mobile (de 2 VACs sur 2 voies) grâce à l'implémentation d'une boucle de contrôle PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) [8]. Ce procédé a, en effet, déjà montré son potentiel pour contrôler un peloton sur une voie et réguler la distance longitudinale entre deux véhicules -en donnant des consignes de vitesse à adopter au(x) véhicule(s) contrôlé(s) pour qu'il(s) conserve(nt) l'écart souhaité (et fixé) avec le(s) véhicule(s) aval(s) [2]. On l'utilise, donc, ici sur notre peloton latéral de 2 VACs en fixant l'écart (longitudinal) souhaité entre eux à 0m (pour qu'ils soient côte à côte). Tandis que le premier VAC, appelé contrôleur, fixe l'allure en suivant les consignes de vitesse fournies par l'Unité de Bord de Route (UBR) par le biais de la communication I2V; le second VAC, appelé agent, vise à rejoindre le contrôleur et à suivre son allure grâce aux instructions de vitesse provenant de l'implémentation de la boucle de contrôle PID. Dans ce contexte d'environnement connecté, on suppose que les VACs sont équipés de technologie V2X assurant la communication avec les UBRs et entre les VCs. Le contrôleur et son agent sont sélectionnés et appariés par l'UBR, puis communiquent via la technologie V2V pour déployer la stratégie VSL, alimenter la boucle de contrôle PID et se synchroniser pour se déplacer côte à côte, et pour agir ensemble comme un bouchon mobile. L'objectif sous-jacent serait donc ici de tirer profit de l'équipement et de la coopérativité des VACs pour une application originale du système VSL. La consigne n'est plus délivrée à l'ensemble des VACs disponibles sur le réseau routier, mais seulement à un sous-ensemble (ici une paire) de VACs soigneusement et automatiquement identifiés et sélectionnés par l'UBR. Cette dernière centralise les traces laissés par les Véhicules Connectés (VCs) pour identifier les ondes de choc, puis déclenche le processus VSL composé de quatre étapes principales : (i) calcul d'une solution pour déterminer la distance d'activation de la VSL, (ii) recherche d'un couple pertinent de VACs (contrôleur-agent), (iii) appariement et détermination du point de rencontre du contrôleur et de son agent, puis (iv) demande d'application des consignes de vitesse au contrôleur. Il est attendu de cette stratégie qu'elle assure un plus grand respect de la limitation de vitesse, même à faible taux de pénétration, en obligeant tous les véhicules en amont du bouchon mobile à respecter la consigne sans l'avoir directement reçue. On s'attend à observer des performances équivalentes pour tout scénario où le taux de pénétration est supérieur ou égal à 30%. Les performances pour des taux plus faibles sont, en effet, surtout sensibles à la solution de limitation de vi-

tesse qui peut être difficile à générer en raison de la faible quantité de trajectoires de VAC disponibles.

Les principales contributions de ce papier sont les suivantes :

- l'amélioration du processus de détection d'une onde de choc [3] inspiré de l'approche du SPECIALIST [7], mais seulement basé sur les traces laissées par les VACs : en particulier, un processus basé sur les écarts est introduit pour appliquer la stratégie VSL.
- l'introduction d'un processus de sélection pour identifier la paire pertinente de VACs utilisés comme régulateurs de trafic.
- l'introduction d'un processus basé sur un contrôleur PID pour faire se rejoindre 2 VACs côte à côte afin de générer un goulot d'étranglement mobile.

Le reste de ce document s'organise de la façon suivante : la section 2 présente la méthodologie employée, la section 3 expose les résultats obtenus, puis la section 4 discute les conclusions et perspectives de ces travaux.

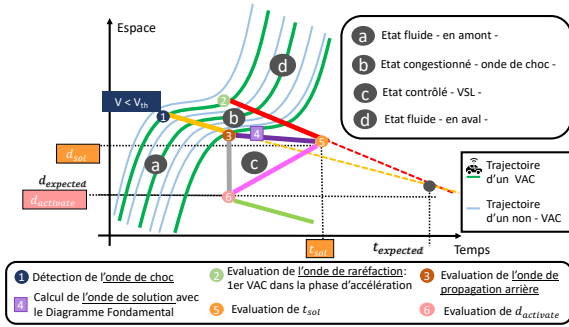
2 Méthodologie

2.1 Implémentation du système VSL : un processus en 3 étapes

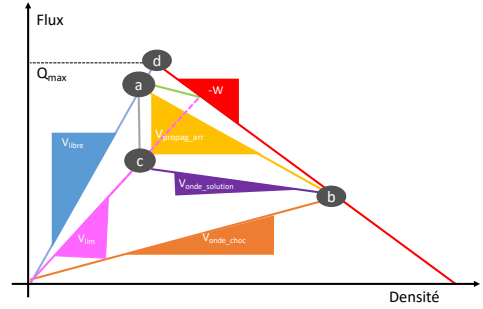
Comme illustré dans la Figure 1, le système VSL développé précédemment dans Fauchet et al. [3], appelé VSL-tous VCs est basé sur la théorie des ondes cinématiques selon l'approche traditionnelle de Lighthill-Whitham-Richard (LWR) [17] utilisée pour modéliser les dynamiques macroscopiques du trafic. Elle décrit la loi de conservation du flux ($\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x,t)}{\partial x} = 0$) au temps t et à la position x , et suppose qu'une relation forte existe entre le débit $q(x,t)$ et la densité $\rho(x,t)$. Cette relation, appelée diagramme fondamental, suit une courbe concave, simplifiée en triangle. Le système VSL-tous VCs est composé de 3 étapes principales :

- *L'étape 1* consiste à détecter une onde de choc sur le réseau grâce aux données issues des VACs, c'est-à-dire grâce à la vitesse et à la position de chaque VAC à chaque pas de temps. On considère qu'il y a propagation d'une onde de congestion sur le réseau quand i) au moins 3 VACs ont une vitesse inférieure à la vitesse seuil et que ii) le premier d'entre eux finit par atteindre une phase d'accélération (*a.k.a.* onde de raréfaction), délimitant ainsi la zone de congestion (niveaux 1 à 3 sur la Figure 1.a).
- *L'étape 2* consiste à trouver, si possible, une solution permettant de résoudre l'onde de choc. On cherche donc la distance et le temps d'application de la limitation de vitesse sur le réseau ($[d_{activate}, d_{end}]$, $[t_{deb}, t_{end}]$) (niveaux 4 à 6 sur la Figure 1.a).
- *L'étape 3* consiste à délivrer le contrôle en appliquant cette limitation de vitesse sur la distance et le temps calculés à l'étape 2.

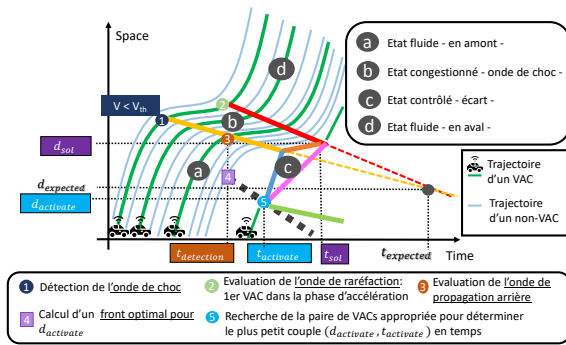
Dans la stratégie VSL-MB, un bouchon mobile (MB) est construit et utilisé comme régulateur de trafic. Il faut donc adapter légèrement le processus, comme l'illustre la figure 1.c&d. Si le processus de détection de l'onde de choc reste



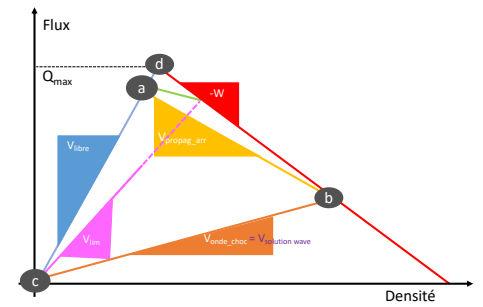
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 1 – Illustration des systèmes VSL basés sur la théorie des ondes cinématiques et inspirés par l’algorithme du SPECIA-LIST [7] : (a) Diagramme Espace-Temps et (b) Diagramme Fondamental de l’approche VSL-tous VCs versus (c) Diagramme Espace-Temps et (d) Diagramme Fondamental de l’approche VSL-MB

inchangé, sa résolution repose sur un écart créé entre les véhicules en aval et les VACs contrôlés. Selon la théorie des ondes cinématiques, les caractéristiques de l’espace à densité nulle, illustré par l’état C sur la Figure 1.c, résultent directement : (i) de la pente de l’onde de propagation arrière (ligne jaune), (ii) de la vitesse moyenne dans l’onde de choc (ligne orange), (iii) de la vitesse d’écoulement libre (ligne bleue) et (iv) de la limite de vitesse appliquée (ligne rose). À partir du temps de détection de l’onde de choc ($t_{detection}$), un front optimal de distances d’activation potentielles ($d_{activate}$) émerge et évolue avec le temps d’activation attendu. Le défi consiste alors à identifier les paires appropriées de VACs capables de coopérer afin de rouler côte à côte avant d’atteindre le front des distances d’activation. La paire de VACs ayant le temps d’activation le plus court ($t_{activate}$) doit être sélectionnée pour appliquer les instructions de limitation de vitesse à la distance $d_{activate}$.

Par la suite, pour des raisons de simplicité et de comparabilité des résultats entre les systèmes VSL, on suppose que l’étape de résolution de l’onde de choc (étape 2) est connue et partagée entre les systèmes VSL comparés (VSL-tous VCs et VSL-MB). Seule l’étape 3 diffère entre les systèmes VSL. Cela permet de supprimer l’impact de la stochasticité due au calcul des solutions en fonction de la position des véhicules connectés. Dans la section suivante, l’étude se concentre sur la principale contribution du système VSL-

MB, à savoir les performances du processus d’appariement des VACs en fonction du taux de pénétration. Au lieu d’imposer la limitation de vitesse à tous les VACs disponibles dans la zone d’activation, le système VSL-MB ne cible que deux VACs, capables de se synchroniser pour former un bouchon mobile et ainsi ralentir les véhicules situés en amont d’une section encombrée.

2.2 Application de la limitation de vitesse à 2 VACs côte à côte

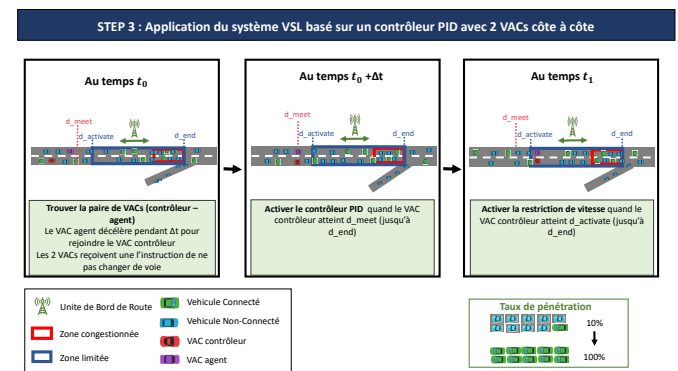


FIGURE 2 – Application de la limitation de vitesse à deux VACs côte à côte (contrôleur PID)

Comme décrit dans la Figure 2, cette troisième étape de notre système VSL se décompose en 3 sous-étapes :

1. Trouver le couple de VACs (contrôleur-agent) apte à se rapprocher côte à côte et à qui on appliquera la limitation de vitesse entre $d_{activate}$ et d_{end} .
2. Appliquer une boucle d'asservissement pour rassembler les deux véhicules de d_{meet} à d_{end} , un contrôle PID est appliqué au VAC agent pour qu'il reste côte à côte du VAC contrôleur
3. Appliquer la restriction de vitesse au VAC contrôleur de $d_{activate}$ à d_{end} .

2.3 Recherche du couple de véhicules (contrôleur-agent)

[h!] Comme illustré dans la Figure 3, le processus de sélection des deux VACs se déroule en 4 étapes :

1. *Construction de la liste de véhicules potentiels* : La liste des véhicules candidats au couple de VACs (contrôleur-agent) est établie. Pour appartenir à la liste, les véhicules doivent être des VACs et être en amont de $d_{activate}$.
2. *Sélection d'un couple de VACs (contrôleur-agent) test* : Le processus de sélection est opéré en déroulant la liste des couples candidats depuis les plus proches de la distance d'application de la réduction de vitesse $d_{activate}$. Pour un couple candidat donné, le VAC le plus en amont des deux est désigné comme étant le contrôleur et l'autre l'agent. C'est donc l'agent qui décélèrera pour rejoindre le contrôleur pendant que ce dernier ne changera pas sa vitesse. Également, le véhicule contrôleur doit être sur la voie de droite et l'agent sur celle de gauche. Si ce n'est pas le cas, la consigne de changer de voie leur est envoyée.
3. *Calcul du temps de décélération (Δt) à appliquer au VAC agent pour qu'il rejoigne le contrôleur*. Au temps t_0 , on a :
 - Position et vitesse du véhicule contrôleur : xc_0 et vc_0
 - Position et vitesse du véhicule agent : xa_0 et va_0
 Au temps $t_1 = t_0 + \Delta t$, on a :
 - Position et vitesse du véhicule contrôleur : xc_1 et vc_1
 - Position et vitesse du véhicule agent : xa_1 et va_1
 On cherche la position d_{meet} à laquelle les deux VACs seront côte à côte (si elle existe), soit $d_{meet} = xc_1 = xa_1$. Or on a :

$$xc_1 = xc_0 + vc_0 \Delta t$$

et

$$xa_1 = xa_0 + va_0 \Delta t - 1/2 f \Delta t^2$$

avec f la valeur de décélération. D'où :

$$xc_1 = xa_1$$

$$\Leftrightarrow -1/2 f \Delta t^2 + (va_0 - vc_0) \Delta t + xa_0 - xc_0 = 0 \quad (1)$$

On résout ce trinôme du second degré pour trouver le temps de décélération (s'il existe) Δt pour lequel les deux VACs auront la même position à t_1 .

4. *Calcul de la position où les deux VAC (contrôleur-agent) se rejoignent (d_{meet})* Si une solution positive existe pour Δt , alors on calcule d_{meet} avec :

$$d_{meet} = xc_0 + vc_0 \Delta t \quad (2)$$

Si d_{meet} est positive et inférieure ou égale à $d_{activate}$, alors notre couple candidat de VACs (contrôleur-agent) devient notre couple (contrôleur-agent). Sinon, on teste un autre couple test (contrôleur-agent) de la liste. S'il n'y a plus de véhicules à tester dans la liste de véhicules potentiels, on attend le pas de temps suivant et on reconstruit une nouvelle liste.

2.4 Application de la limitation de vitesse au VAC contrôleur et d'un contrôle PID au VAC agent

Une fois le couple contrôleur - agent trouvé, on applique :

1. *Un contrôle PID* au véhicule agent, entre d_{meet} et d_{end} , avec pour objectif de minimiser la distance entre les 2 VACs. le rôle du PID est double : (i) compenser l'écart entre les 2 VACs, et (ii) compenser les différences de vitesse entre les 2 VACs lorsqu'ils se rencontrent à d_{meet} et jusqu'à ce qu'ils atteignent d_{end} ;
2. *Une consigne de ne pas changer de voie* aux 2 VACs entre d_{meet} et d_{end}
3. *La limitation de vitesse* au véhicule contrôleur entre $d_{activate}$ et d_{end}

Un contrôleur Proportionnel Intégral Dérivé (PID) [8] est une boucle de contrôle fermée permettant d'appliquer une correction à une fonction de contrôle. On l'utilise ici pour contrôler l'espace entre le VAC contrôleur et le VAC agent. À chaque pas de temps, on mesure un terme d'erreur ($e(t)$) égal à la différence entre la distance souhaitée entre les deux VACs (valeur consigne SP) et la distance réelle (valeur mesurée $PV(t)$), on a donc

$$e(t) = SP - PV(t)$$

- . Trois composantes interagissent les unes avec les autres :
 - La composante Dérivée (D) basée sur la vitesse (dérivée) à laquelle l'action est prise pour atteindre l'instruction cible
 - La composante intégrale (I) basée sur l'impact cumulé (intégrale) des actions qui ont déjà été prises pour atteindre l'instruction cible
 - La composante Proportionnelle (P) proportionnelle au terme d'erreur

Pour calculer la valeur d'accélération/décélération à appliquer au véhicule agent, on applique le PID au terme d'erreur. On a donc :

$$u(t) = k_p * e(t) + k_i * \int_0^t e(t') dt' + k_d * \frac{\partial e(t)}{\partial t} \quad (3)$$

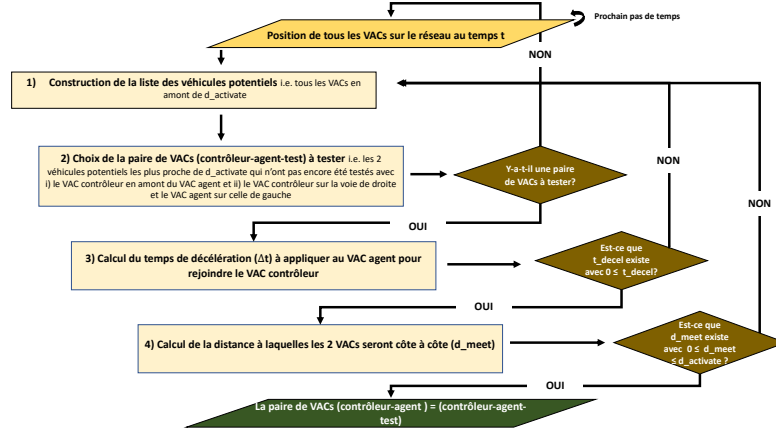


FIGURE 3 – Processus pour trouver le couple de véhicules (contrôleur-agent) qui seront côte à côte à qui on appliquera la limitation de vitesse

la fonction de contrôle, au pas de temps t , avec k_p , k_i et k_d les coefficients des termes proportionnel, intégral et dérivé. On utilise la méthode de Ziegler Nichols [1; 20] pour calibrer ces constantes. On ne considère que l'action proportionnelle qu'on augmente jusqu'à ce que le signal en sortie de la boucle fermée $u(t)$ oscille de manière stable et régulière. Le but est de trouver K_u le gain maximum et T_u la période d'oscillation de la boucle fermée. On applique notre PID à 2 VACs sur un réseau pour qu'ils restent côte à côte en ne considérant que la composante proportionnelle que l'on augmente jusqu'à ce que la valeur d'accélération à appliquer au VAC agent oscille de manière régulière et stable. On part de $K_u = 0.005$ et on obtient $K_u = 0.020$ et $T_u = 73.8s$. Puis, on calcule les constantes du PID avec :

$$k_p = 0.3 * K_u$$

$$k_i = 1.2 * K_u / T_u$$

$$k_d = 3 * K_u * T_u / 40$$

3 Résultats

Une fois le contrôleur PID calibré, notre approche (VSL-MB) est prête à être évaluée et comparée à une stratégie VSL alternative (VSL-tous VCs). L'analyse est réalisée grâce à simulateur de trafic microscopique, appelé SUMO [15], et capable de reproduire le comportements de conduite (latéral et longitudinal) d'un usager de la route et ses interactions avec l'environnement. Ce simulateur est composé de plusieurs couches de composants qui interagissent les uns avec les autres : (i) la couche environnement décrivant la configuration de la route et la demande de trafic, (ii) la couche agent comprenant des caractéristiques liées à tout agent actif, des conducteurs et voitures jusqu'au gestionnaire de la route, (iii) la couche capteur, et (iv) la couche communication. La couche de communication (V2X, I2V) est développée en Python et fonctionne via une architecture client/serveur basée sur TCP, appelée Traffic Control Interface (TraCI). À chaque étape, les données sur l'état du véhicule sont collectées par SUMO à l'aide de

TraCI. Ensuite, de nouvelles instructions peuvent être données, basées sur différentes logiques VSL, pour modifier l'état actuel du véhicule au cours du même pas de temps.

3.1 Scénario considéré

Le réseau considéré est décrit dans la Figure 2, il s'agit d'une portion de 11km d'une autoroute à deux voies comprenant une voie d'insertion au 9e km. Ici, l'analyse porte uniquement sur la manière de délivrer le contrôle VSL, la solution de limitation de vitesse est donc fixée, pour tous les scénarios, à la solution trouvée lorsque l'environnement est complètement connecté (taux de pénétration de 100%). On fixe donc $[d_{activate}, d_{end}]$, $[t_{deb}, t_{end}]$. Pour la solution de limitation de vitesse fixée, on considère différents scénarios avec un taux de pénétration de VACs (Market Penetration Rate en anglais ou MPR) variant de 0% (scénario de référence avec un environnement non connecté et donc sans aucun contrôle) à 100% (environnement entièrement connecté). Pour couvrir les cas de trafic mixte avec un environnement plus ou moins connecté, le MPR prend les valeurs discrètes suivantes (20%, 30%, 50%, 75%, 100%).

3.2 Performances de ce système

Pour les différents taux de pénétration considérés et pour les deux méthodes d'application du système VSL, on obtient les résultats suivants :

- Les temps de parcours moyens des véhicules observés sur le réseau en secondes (Table 1)
- Les diagrammes espace-temps pour MPR = 0%, MPR = 30% et MPR = 100% (Figure 4)
- Les indicateurs de déclenchement de la limitation de vitesse dans le cas de l'approche basée sur les 2 VACs formant un bouchon mobile avec $d_{triggering}$ la distance entre $d_{activate}$ et d_{meet} et Δt le temps pour que les deux véhicules se rejoignent côte à côte (Tableau 2).

Les deux applications du système VSL montrent, pour tous les scénarios considérés, une réduction des temps de parcours moyens des véhicules par rapport au scénario de référence sans contrôle (MPR=0%) (Table 1). Dans le cas de

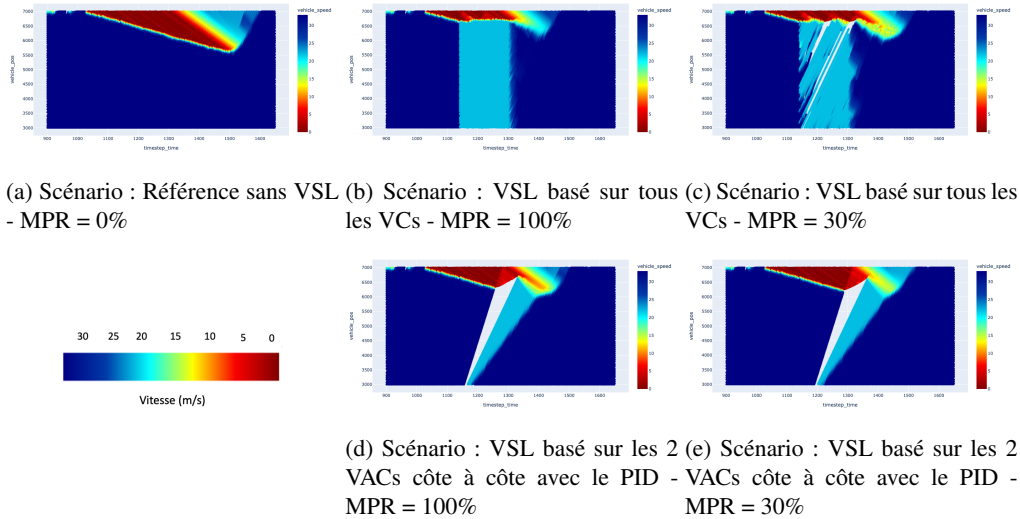


FIGURE 4 – Diagrammes espaces-temps en fonction de l’application de la restriction de vitesse

TABLE 1 – Temps de parcours moyens (ATT) des véhicules en fonction de l’application du système VSL et du taux de pénétration (MPR)

ATT(s)	0%	100%	75%	50%	30%	20%
VSL-tous VCs	112	95	96	100	101	101
VSL-MB	112	103	104	104	105	105

TABLE 2 – Indicateurs pour le déclenchement de la limitation de vitesse dans le cas de l’approche basée sur les 2 VACs formant un bouchon mobile avec $d_{triggering}$ la distance entre $d_{activate}$ et d_{meet} et Δt le temps pour que les deux véhicules se rejoignent côte à côte

MPR	100%	75%	50%	30%	20%
$d_{triggering}$ (m)	39	77	77	499	376
Δt (s)	0	15	15	21	26

l’application de la limitation de vitesse à tous les VACs du réseau (VSL-tous VCs), le gain de temps de parcours moyen (ATT) par véhicule par rapport à la situation de référence diminue de 6s entre MPR=100% (17s) et MPR 30% (11s), et dans le cas de la VSL basée sur les 2 VACs avec le contrôleur PID, le gain de temps moyen ne diminue que de 2s entre MPR=100% (9s) et MPR 30% (7s). Il est intéressant de noter que, comme prévu, le VSL basé sur le CV MB avec PID fournit des performances plus stables (écart-type - StD = 0,84) avec les variations du taux de pénétration du marché que l’approche originale (StD = 2,88).

En outre, la figure 4 illustre les performances des approches de limitation de vitesse variable basées sur tous les VCs du réseau et sur les 2 VACs pour résoudre l’onde de choc. Elle met particulièrement en évidence :

- la stabilité des performances de l’approche introduite en ce qui concerne le taux de pénétration des VACs;
- les différences de mise en œuvre entre les deux ap-

proches VSL (VSL-tous VCs et VSL-MB) : alors que l’approche basée sur tous les VCs aura un impact immédiat sur l’onde de choc, certains retards sont observés dans l’approche VSL-MB en raison du temps écoulé pour créer un écart comme le montre 2 avec Δt le délai nécessaire pour que les 2 VACs soient côte à côte et $d_{triggering}$ la distance à parcourir avant le déclenchement de la restriction de vitesse. Cela pourrait expliquer les avantages limités de l’approche basée sur les 2 VACs en ce qui concerne les gains en temps de parcours, puisque nous avons calculé dans cette étude la distance d’activation pour résoudre l’onde de choc selon les résultats de l’approche basée sur tous les VCs.

4 Conclusions et Perspectives

Nous avons introduit dans cet article une nouvelle approche, appelée VSL-MB, et dédiée à l’application du VSL pour amortir les ondes de choc. Cette approche consiste à former un embouteillage mobile en maintenant côte à côte deux Véhicules Automatisés et Connectés (VACs) en utilisant un contrôleur PID. L’objectif est de créer un espace entre les VACs contrôlés et les véhicules en aval afin de briser la propagation d’une onde de choc de congestion en aval. La principale contribution réside dans la mise en œuvre de la stratégie s’appuyant sur la communication V2I pour diffuser l’information, tandis que le PID est construit pour assurer la décélération d’un VAC afin de construire le front mobile et assurer sa stabilité jusqu’à ce qu’il atteigne la zone congestionnée. Un tel processus d’implémentation permet d’assurer un contrôle stable par rapport au taux de pénétration des CAVs.

Les performances de la méthode introduite sont comparées à celles d’une approche alternative [3]. Comme prévu, une forte amélioration en termes d’homogénéité des temps de parcours, lorsque le taux de pénétration des VACs varie, est mise en évidence avec la nouvelle approche. Cependant, les

avantages absolus en termes de temps de parcours sont réduits dans cette étude, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que la distance d'activation du VSL a été optimisée pour la référence [3] afin d'éviter les stochasticités dues au calcul de la solution. En outre, le processus de sélection de la paire de CAV est construit sur l'hypothèse qu'un seul véhicule est contrôlé pour décélérer et atteindre son partenaire. Une telle hypothèse restreint l'espace des solutions disponibles et peut affecter négativement les performances.

Les travaux futurs pourraient se concentrer sur :

- améliorer et évaluer la méthodologie basée sur les 2 VACs formant un bouchon mobile pour définir correctement la distance et le temps d'activation ;
- explorer des algorithmes alternatifs pour rechercher une paire appropriée de VACs en relâchant les hypothèses sur les actions disponibles prises par les VACs contrôlés (pour que les 2 VACs se rejoignent plus rapidement, le contrôleur peut accélérer en même temps que l'agent décélère) ;
- introduire la consommation de carburant dans le critère lié au processus de fusion des deux VACs afin de limiter la surconsommation pour l'agent suivant le contrôleur.

Références

- [1] H. O. Bansal, R. Sharma, and P.R. Shreeraman. PID controller tuning techniques : A review. *Journal of Control Engineering and Technology*, 2 :10, 2012.
- [2] S. Dasgupta, V. Raghuraman, A. Choudhury, T.N. Teja, and J. Dauwels. Merging and splitting maneuver of platoons by means of a novel pid controller. In *2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, pages 1–8, 2017.
- [3] E. Fauchet, K. Bhattacharyya, P.A. Laharotte, and N.E. El Faouzi. A variable speed limit strategy based on lagrangian traffic indicators resulting from connected vehicles : Application to the SPECIALIST algorithm. *Transportation Research Board Conference Proceedings*, 2022.
- [4] E.F. Grumert and A. Tapani. Using connected vehicles in a variable speed limit system. *Transportation Research Procedia*, 27 :85–92, 2017.
- [5] Y. Han, D. Chen, and S. Ahn. Variable speed limit control at fixed freeway bottlenecks using connected vehicles. *Transportation Research Part B : Methodological*, 98 :113–134, 2017.
- [6] A. Hegyi and S.P. Hoogendoorn. Dynamic speed limit control to resolve shock waves on freeways - field test results of the SPECIALIST algorithm. In *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pages 519–524. IEEE, 2010.
- [7] A. Hegyi, S.P. Hoogendoorn, M. Schreuder, H. Stoelhorst, and F. Viti. SPECIALIST : A dynamic speed limit control algorithm based on shock wave theory. In *2008 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pages 827–832. IEEE, 2008.
- [8] M.A. Johnson and M.H. Moradi. *PID control*. Springer, 2005.
- [9] L. Kattan, B. Khondaker, O. Derushkina, and E. Poo-sarla. A probe-based variable speed limit system. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 19(4) : 339–354, 2015.
- [10] B. Khondaker and L. Kattan. Variable speed limit : an overview. *Transportation Letters*, 7(5) :264–278, 2015.
- [11] K. Kušić, E. Ivanjko, M. Gregurić, and M. Miletić. An overview of reinforcement learning methods for variable speed limit control. *Applied Sciences*, 10(14), 2020.
- [12] L. Leclercq, S. Chanut, and J.B. Lesort. Moving bottlenecks in lighthill-whitham-richards model : A unified theory. *Transportation Research Record*, 1883 (1) :3–13, 2004.
- [13] Z. Li, X. Zhu, X. Liu, and X. Qu. Model-based predictive variable speed limit control on multi-lane free-ways with a line of connected automated vehicles. In *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, pages 1989–1994. IEEE, 2019.
- [14] Z. Li, M.W. Levin, R. Stem, and X. Qu. A network traffic model with controlled autonomous vehicles acting as moving bottlenecks. In *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 1–6. IEEE, 2020.
- [15] P.A. Lopez, M. Behrisch, L. Bieker-Walz, J. Erdmann, Y.P. Flötteröd, R. Hilbrich, L. Lücken, J. Rummel, P. Wagner, and E. Wießner. Microscopic traffic simulation using sumo. In *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 2575–2582. IEEE, 2018.
- [16] G. Piacentini, P. Goatin, and A. Ferrara. Traffic control via moving bottleneck of coordinated vehicles. *IFAC-PapersOnLine*, 51(9) :13–18, 2018.
- [17] P.I. Richards. Shock waves on the highway. *Operations research*, 4(1) :42–51, 1956.
- [18] F. Vrbanić, E. Ivanjko, K. Kušić, and D. Čakija. Variable speed limit and ramp metering for mixed traffic flows : A review and open questions. *Applied Sciences*, 11(6), 2021.
- [19] X. Wei, C. Xu, W. Wang, M. Yang, and X. Ren. Evaluation of average travel delay caused by moving bottlenecks on highways. *Plos one*, 12(8), 2017.
- [20] J. G. Ziegler and N. B. Nichols. Optimum settings for automatic controllers. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 115(2) :220–222, 1993.