

Université Catholique de Louvain



Ecole Polytechnique de Louvain
Département de Mathématiques Appliquées

Trafic Autoroutier

Analyse, gestion et stabilité
au niveau microscopique

François MASSONNET

Résumé du travail de fin d'études

Prix AILV 2009



Promoteurs : Pr Georges BASTIN
Pr Guy CAMPION

Juin 2009

Faites-vous partie...

... des 66 % de travailleurs belges se rendant quotidiennement en voiture au boulot ? Etes-vous désespéré d'apprendre que, depuis que je suis né, la longueur du réseau routier a augmenté de seulement 14 % alors que le parc automobile a lui progressé de plus de 61 % ? Ce déséquilibre entre besoins et ressources est à l'origine des embouteillages généralisés et du "radio-boulot-dodo" dont doivent s'accomoder bon nombre de navetteurs. Malheureusement, les prévisions sont loin d'être bonnes : d'ici 2030, le journal *Le Soir* prévoit une diminution de 31 % de la vitesse moyenne sur les routes aux heures de pointe.

Il nous reste à contredire ces prévisions afin d'améliorer notre qualité de vie : une organisation plus intelligente du transport quotidien permettra une réduction du temps perdu derrière le volant et une diminution des émissions polluantes. La question de la mobilité est donc intimement liée à celle du bien-être de la société en général.

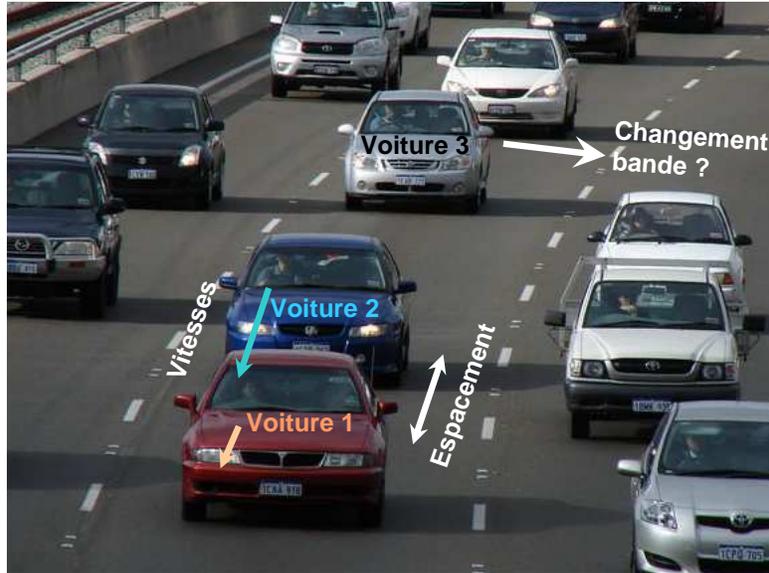
Beaucoup de solutions existent mais elles demandent un effort de la part des employeurs et des autorités politiques ; il est désolant de constater qu'actuellement, trois unités d'établissement sur cinq ne proposent aucune mesure pour leurs employés en matière de mobilité (si ceux-ci venaient, par exemple, à utiliser le train au lieu de la voiture).

Objet du mémoire

Selon moi, l'intensité du trafic n'est cependant pas prête de diminuer en un claquement de doigts. C'est pourquoi je me suis intéressé de près à des *systèmes de trafic sous contrôle* (*Automatic Cruise Control*, ACC) : embarqués à bord des véhicules, des ordinateurs commandent les pédales d'accélérateur et de frein à la place du conducteur. Non, ce dispositif n'est pas futuriste ! Quelques voitures en sont déjà équipées, mais pour améliorer le débit global du trafic, il faudra doter un maximum de véhicules de ce système.

On attend évidemment de ce genre de technologie qu'elle soit fiable (c'est-à-dire que les collisions ne soient pas possibles) et stable (dans le sens où n'importe quel trafic initialement désordonné converge vers une situation d'équilibre optimal). A l'occasion de mon mémoire, j'ai principalement traité ce dernier point en apportant une preuve de stabilité théorique à un système d'ACC.

Comment représenter un trafic ?



Le contrôle du trafic par un système d'ACC suggère de pouvoir représenter mathématiquement l'état de tous les véhicules concernés à tout moment. C'est pourquoi j'ai travaillé à l'aide du formalisme microscopique : chaque véhicule est représenté comme un agent à part entière, qui interagit longitudinalement avec d'autres véhicules (voitures 1 et 2 sur la photo ci-dessus) mais également latéralement (voiture 3). La dynamique de chaque véhicule est représentée mathématiquement par une équation différentielle et dépend de nombreux paramètres, comme par exemple la vitesse de celui-ci et de son prédécesseur, l'espacement entre les deux véhicules, les caractéristiques des conducteurs, etc.

Lorsque le trafic n'est *pas* régulé (lorsqu'on laisse les utilisateurs conduire comme bon leur semble), les modèles prédisent que, sous certaines conditions, un flux routier stable peut soudainement devenir instable, avec comme conséquence la formation de bouchons spontanés.

C'est pour contrer ces instabilités que les systèmes d'ACC ont été développés ; une certaine accélération (ou un freinage) est prescrite à chaque voiture à chaque instant, sur base de différentes mesures réalisées depuis cette voiture (distance avec le véhicule précédent, différence de vitesse, ...). Les ordinateurs de bord rendent donc d'une part la conduite plus confortable (puisque seul le volant est à charge du conducteur), et améliorent d'autre part l'état global du trafic.

Stabilité sur une bande

Mon mémoire apporte une réponse originale et rigoureuse à la question de la stabilité sur une bande (sans dépassement) lorsque le trafic routier est régulé par un certain système d'ACC. Mais avant de parler de stabilité, je préfère introduire la notion d'équilibre; on définit un trafic "en équilibre" comme un flux de véhicules roulant tous à la même vitesse (c'est finalement un concept très intuitif). Cet équilibre peut être stable ou instable : il est stable si le trafic tend à retourner vers l'état d'équilibre malgré les petites perturbations imprévues, et instable dans le cas contraire.

La preuve de stabilité que j'apporte est composée de deux volets :

1. Je prouve d'abord que tout équilibre du trafic dans son ensemble est *linéairement* stable, c'est-à-dire que le trafic maintient son état global d'équilibre tant qu'on ne le perturbe pas trop.
2. Je démontre ensuite que, *sous l'hypothèse que la voiture précédente roule à vitesse constante*, le système de contrôle fait nécessairement évoluer le véhicule courant vers l'état d'équilibre (et ce pour n'importe quelles conditions initiales de vitesse et d'espacement).

Il est important de noter que ces deux résultats se basent sur des théorèmes de stabilité issus de la théorie des équations différentielles et ne sont donc pas "sortis du chapeau". Ils corroborent de manière plus formelle ceux des auteurs de l'ACC que j'ai étudié; ceux-ci n'avaient en effet observé la stabilité du trafic contrôlé que sur base de simulations numériques.

Routes à plusieurs bandes

Les systèmes de trafic sous contrôle soulèvent la question de la liberté des conducteurs; fort heureusement, ces derniers sont toujours libres de changer de bande à leur convenance! J'ai couplé l'ACC à un modèle de changement de bande et ai constaté numériquement la convergence du trafic vers un état optimal, où toutes les voitures sont classées par ordre décroissant des vitesses préférentielles des conducteurs.

Conclusion

J'apporte dans mon mémoire une preuve de stabilité pour un certain système de contrôle de trafic autoroutier. Ce résultat est à la fois capital et très puissant : il est *capital* dans le sens où l'on a maintenant la preuve que les voitures contrôlées tendent à rester dans leur état d'équilibre; il est *puissant* dans le sens où le système de contrôle est **local** (puisqu'il est installé sur chaque véhicule) mais améliore l'état **global** du trafic.

Puisqu'il est difficile de rendre sur papier l'évolution d'un trafic qui possède trois dimensions (le temps, la position longitudinale et la position latérale sur la bande de chaque véhicule), les nombreuses simulations et vidéos que j'ai réalisées sur le terrain sont à la fois utiles et très parlantes. J'espère donc pouvoir les présenter à l'occasion de la défense orale du Prix AILV !

Notes :

- les statistiques mentionnées à la première page de ce document sont issues du portail internet du *Service Public Fédéral*, section mobilité (<http://www.statbel.fgov.be>)
- l'article du journal *Le Soir* cité en première page est paru le 22 avril 2009 et est consultable sur le site des archives de ce quotidien : <http://archives.lesoir.be> au titre *En 2030, le chaos sur nos routes*