

Prolégomènes à une régulation sans modèle du trafic autoroutier

First steps towards a model-free control of a freeway traffic flow

Hassane ABOUAÏSSA¹, Michel FLIESS², Violina IORDANOVA³, Cédric JOIN^{4,5}

¹Univ. Lille Nord France, 59000 Lille, France
U-Artois, LGI2A (EA 3926)
Technoparc Futura, 62400 Béthune, France.
hassane.abouaissa@univ-artois.fr

²LIX (CNRS, UMR 7161), École polytechnique
91228 Palaiseau, France
Michel.Fliess@polytechnique.edu

³DRIEA IF/DiRIF/SAR/DIET/UTER
2-6 rue Olof-Palme, 94000 Créteil, France
Violina.Iordanova@developpement-durable.gouv.fr

⁴CRAN (CNRS, UMR 7039), Nancy-Université
BP 239, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy, France.
cedric.join@cran.uhp-nancy.fr

⁵Équipe NON-A, INRIA Lille – Nord-Europe, France

Résumé— On propose pour la régulation d'accès autoroutier, système non linéaire complexe, la nouvelle *commande sans modèle*. Plusieurs simulations numériques valident notre approche, simple à mettre en œuvre et robuste aux perturbations.

Abstract— The regulation of freeway traffic flow, which is a complex nonlinear system, is achieved via the newly introduced *model-free control*. Several computer simulations are validating our control strategy, which is easy to implement and shows good robustness properties with respect to perturbations.

Mots-clés— Systèmes de transport intelligents, trafic autoroutier, contrôle d'accès, commande sans modèle, correcteurs PI intelligents.

Keywords— Intelligent transportation systems, freeway traffic flow, ramp metering, model-free control, intelligent PI controllers.

I. INTRODUCTION

Avec

- une circulation automobile dense sur les *Voies Rapides Urbaines*, *VRU* en abrégé, durant les heures de pointe, et sur les axes autoroutiers pendant les départs massifs en vacances,
- la difficulté de construire aujourd'hui de nouvelles infrastructures dans les villes, et autour,

la régulation du trafic autoroutier semble la meilleure, sinon la seule, solution pour éliminer, ou du moins atténuer, les congestions (voir, par exemple, [22], [30], [34]). Citons parmi les actions les plus utilisées :

- Les panneaux à messages variables pour la limitation dynamique de vitesse, le routage et l'information des conducteurs.
- Le contrôle d'accès [32], considéré comme le plus prometteur. On agit alors sur les débits d'entrées des bretelles afin de maintenir les densités du trafic sur la voie principale au-dessous d'une certaine valeur critique.

La littérature sur le trafic routier grossit chaque jour (voir, par exemple, [25] pour une excellente synthèse en français). Plusieurs revues scientifiques s’y consacrent entièrement, ou presque. Il n’est donc guère surprenant que de nombreuses variantes de ces techniques de contrôle aient vu le jour¹ :

- L’algorithme *Demande/Capacité*, ou *DC*, introduit en [39] il y a près de cinquante ans et très utilisé aux États-Unis, est une technique en boucle ouverte, assez sensible aux perturbations. La stratégie *Taux d’Occupation* [26], analogue, se fonde sur l’estimation du taux d’occupation du flux d’entrée.
- D’autres études sont plus proches de l’automatique « habituelle », comme :
 - l’algorithme linéaire quadratique (voir, par exemple, [19]), et d’autres techniques d’optimisation (voir, par exemple, [40]) ;
 - la stratégie de régulation *ALINEA*², due à Papageorgiou, Haj-Salem et Blosseville [33] (voir [37] pour d’autres versions), est exploitée en France et dans d’autres pays ;
 - la commande par retour d’état (voir, par exemple, [21]), la commande prédictive (voir, par exemple, [4], [16]), la commande robuste (voir, par exemple, [7]), et les techniques LMI (voir, par exemple, [23]) ;
 - les systèmes experts, réseaux de neurones ou commande floue (voir, par exemple, [17], [41]).

À l’exception notable d’*ALINEA*, basé sur un modèle linéaire très (trop?) simplifié, ces travaux naviguent entre deux écueils, redoutables, qui obèrent les performances :

- L’écriture de modèles mathématiques précis, est une tâche difficile, voire impossible. En raison de la grande échelle des réseaux autoroutiers, les modèles macroscopiques actuels ([24], [35], [36]) sont loin de donner entière satisfaction, car ils peinent à prendre en compte les comportements des conducteurs, l’hétérogénéité du trafic, les conditions météorologiques, . . .
- Lourdeur et difficulté des calibrages et/ou des apprentissages.

Cette communication introduit une nouvelle approche, reposant sur la *commande sans modèle*, due à deux des auteurs ([9], [10], [11]). Elle fournit une excellente régulation, sans modélisation mathématique ni calibrage et apprentissage.

Après un bref rappel au § II de la commande sans modèle, les § III et IV décrivent respectivement son application au contrôle d’accès et de multiples simulations numériques, de bon aloi, obtenues avec des données réelles. La conclusion du § V trace quelques pistes de réflexion.

Remerciements. Travail sous l’égide de la convention d’étude, intitulée « Application de la commande sans modèle au contrôle d’accès », entre, d’une part, la Direction des Routes d’Île-de-France (DiRIF) et, d’autre part, l’École polytechnique. Le système de régulation, qui y est décrit, a fait l’objet d’une demande de brevet (n° FR1151604), déposée le 28 février 2011, par l’École polytechnique, l’Université Henri Poincaré (Nancy 1), l’Université d’Artois et le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).

¹La liste ci-dessous n’a aucune prétention d’exhaustivité.

²Acronyme d’*Asservissement LINéaire d’Entrée Autoroutière*.

II. QUELQUES RAPPELS SUR LA COMMANDE SANS MODÈLE

On remplace ([9], [10], [11]) le modèle mathématique, inconnu, du système, supposé, pour simplifier, mono-variable, d’entrée u et de sortie y , par un modèle « phénoménologique », le plus souvent du premier ordre [11], dit *ultra-local* car valable sur un court laps de temps,

$$\dot{y} = F + \alpha u \quad (1)$$

où

- le paramètre constant α , fixé par l’opérateur afin que les valeurs numériques de αu et \dot{y} aient même ordre de grandeur, n’a pas *a priori* de valeur précise ;
- F , qui contient toutes les informations « structurales », dépend de toutes les autres variables du système, y compris des perturbations, et de leurs dérivées.

L’estimation en temps réel de la valeur numérique de F , qui permet de réactualiser (1) à chaque instant, est possible selon l’une des deux méthodes suivantes :

- l’estimation de la dérivée du signal bruité y ([9], [10]), telle que, par exemple, proposée en [12], [28]³ ;
- l’estimation paramétrique de [13], [14]⁴, en supposant F constant par morceaux [11].

On introduit ([9], [10], [11]) le correcteur *proportionnel-intégral intelligent*, ou *iPI*,

$$u = - \frac{F - \dot{y}^* + K_P e + K_I \int e}{\alpha} \quad (2)$$

où

- y^* est la trajectoire de référence de la sortie,
- $e = y - y^*$ est l’erreur de poursuite,
- K_P, K_I sont les gains usuels d’un correcteur PI.

On se ramène ainsi à la stabilisation d’un intégrateur pur. D’où un réglage immédiat des gains, ce qui tranche avec les correcteurs PI traditionnels.

Remarque 1 : Renvoyons à [11] pour des références complémentaires, en particulier sur les nombreuses applications déjà réussies.

III. CONTRÔLE D’ACCÈS AUTOROUTIER

A. Principes généraux

Pour améliorer la capacité et la fluidité de l’autoroute représentée par la figure 1, le contrôle d’accès vise à maintenir la densité ρ_s (en nombre de véhicules/km/voie) sur la section principale à une valeur inférieure ou égale à un seuil défini par la densité critique ρ_{cr} . Ce contrôle agit, à l’aide de feux de signalisation, sur le débit d’entrée de la rampe q_r , exprimé en nombre de véhicules/h. D’autres précautions doivent être prises, comme la prévention d’une file d’attente w , en nombre de véhicules, débordant sur les voies adjacentes.

Le contrôle d’accès peut être

- implanté localement : c’est une commande isolée, indépendante des autres accès ;

³Ces dérivations numériques ont déjà été utilisées avec succès en divers domaines, dont le trafic [1] et la dynamique de véhicules (voir, par exemple, [38])

⁴Déjà utilisée en trafic [2].

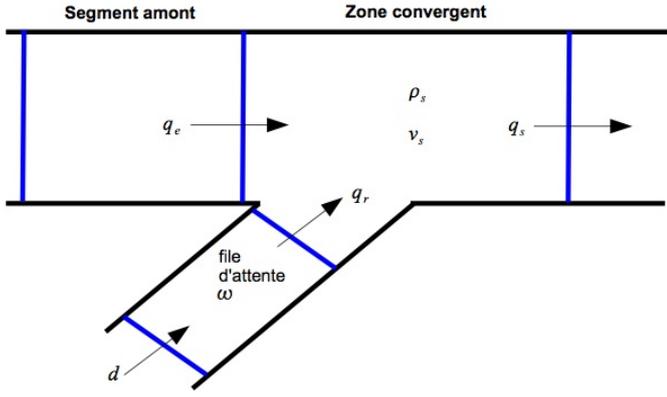


Fig. 1. Principe du contrôle d'accès autoroutier

- coordonné pour commander plusieurs rampes simultanément [25].

Ici, nous nous limitons à un contrôle isolé, atténuant les congestions.

B. Trafic sans modèle

(1) devient :

$$\dot{\rho}_s(t) = F(t) - \beta r(t) \quad (3)$$

où

- β remplace α ,
- la commande $r(t)$, qui vérifie $r_{min} \leq r \leq r_{max}$, représente le débit autorisé à entrer sur la voie principale⁵.

Elle est calculée grâce au correcteur iPI (2) :

$$r(t) = \frac{1}{\beta} \left[-[F]_e + \dot{\rho}^* + K_P e + K_I \int e \right] \quad (4)$$

où

- ρ^* est la trajectoire de référence,
- $e = \rho_s - \rho^*$ est l'erreur.

L'expression

$$[F(k)]_e = [\dot{\rho}_s(k)]_e - \beta r(k-1)$$

où

- le temps, noté k , est discrétisé,
- $[\bullet]_e$ indique une estimée de \bullet ,

fournit une estimée de F .

Remarque 2 : Comme avec la plupart des stratégies mises en pratique, nul besoin ici de modèles macroscopiques⁶ [24], [36] dont l'écriture, délicate, fait appel à des équations aux dérivées partielles. ALINEA est un régulateur intégral au sens classique. L'iPI (4) prend mieux en compte la complexité du trafic grâce au terme estimé $[F]_e$.

C. Mise en œuvre

Le schéma 2 de commande comporte, comme le montre la figure 3, trois principaux éléments :

⁵Si la rampe n'est pas contrôlée, $r = 1$.

⁶Ce type de modèles, basé sur trois variables principales : densité, débit et vitesse, est le mieux adapté pour décrire un réseau autoroutier de grande taille [31].

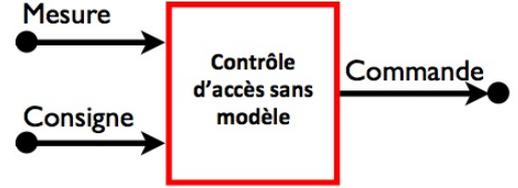


Fig. 2. Schéma général entrées-sortie de la commande

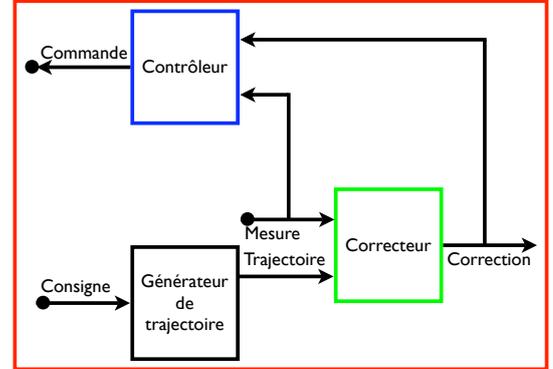


Fig. 3. Principaux éléments de la commande

1. Un générateur de trajectoires afin de relier le point de départ, connu, à celui d'arrivée, désiré. On y emploie des méthodes standard d'analyse numérique, comme les splines, les polynômes de Bézier, ...

2. Un correcteur de type (4) assure la poursuite de la trajectoire désirée ρ^* . On règle très aisément les gains K_P et K_I grâce au modèle ultra-local (3) du premier ordre. La stabilité ainsi obtenue permet de ne pas se soucier d'erreurs, comme celles provenant de l'estimation $[F]_e$ de F .

3. Les objectifs du boîtier contrôleur sont :

- Estimer F . La cadence assez faible de l'échantillonnage nous fait préférer un filtre dérivateur élémentaire pour estimer la dérivée d'un signal bruité.
- Réaliser la dynamique du correcteur décrit plus haut. Un dispositif de saturation, comme dans toute installation industrielle, prévient des changements trop brutaux de la commande, dus à de grandes perturbations. On y adjoint, bien entendu, un dispositif anti-emballement⁷.

IV. ILLUSTRATIONS NUMÉRIQUES

A. Généralités

La photo 4 montre la portion d'autoroute A4Y, dans le sens Paris-province, étudiée ci-bas. Nos simulations utilisent le programme *METANET* [30], basé sur un modèle macroscopique du second ordre. Il y a 4 voies avec une distance entre la station RAD⁸ et le point d'insertion de l'accès égale à 406 m. La distance entre le feu de signalisation, qui est l'actionneur, et le point d'intersection est de 102 m. La rampe d'accès est à 2 voies. Les paramètres utilisés pour les simulations, c'est-à-dire la densité critique, le paramètre a et la vitesse libre, sont issus du diagramme

⁷ *Anti-windup*, en anglais.

⁸ Acronyme de *Recueil Automatique de Données*.



Fig. 4. Photo du site étudié

fondamental de May [27] :

$$V(\rho) = v_f \exp\left(-\frac{1}{a} \left(\frac{\rho}{\rho_{cr}}\right)^a\right)$$

Le tableau ci-dessous, où ρ_{max} indique la densité maximale, à l'arrêt, en donne les valeurs, obtenues en ligne avec les

TABLE I
PARAMÈTRES DE SIMULATION

ρ_{cr}	29.5 veh/km/voie
ρ_{max}	180 veh/km/voie
v_f	100.1 km/h
a	2.997

techniques algébriques de [1].

Lors de nos simulations, la durée du cycle est égale à $C = 40$ secondes, avec une durée de feux vert et d'orange de 35 secondes au maximum. La durée minimum du rouge est donc de 5 secondes, en fonctionnement normal. Ces durées, utilisées par les exploitants, semblent appropriées puisqu'elles minimisent les arrêts sur les rampes. Les usagers avancent constamment dans la file d'attente jusqu'au feu [6]. Ainsi, les contraintes suivantes sont prises en compte :

- Durée du cycle : 40 secondes.
- $\text{Vert}_{min} = 15$ secondes (10 secondes de vert + 5 secondes d'orange), soit $r_{min} = 0.375$.
- $\text{Vert}_{max} = 35$ secondes (30 secondes de vert + 5 secondes d'orange), soit $r_{max} = 0.875$.

Notons r_{csm} la durée du rouge, issue de notre commande sans modèle :

1. Si $r_{csm} > r_{max}$ alors $r = 1$. Escamotage du rouge (la durée du vert est égale à celle du cycle).
2. Si la contrainte de longueur de file d'attente est activée, alors $r = 1$ (passage au vert).

B. Premiers résultats

Les figures 5-(a) et 5-(b), montrent l'évolution des demandes aux origines, section principale et rampe d'accès, entre 5 et 22 heures, afin d'englober l'ensemble des congestions de la journée. Les mesures sont pauvres et passablement bruitées. Les figures 6-(a) et 6-(b) montrent l'évolution des densités ainsi que celle des vitesses, dans le cas sans commande, et avec la commande sans modèle. Durant les heures de pointes, entre 7 h 30 et 10 h 30 environ, ainsi qu'entre 15 h 30 et 20 h 30, on remarque de fortes congestions, dues à une demande importante. Alors, la commande sans modèle arrive à stabiliser la densité autour de la valeur critique. Elle améliore donc sensiblement

le rendement de la section étudiée. La figure 8 montre l'évolution de la commande r en fonction du temps. Cette

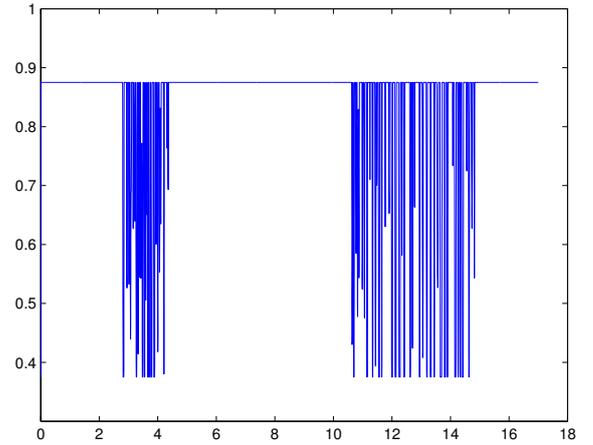


Fig. 7. Signal de commande

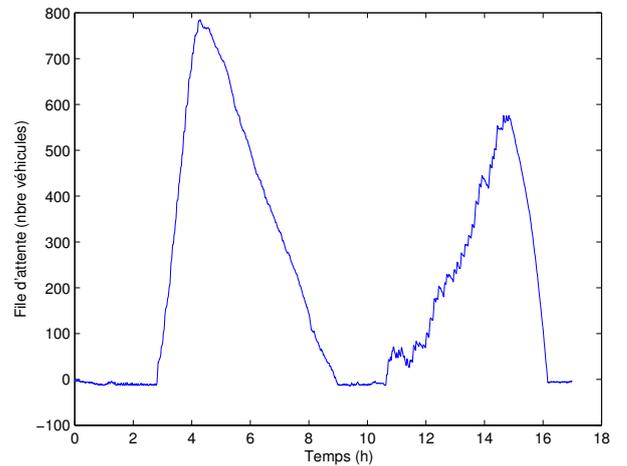
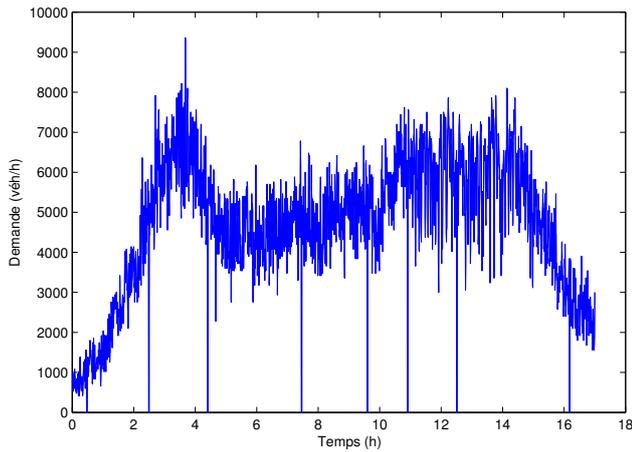


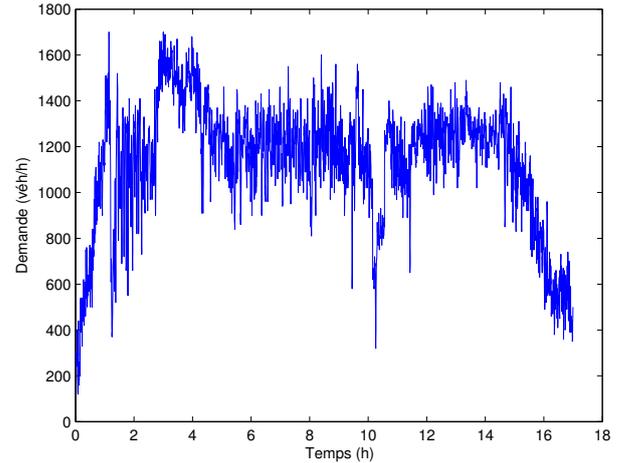
Fig. 8. Evolution de la file d'attente

commande implique la formation d'une file d'attente. On l'évite en fixant un seuil critique de longueur de la file et/ou en implantant un autre régulateur de file d'attente. Celui-ci délivrerait une valeur notée r_w de commande. La commande finale R serait, alors,

$$R = \max[r, r_w]$$

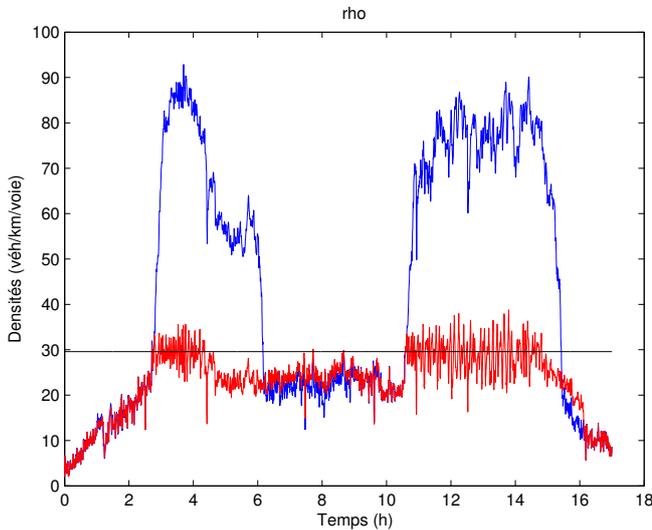


(a) Demande à l'origine de la section principale

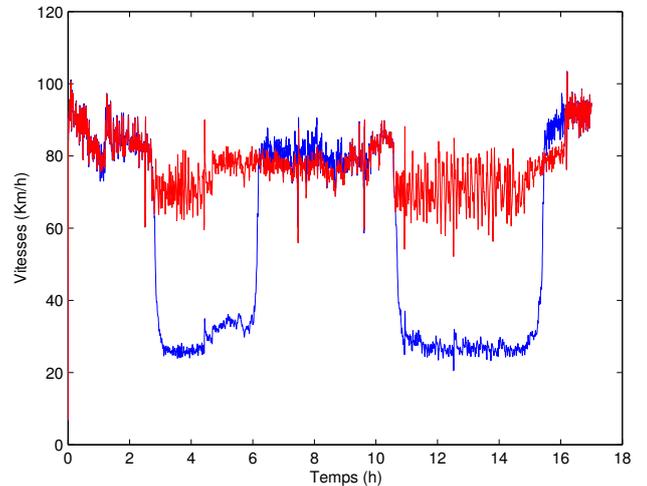


(b) Demande à l'origine de la rampe d'accès

Fig. 5. Demandes mesurées aux origines



(a) Evolution des densités (— : sans commande, — : avec commande)



(b) Evolution des vitesses (— : sans commande, — : avec commande)

Fig. 6. Evolutions des grandeurs du flux de trafic

C. Comparaison avec ALINEA

Ci-dessous, dans le tableau de comparaison avec ALINEA, évoqué au § I, TTS et CSM désignent respectivement le temps total passé et notre commande sans modèle. Le gain est éloquent.

TABLE II
COMPARAISONS POUR L'A4Y ENTRE 5 ET 22 HEURES

Critères	ALINEA	CSM	Gain
TTS veh * h	2308	1959	15.2%
V _{moy} km/h	63.23	75.02	18.6%

V. CONCLUSION

À la différence de la plupart des autres, notre stratégie, comme souligné au § I et dans la remarque 2,

- fait fi d'une description mathématique aussi complète que possible ;
- est facile à régler ;

- est capable de prendre en compte les variations, souvent importantes et brutales, contrairement, semble-t-il, à ALINEA.

Ces travaux préliminaires, qui aboutissent à des simulations de qualité, ont tenu leur promesse.

Reprenons une discussion abordée en [20] et [11]. Les équations aux dérivées partielles jouent un rôle important dans maintes études théoriques portant sur une modélisation macroscopique fine du trafic routier (voir, par exemple, [8], reposant sur la physique statistique, et sa bibliographie), son comportement qualitatif (voir, par exemple, [5] et sa bibliographie), et la régulation (voir, par exemple, [3]). Ici aussi, à la lumière de nos résultats, un contraste frappant ou, peut-être même, une opposition franche avec notre point de vue se manifestent. L'avenir tranchera !

On mènera dans de prochains travaux une comparaison plus poussée avec les stratégies existantes, d'abord avec celles implantées sur le terrain. Quant aux développements

en cours, théoriques et pratiques, de notre approche, le dépôt tout récent de notre brevet⁹ nous empêche d'en dire plus, malheureusement.

RÉFÉRENCES

- [1] H. ABOUAISSA, M. FLIESS, V. IORDANOVA, C. JOIN, « Vers une caractérisation non linéaire d'un réseau autoroutier », *3^{es} J. Identif. Modélisation Expérimentale*, Douai, 2011 (accessible sur <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00572818/fr/>).
- [2] H. ABOUAISSA, M. FLIESS, C. JOIN, « Fast parametric estimation for macroscopic traffic flow model », *17th IFAC World Congress*, Seoul, 2008 (accessible sur <http://hal.archives-ouvertes.fr/inria-00259032/fr/>).
- [3] L. ALVAREZ, R. HOROWITZ, P. LI, « Traffic flow control in automated highway systems », *Control Engin. Practice*, t. 7, p. 1071-1078, 1999.
- [4] T. BELLEMANS, B. DE SCHUTTER, B. DE MOOR, « Model predictive control for ramp metering of motorway traffic: A case study », *Control Engin. Practice*, t. 14, p. 757-767, 2006.
- [5] S. BLANDIN, D. WORK, P. GOATIN, B. PICCOLI, A. BAYEN, « A general phase transition model for vehicular traffic », *SIAM J. Appl. Math.*, t. 71, 2011.
- [6] M. BOUKHNIFER, H. HAJ-SALEM, « Evaluation opérationnelle de la régulation d'accès sur les autoroutes de l'IDF basée sur la stratégie ALINEA », *6^e Conf. Internat. Francoph. Automat.*, Nancy, 2010.
- [7] Y.-H. CHIANG, J.-C. JUANG, « Control of freeway traffic flow in unstable phase by H_∞ theory », *IEEE Trans. Intel. Transport. Systems*, t. 9, p. 193-208, 2008.
- [8] D. CHOWDHURY, L. SANTEN, A. SCHADSCHNEIDER, « Statistical physics of vehicular traffic and some related systems », *Physics Rep.*, t. 329, p. 199-329, 2000.
- [9] M. FLIESS, C. JOIN, « Commande sans modèle et commande à modèle restreint », *e-STA*, t. 5 (n° 4), p. 1-23, 2008 (accessible sur <http://hal.archives-ouvertes.fr/inria-00288107/fr/>).
- [10] M. FLIESS, C. JOIN, « Model-free control and intelligent PID controllers: towards a possible trivialization of nonlinear control? », *Proc. 15th IFAC Symp. System Identif.*, Saint-Malo, 2009 (accessible sur <http://hal.archives-ouvertes.fr/inria-00372325/fr/>).
- [11] M. FLIESS, C. JOIN, S. RIACHY, « Rien de plus pratique qu'une bonne théorie : la commande sans modèle », *JN-JD-MACS*, Marseille, 2011 (accessible sur <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00581109/fr/>).
- [12] M. FLIESS, C. JOIN, H. SIRA-RAMÍREZ, « Non-linear estimation is easy », *Int. J. Modelling Identification Control*, t. 4, p. 12-27, 2008 (accessible sur <http://hal.archives-ouvertes.fr/inria-00158855/fr/>).
- [13] M. FLIESS, H. SIRA-RAMÍREZ, « An algebraic framework for linear identification », *ESAIM Control Optimiz. Calc. Variat.*, t. 9, p. 151-168, 2003.
- [14] M. FLIESS, H. SIRA-RAMÍREZ, « Closed-loop parametric identification for continuous-time linear systems via new algebraic techniques », in H. Garnier & L. Wang (Eds): *Identification of Continuous-time Models from Sampled Data*, Springer, 2008, p. 362-391.
- [15] H. HAJ-SALEM, « Etude en simulation de la régulation d'accès généralisé sur le réseau autoroutier Est de l'Île-de-France », *Rap. convention INRETS/SIER*, 2002
- [16] A. HEGYI, B. DE SCHUTTER, H. HELLEDOORN, « Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed limits », *Transport. Research C*, t. 13, p. 185-209, 2005.
- [17] F.S. HO, P. IOANNOU, « Traffic flow modeling and control using artificial neural networks », *IEEE Control Systems*, t. 16, p. 16-26, 1996.
- [18] Z. HOU, J.-X. XU, J. YAN, « An iterative learning approach for density control of freeway traffic flow via ramp metering », *Transport. Research C*, t. 16, p. 71-97, 2008.
- [19] L. ISAKSEN, H.J. PAYNE, « Suboptimal control of linear systems by augmentation with application to freeway traffic regulation », *IEEE Trans. Automat. Contr.*, t. 18, p. 210-219, 1973.
- [20] C. JOIN, G. ROBERT, M. FLIESS, « Vers une commande sans modèle pour aménagements hydroélectriques en cascade », *6^e Conf. Internat. Francoph. Automat.*, Nancy, 2010 (accessible sur <http://hal.archives-ouvertes.fr/inria-00460912/fr/>).
- [21] P. KACHROO, K. KRISHEN, « System dynamics and feedback control design problem formulations for real time ramp metering », *Trans. Soc. Design Process Sci.*, t. 4, p. 37-54, 2000.
- [22] A. KOSTIALOS, M. PAPAGEORGIOU, « Motorway network traffic control systems », *Europ. J. Operat. Research*, t. 152, p. 321-333, 2004.
- [23] A. LEMARCHAND, J.J. MARTINEZ, D. KOENIG, « Smooth switching H_∞ PI controller for local traffic on-ramp metering, an LMI approach », *18th IFAC World Congress*, Milan, 2011.
- [24] M.H. LIGHTHILL, G.B. WHITHAM, « On kinetic waves-II. A theory of traffic flow on long crowded roads », *Proc. Royal Society*, t. A229, p. 317-345, 1955.
- [25] S. MAMMAR (sous la direction de), *Systèmes de transport intelligents : Modélisation, information et contrôle*. Hermès-Lavoisier, 2007.
- [26] D.P. MASHER, D.W. ROSS, P.J. WONG, P.L. TUAN, H.M. ZEIDLER, S. PERACEK, « Guidelines for design and operating of ramp control systems », *Stanford Research Instit.*, 1975.
- [27] A.D. MAY, *Traffic Flow Fundamentals*, Prentice-Hall, 1990.
- [28] M. MBOUP, C. JOIN, M. FLIESS, « Numerical differentiation with annihilators in noisy environment », *Numer. Algor.*, t. 50, p. 439-467, 2009.
- [29] J.M. MORIN, « Etude du feu optimal en un accès contrôlé », *Rapport IRT*, 1981.
- [30] PAPAGEORGIOU M. *Applications of automatic control concepts to traffic flow modeling and control*. Springer, 1983.
- [31] M. PAPAGEORGIOU, « Some remarks on macroscopic traffic flow modelling », *Transport. Research*, t. 32, p. 323-329, 1998.
- [32] M. PAPAGEORGIOU, C. DIAKAKI, D. DINOPOULOU, A. KOSTIALOS, Y. WANG, « Review of road traffic control strategies », *IEEE Trans. Intelligent Transport. Syst.*, t. 91, p. 2043-2067, 2003.
- [33] M. PAPAGEORGIOU, H. HADJ-SALEM, J.-M. BLOSSEVILLE, « ALINEA: A local feedback control law for on-ramp metering », *Transp. Res. Record*, n° 1320, p. 58-64, 1991.
- [34] M. PAPAGEORGIOU, A. KOSTIALOS, « Freeway ramp metering: An overview », *IEEE Trans. Intel. Transport. Systems*, t. 3, p. 271-281, 2002.
- [35] H.J. PAYNE, « Models of traffic and control », in G.A. Bekey (Ed.): *Mathematical Models of Public Systems*, La Jolla: Simulation Council, n° 1, p. 51-61, 1971.
- [36] P.I. RICHARDS, « Shock waves on the highway », *Operations Research*, t. 4, p. 42-51, 1956.
- [37] E. SMARAGDIS, M. PAPAGEORGIOU, « A series of new local ramp metering strategies », *Transport. Research B*, t. 38, p. 251-270, 2004.
- [38] J. VILLAGRA, B. D'ANDRÉA-NOVEL, M. FLIESS, H. MOUNIER, « A diagnosis-based approach for tire-road forces and maximum friction estimation », *Control Engin. Practice*, t. 19, p. 174-184, 2011 (accessible sur <http://hal.archives-ouvertes.fr/inria-00533586/fr/>).
- [39] J. A. WATTLEWORTH, « System demand capacity analysis on the inbound gulf freeway », *Texas Transportation Institute Rept.*, p. 24-81, 1964.
- [40] L.S. YUAN, J.B. KREER, « Adjustment of freeway ramp metering rates to balance entrance ramp queues », *Transport. Research*, t. 5, p.127-133, 1971.
- [41] H.M. ZHANG, S.G. RITCHIE, R. JAYAKRISHNAN, « Coordinated traffic-responsive ramp control via nonlinear state feedback », *Transport. Research C*, t. 9, p. 337-352, 2001.

⁹Voir les remerciements en fin du § I.