

La commande > du trafic autoroutier

Michel Fliess, Hassane Abouaïssa, Violina Iordanova, Cédric Join

▶ **To cite this version:**

Michel Fliess, Hassane Abouaïssa, Violina Iordanova, Cédric Join. La commande > du trafic autoroutier. Flash X - La revue scientifique de l'Ecole polytechnique, 2012, 14, pp.25-28. hal-00741547

HAL Id: hal-00741547
https://hal.science/hal-00741547

Submitted on 13 Oct 2012

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.

La commande « sans modèle » du trafic autoroutier

Michel FLIESS
Laboratoire d'Informatique de l'École Polytechnique (LIX)
UMR CNRS - EP 7161

Hassane ABOUAISSA
LGI2A Université Lille Nord

Violina IORDANOVA
DRIEA IF/DiRIF/SAR/DIET/UTR

Cédric JOIN
CRAN Université de Nancy
UMR CNRS 7039

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.

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.

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, 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. 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 jour :

▶ L'algorithme Demande/Capacité, ou DC, introduit 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, 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 et d'autres techniques d'optimisation ;
- la stratégie de régulation ALINEA[1], due à Papageourgiou, Haj-Salem et Blosseville, est exploitée en France et dans d'autres pays ;
- la commande par retour d'état, la commande prédictive, la commande robuste, et les techniques LMI ;
- les systèmes experts, réseaux de neurones ou commande floue.

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 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 article introduit une nouvelle approche, reposant sur la commande « sans modèle ». Elle fournit une excellente régulation, sans modélisation mathématique ni calibrage et apprentissage.

Après un bref rappel de la commande sans modèle, les paragraphes suivants décrivent respectivement son application au contrôle d'accès et de multiples simulations numériques, de bon aloi, obtenues avec des données réelles. La conclusion trace quelques pistes de réflexion.

Quelques rappels sur la commande sans modèle

On remplace[2] le modèle mathématique, inconnu, du système, supposé, pour simplifier, monovariable, d'entrée u et de sortie y, par un modèle « phénoménologique »,

[1] Acronyme d'Asservissement LINéaire d'Entrée Autoroutière.

le plus souvent du premier ordre, 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 « structurelles », 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 ;
- l'estimation paramétrique, en supposant F constant par morceaux.

On introduit 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.

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.

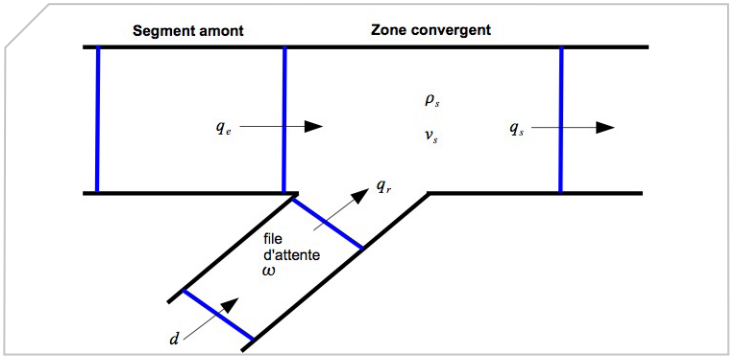


Figure 1. Principe du contrôle d'accès autoroutier

Le contrôle d'accès peut être implanté localement : c'est une commande isolée, indépendante des autres accès, ou coordonné pour commander plusieurs rampes simultanément.

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 principale[3].

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 macroscopiques dont l'écriture, délicate, fait appel à des équations aux dérivées partielles.

[2] Renvoyons pour plus de détails à la communication « Rien de plus utile qu'une bonne théorie : la commande sans modèle », signée par M. Fliess, C. Join, S. Riachy (4es Journées Doctorales/ Journées Nationales GDR MACS, Marseille, 2011 – accessible à partir de http://hal-Polytechnique.archives-ouvertes.fr/hal-00581109). On y trouvera en particulier les références des nombreuses applications concrètes déjà réussies dans les domaines les plus divers.
[3] Si la rampe n'est pas contrôlée, $r = 1$.
[4] Anti-windup, en anglais.

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 :

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-emballement[4].

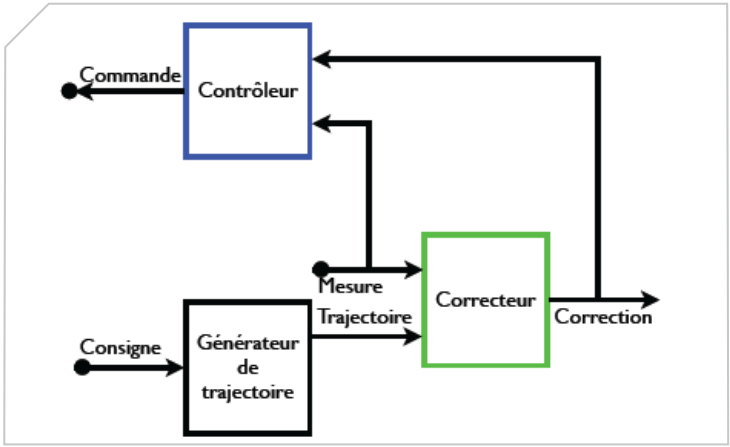


Figure 3. Principaux éléments de la commande



Figure 4. Photo du site étudié

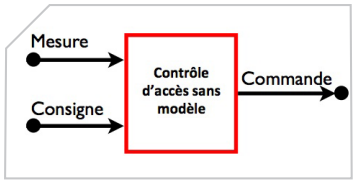


Figure 2. Schéma général entrées-sortie de la commande

Illustrations numériques

A. Généralités

La photo 4 montre la portion d'autoroute A4Y, dans le sens Paris-province, étudiée ci-dessous. 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 RAD[5] 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 fondamental, dit de May :

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

Le tableau ci-dessous, ou ρ_{max} indique la densité maximale, à l'arrêt, en donne les valeurs, obtenues en ligne avec les techniques algébriques de [1].

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

Le tableau ci-dessous, où ρ_{max} indique la densité maximale, à l'arrêt, en donne les valeurs, obtenues en ligne avec les techniques algébriques de [1].

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

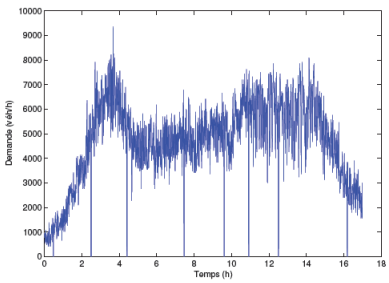
Lors de nos simulations, la durée du cycle est égale à C = 40 secondes, avec une durée de feux vert et d'orange de 35 secondes au maximum. La durée minimum du rouge est donc de 5 secondes, en fonctionnement normal. Ces durées, utilisées par les exploitants, semblent appropriées puisqu'elles minimisent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

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

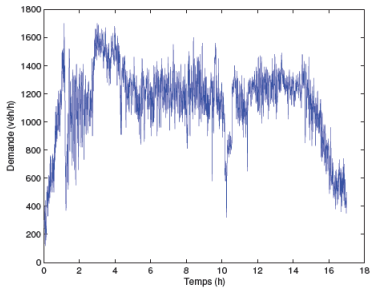
Notons r_{csm} la durée du rouge, issue de notre commande sans modèle :
1. Si $r_{csm} > r_{max}$ alors r = 1. Escamotage du rouge (la durée du vert est égale à celle du cycle).
2. Si la contrainte de longueur de file d'attente est activée, alors r = 1 (passage au vert).

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

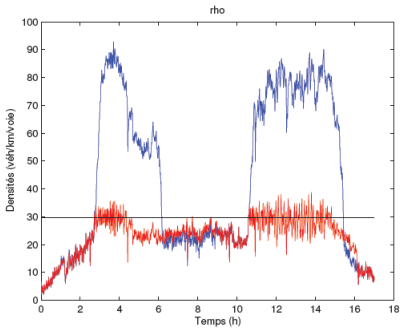


(a)Demande à l'origine de la section principale

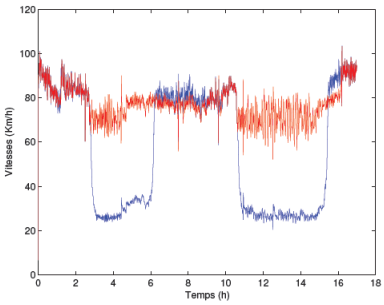


(b)Demande à l'origine de la rampe d'accès

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

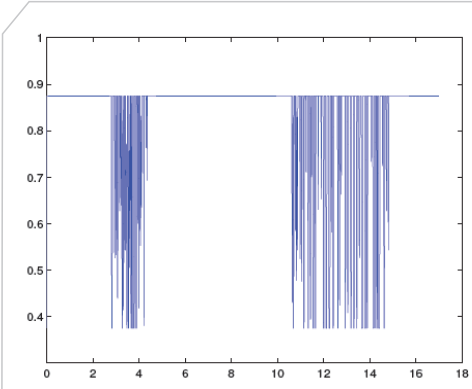


Figure 7. Signal de commande

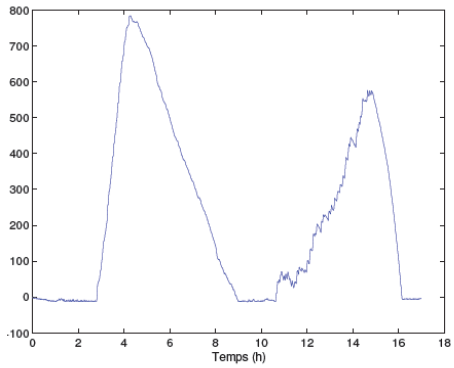


Figure 8 Évolution de la file d'attente

commande, et avec la commande sans modèle.

Durant les heures de pointes, entre 7h30 et 10h30 environ, ainsi qu'entre 15h30 et 20h30, 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 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,

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

[5] Acronyme de Recueil Automatique de Données.

C. Comparaison avec ALINEA

Ci-dessous, dans le tableau de comparaison avec ALINEA, évoqué en début d'article, 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%

Conclusion

À la différence de la plupart des autres, notre stratégie, comme souligné en début d'article 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 par ailleurs. Les équations aux dérivées partielles jouent un rôle important dans maintes études théoriques portant sur une modélisation macroscopique fine du trafic routier, son comportement qualitatif et la régulation. 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 !

Contact :
Michel Fliess
michel.fliess@polytechnique.edu

Remerciements:
Ce texte est une adaptation d'une communication signée par H. Abouaïssa, M. Fliess, V. Iordanova et C. Join, intitulée « Prolégomènes à une régulation sans modèle du trafic autoroutier » (Conférence Méditerranéenne sur l'Ingénierie Sûre des Systèmes Complexes, MISC 2011, Agadir, 2011 - accessible à partir de http://hal-Polytechnique.archives-ouvertes.fr/hal-00585442). Le lecteur intéressé y trouvera des références bibliographiques indispensables. Ce 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'Ile-de-France (DiRIF) et, d'autre part, l'École Polytechnique, 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).