

Comportement d'insertion : comparaison empirique entre deux sites d'étude et nouveaux développements théoriques

Florian MARCZAK¹, Christine BUISSON
Laboratoire d'Ingénierie Circulation Transports
LICIT – ENTPE/IFSTTAR – Université de Lyon

Winnie DAAMEN
Department of Transport & Planning
Delft University of Technology

Introduction

Des recherches récentes ont montré que les comportements d'insertion des usagers au niveau des convergents autoroutiers affectent le fonctionnement de l'infrastructure et participent au déclenchement de la congestion (Elefteriadou et al., 1995; Kerner and Rehborn, 1997; Yi and Mulinazzi, 2007 ; Sarvi and Kuwahara, 2007 ; Kondyli and Elefteriadou, 2010, 2011). Les outils de simulation doivent donc prendre en compte les comportements des usagers pour reproduire de façon réaliste le fonctionnement des infrastructures.

Trois catégories de modèles ont été développées pour reproduire les comportements d'insertion sur les convergents autoroutiers. La catégorie la plus récente, et donc la moins répandue, repose sur des modèles de choix discrets (Kondyli and Elefteriadou, 2010, 2011). La deuxième catégorie est basée sur la théorie du jeu. Les conducteurs impliqués dans les changements de voie adaptent leur décision en fonction des alternatives des autres conducteurs. Kita et al. (1999, 2002) ont été les précurseurs dans le développement de cette approche. Leurs travaux reposent cependant sur l'hypothèse que la vitesse des véhicules est constante pendant tout le changement de voie, empêchant par conséquent l'adaptation du comportement d'insertion aux conditions de trafic sur la voie cible. Pour pallier à cette limite, Liu et al., (2007) proposent un modèle amélioré dans lequel les vitesses des véhicules ne sont plus supposées constantes. Cependant cette approche ne considère que le véhicule qui souhaite s'insérer et son suiveur sur la voie cible. Les autres véhicules circulant dans l'environnement proche du véhicule qui souhaite s'insérer ne sont pas pris en compte dans le processus de changement de voie. C'est une limite importante car un véhicule s'insère dans un espace entre un leader et un suiveur qui contribuent tous les deux tout autant à la longueur de l'espace laissé libre pour l'insertion.

La théorie d'acceptation des créneaux est à la base de nombreux modèles de changements de voie (Michaels and Fazio, 1989; Yang and Koutsopoulos, 1996; Lee, 2006). Cette théorie stipule simplement que les conducteurs admettent un créneau d'insertion critique. Les créneaux d'insertion dont la longueur est inférieure à la valeur critique sont systématiquement rejetés. A contrario, les créneaux dont la longueur est supérieure à la valeur critique sont acceptés. La théorie d'acceptation des créneaux a été implémentée dans des logiciels de simulation commercialisés comme, Paramics, Aimsun (Barceló and Casas, 2005) ou Vissim (PTV, 2008). Ces outils de simulation ne reproduisent cependant pas fidèlement le comportement d'insertion réel sur les convergents autoroutiers (Sarvi and Kuwahara, 2007). Paramics sous-estime en effet la capacité alors que Vissim et Aimsun suppriment des véhicules après un temps d'attente à la fin de la bretelle d'accès.

¹ Auteur correspondant : florian.marczak@entpe.fr

Les développements théoriques proposés dans ces différentes approches n'ont été que très rarement confrontés à des données réelles notamment à cause d'un manque de données de terrain microscopiques. Les données sont principalement recueillies grâce à des boucles électromagnétiques permettant éventuellement une validation des modèles à l'échelle macroscopique mais ne permettant pas d'étudier les phénomènes microscopiques comme les changements de voie ou les comportements des usagers. Les données peuvent être également collectées à l'aide de véhicules traceurs équipés de GPS. Ces données ne permettent une analyse exhaustive des comportements d'insertion en fonction des conditions de trafic car leur qualité dépend du taux de pénétration, c'est-à-dire du pourcentage de véhicules équipés de GPS.

Nous nous proposons de réaliser dans cette contribution une étude empirique du comportement d'insertion à partir de données microscopiques mesurées sur deux sites d'étude. Nous nous intéressons non seulement aux créneaux d'insertion acceptés mais aussi aux créneaux d'insertion rejetés. Les données sont également confrontées à des valeurs théoriques pour déterminer si les modèles d'insertion permettent de reproduire les observations. Enfin, nous développons un modèle stochastique pour prédire la probabilité d'accepter ou de rejeter un créneau d'insertion en fonction de variables décrivant l'environnement des véhicules cherchant à s'insérer et pallier aux limites des modèles d'insertion couramment utilisés.

Zone d'étude et technique de mesure

Les données ont été mesurées à Bodegraven (Pays-Bas) et à Grenoble (France). Le site d'étude aux Pays-Bas se situe sur l'autoroute A-12 entre Gouda et Utrecht. La voie d'accélération mesure une longueur totale de 283 m. La vitesse limite autorisée est de 120 km/h. Les données à Grenoble ont été mesurées sur la Rocade Sud à la jonction entre l'autoroute A-41 et la RN-87. La voie d'accélération mesure 210 m. La vitesse limite autorisée est de 90 km/h.

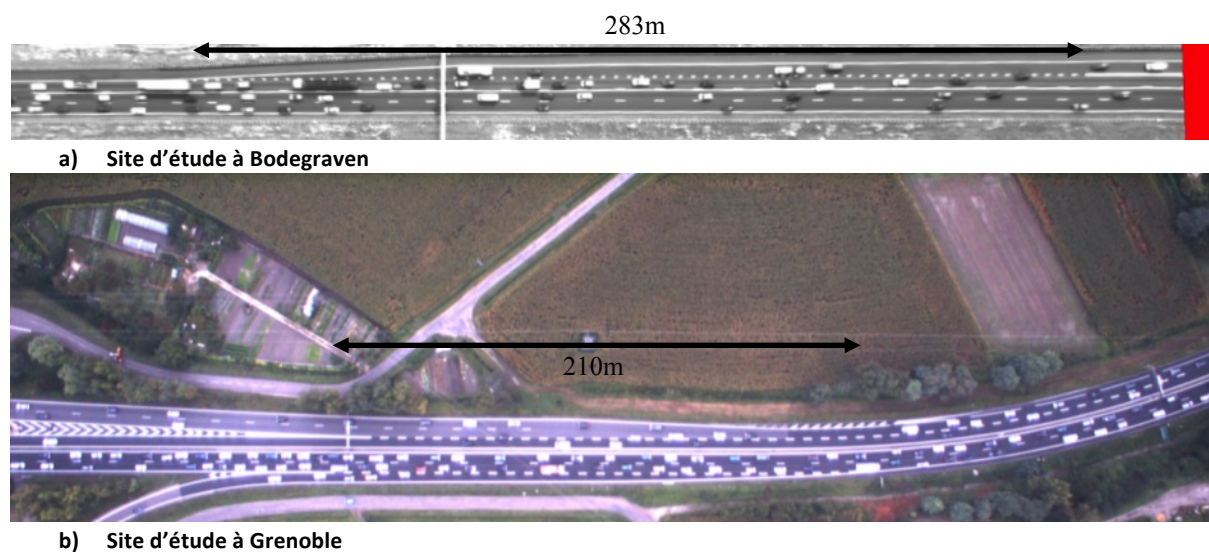


Figure 1 : sites d'étude à a) Bodegraven et b) Grenoble

Les données ont été mesurées par une caméra haute définition montée sous un hélicoptère. Celui-ci se tenait en vol stationnaire au-dessus des zones d'étude pendant près d'une heure. Les images ont été enregistrées à une fréquence de 15 images par seconde à Bodegraven et 20 images par seconde à Grenoble. Les vidéos brutes ont ensuite été stabilisées pour compenser les mouvements de l'hélicoptère. Puis les véhicules ont été identifiés sur les images stabilisées. La stabilisation et l'identification des véhicules ont été réalisées grâce à des algorithmes de traitement des images développés par l'Université Technologique de Delft (Knoppers et al., 2012). En résultat nous obtenons les trajectoires de l'ensemble des véhicules détectés à une fréquence correspondant à la fréquence d'acquisition des images.

Les trajectoires à Bodegraven ont été mesurées sous des conditions de trafic fluides et congestionnées. Les trajectoires à Grenoble ont été essentiellement mesurées sous des conditions de trafic congestionnées. Pour réaliser une étude comparative des données, nous nous sommes par conséquent uniquement intéressés au comportement d'insertion en situation congestionnée.

Afin de définir les notions que nous utiliserons ultérieurement dans l'article, considérons un véhicule qui souhaite s'insérer sur la section courante depuis la bretelle d'accès. Nous définissons le moment d'insertion comme l'instant auquel le centre de gravité de ce véhicule franchit la ligne discontinue entre la voie principale et la bretelle. La position longitudinale du véhicule à l'instant d'insertion correspond à la position d'insertion. L'écart inter-véhiculaire entre le leader et le suiveur sur la section courante à l'instant de l'insertion est le créneau d'insertion accepté par le véhicule qui s'insère. Le véhicule qui s'insère peut passer en revue plusieurs écarts inter-véhiculaires qui lui sont proposés sur la section principale. Les créneaux dépassés par le véhicule qui veut s'insérer sont qualifiés de créneaux rejetés.

Résultats

Statistiques descriptives

Dans un premier temps, nous présentons des statistiques descriptives du comportement d'insertion. La Figure 2 présente les distributions cumulées des créneaux d'insertion acceptés et rejetés, des positions des changements de voie et des vitesses au moment de l'insertion.

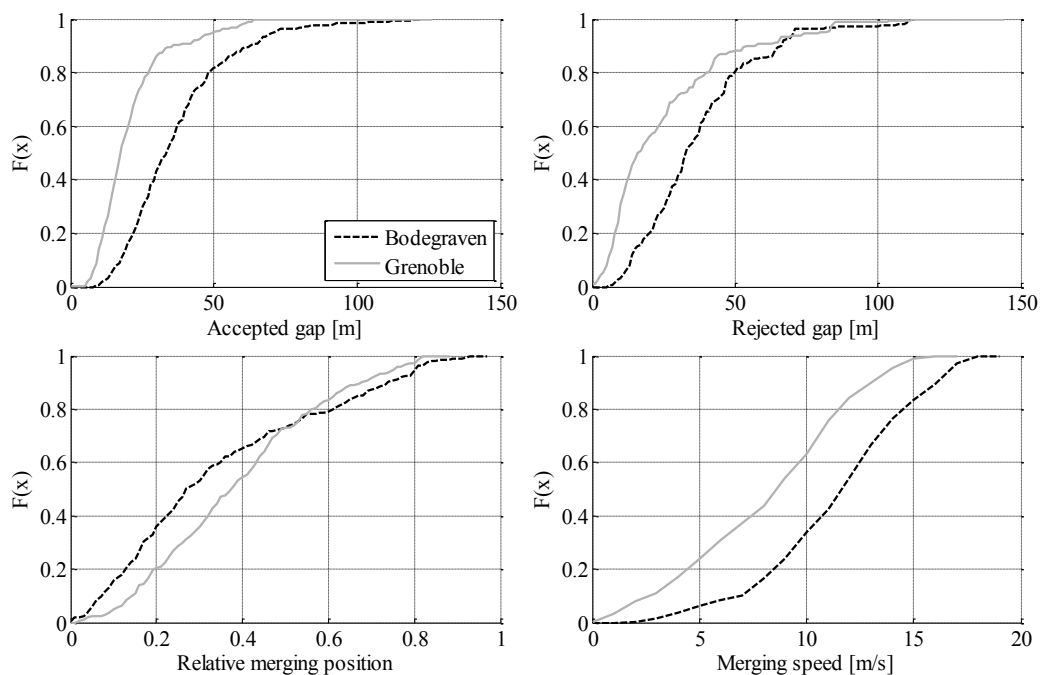


Figure 2 : distributions cumulées des créneaux d'insertion acceptés et rejetés, des positions des changements normalisés par rapport à la longueur de la bretelle et des vitesses d'insertion

Les créneaux d'insertion acceptés et rejetés par les véhicules qui s'insèrent sont plus longs à Bodegraven qu'à Grenoble. Seuls les créneaux acceptés les plus longs sont similaires sur les deux sites d'étude. La position des changements de voie est normalisée par rapport à la longueur des bretelles d'insertion car celle-ci est différente sur les deux sites d'étude. La Figure 2 montre que les positions d'insertion sont davantage distribuées le long de la voie d'accélération à Bodegraven qu'à Grenoble où les véhicules semblent changer de voie vers le milieu de la voie d'accélération. Concernant la vitesse d'insertion, la forme des distributions cumulées est identique pour les deux jeux de données. Cependant la vitesse d'insertion pratiquée à Bodegraven est plus élevée de 3 m/s que la vitesse d'insertion pratiquée à Grenoble.

Pour approfondir l'étude du comportement d'insertion, nous proposons également d'analyser conjointement les variables. La Figure 3 présente la relation entre les créneaux d'insertion acceptés et rejetés en fonction des positions des changements de voie.

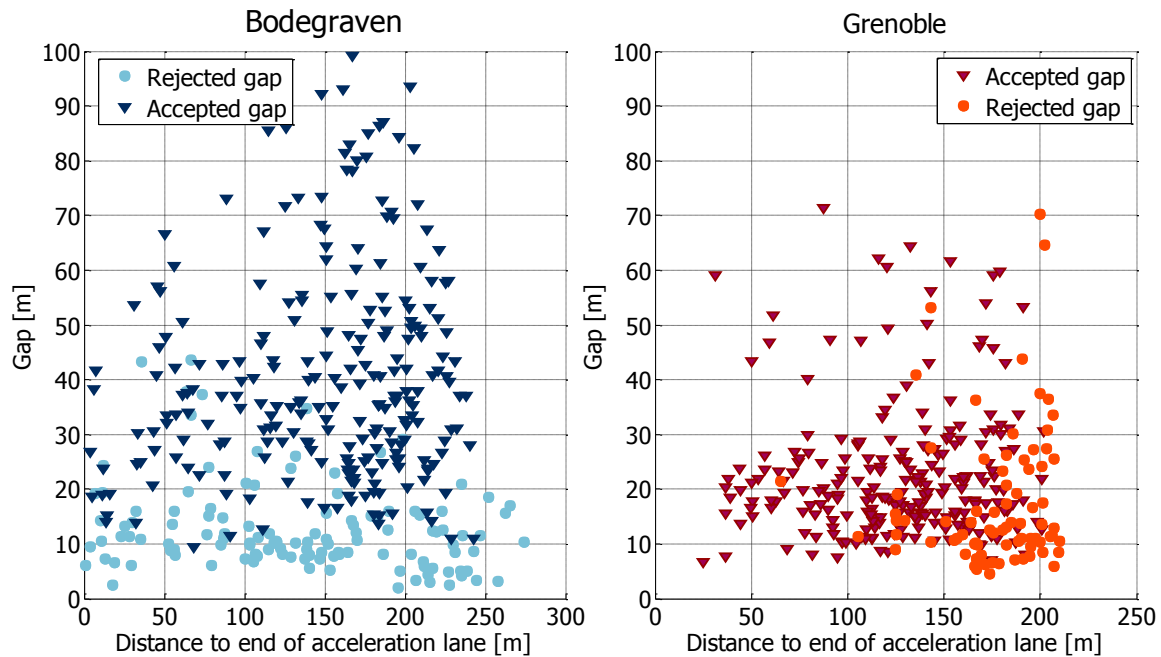


Figure 3 : créneaux d'insertion acceptés et rejetés en fonction de la position des changements de voie

On peut remarquer sur la Figure 3 que les créneaux rejetés à Bodegraven sont globalement plus courts que les créneaux acceptés. Les créneaux rejetés à Bodegraven sont par ailleurs dispersés sur toute la longueur de la bretelle d'insertion. En revanche, dans le jeu de données mesuré à Grenoble, il est difficile de déterminer une longueur limite entre les créneaux acceptés et rejetés. Il apparaît toutefois que les créneaux rejetés se situent davantage au début de la bretelle d'insertion que les créneaux acceptés.

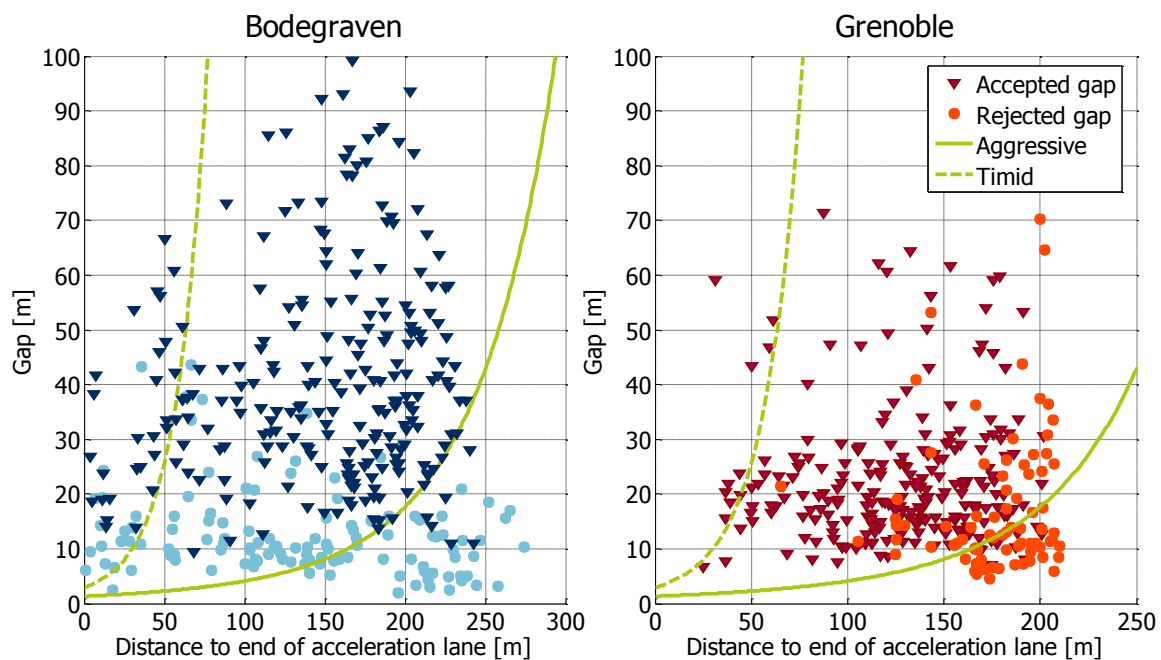


Figure 4 : comparaison entre les créneaux d'insertion, acceptés et rejetés, observés et les valeurs théoriques données dans (Choudhury et al., 2007)

Choudhury et al. (2007) décrivent explicitement une expression du créneau d'insertion critique en fonction notamment de la position par rapport à la fin de la bretelle d'insertion. La Figure 4 confronte les résultats empiriques aux valeurs théoriques données par (Choudhury et al., 2007). Le modèle d'acceptation des créneaux stipule qu'en-dessous de la ligne continue (resp. en pointillés) les créneaux proposés sont inférieurs à la valeur critique et devraient être, par conséquent, rejetés par un conducteur agressif (resp. timide). Bien que le caractère agressif ou timide des conducteurs ne puisse pas être déduit des données, on peut cependant observer que les courbes théoriques ne permettent pas de distinguer les créneaux acceptés des créneaux rejetés. Les modèles prédisant l'acceptation d'un créneau d'insertion par comparaison à une valeur seuil ne sont donc pas cohérents avec les observations empiriques. Des créneaux plus courts que cette valeur seuil peuvent en effet être acceptés par les conducteurs cherchant à s'insérer.

Statistiques explicatives : construction d'un modèle de régression logistique

Nous avons montré dans le paragraphe précédent que des véhicules peuvent s'insérer dans des créneaux plus courts que les valeurs critiques prédites par la théorie. Pour pallier ce problème, nous avons construit un modèle de régression logistique. L'objectif de ce modèle est double. Il permet de caractériser dans un premier temps l'influence des variables décrivant l'environnement proche des véhicules qui souhaitent s'insérer en exprimant la probabilité d'accepter ou de rejeter un créneau d'insertion. Il peut également être implémenté comme module de gestion des changements de voie d'insertion dans un modèle de micro-simulation.

Nous avons considéré une variable binaire Y égale à 1 si un créneau est accepté et 0 si le créneau est rejeté. Pour réduire le nombre de variables explicatives, nous avons exploré les jeux de données à l'aide d'une analyse en composantes principales (Govaert, 2009). A l'issue de cette étude préliminaire, nous avons finalement retenu les variables suivantes :

- X_x : la position le long de la bretelle d'accélération par rapport au début de celle-ci ;
- X_{gap} : le créneau d'insertion proposé, c'est-à-dire l'écart inter-véhiculaire net entre le leader et le suiveur potentiels sur la voie cible.
- $X_{\Delta V_{PL-PF}}$: la différence entre les vitesses pratiquées par le leader et le suiveur sur la section principale ;
- $X_{\Delta V_{MV-PF}}$: la différence entre les vitesses pratiquées par le véhicule qui cherche à s'insérer et son suiveur potentiel sur la section principale.

En utilisant une fonction logit, le modèle de régression logistique s'écrit finalement (Kita, 1993) :

$$p(1|X) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_x X_x + \beta_{gap} X_{gap} + \beta_{\Delta V_{PL-PF}} X_{\Delta V_{PL-PF}} + \beta_{\Delta V_{MV-PF}} X_{\Delta V_{MV-PF}}}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_x X_x + \beta_{gap} X_{gap} + \beta_{\Delta V_{PL-PF}} X_{\Delta V_{PL-PF}} + \beta_{\Delta V_{MV-PF}} X_{\Delta V_{MV-PF}}}}$$

Où $p(1|X)$ est la probabilité qu'un créneau d'insertion soit accepté connaissant les valeurs des variables explicatives X . Le vecteur $(\beta_0, \beta_x, \beta_{gap}, \beta_{\Delta V_{PL-PF}}, \beta_{\Delta V_{MV-PF}})$ représente les coefficients de la régression à ajuster sur les jeux de données. Le signe et la valeur des coefficients quantifient l'influence des variables explicatives sur la probabilité d'accepter ou de rejeter un créneau. Un coefficient positif augmente la probabilité d'accepter un créneau proposé. A contrario, un coefficient négatif diminue la probabilité d'accepter un créneau et augmente donc la probabilité de le rejeter. La Figure 5 présente les résultats de l'ajustement des coefficients de la régression logistique. La colonne de gauche de la figure donne les valeurs ajustées des coefficients avec leurs intervalles de confiance correspondant. La colonne de droite de la figure présente les courbes ROC qui évaluent le caractère discriminatoire de la régression et donc sa qualité.

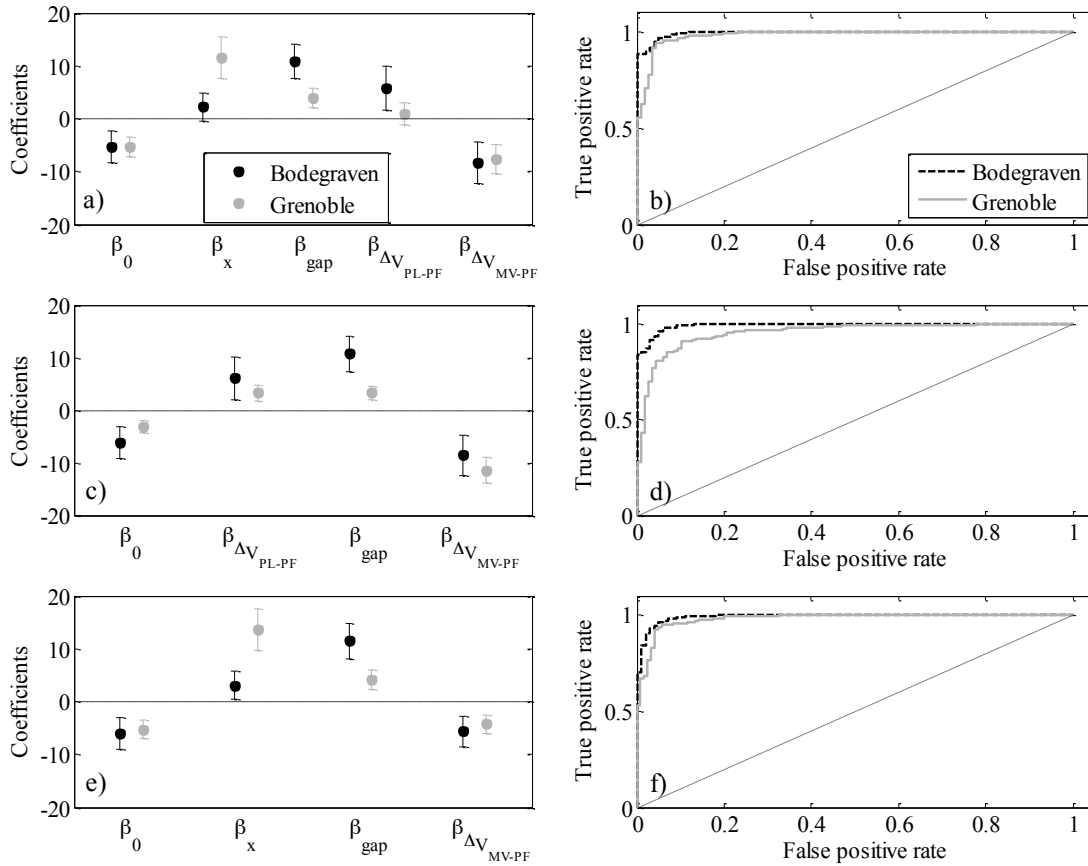


Figure 5 : résultats des régressions logistiques

Nous pouvons observer dans un premier temps que les intervalles de confiance des coefficients $\beta_{\Delta V_{PL-PF}}$ et $\beta_{\Delta V_{MV-PF}}$ se superposent après estimation sur les deux jeux de données. La différence de vitesse entre le leader et le suiveur potentiels et la différence de vitesse entre le véhicule qui s'insère et son suiveur potentiel jouent donc un rôle identique dans la décision d'accepter un créneau d'insertion sur les deux sites d'étude. De façon analogue, on peut également remarquer que les intervalles de confiance pour les coefficients β_x et β_{gap} sont disjoints. La position et la longueur du créneau d'insertion jouent donc un rôle significativement différent sur les deux sites d'étude.

Le coefficient β_x est positif : plus un véhicule est éloigné du début de la bretelle plus grande sera la probabilité d'accepter un créneau proposé sur la section courante. La position contribue davantage à la probabilité d'accepter un créneau à Grenoble qu'à Bodegraven. β_{gap} est également positif. Plus un créneau d'insertion sera grand, plus la probabilité qu'il soit accepté sera grande. Toutefois, la longueur du créneau contribue davantage à la probabilité d'accepter ce créneau à Bodegraven qu'à Grenoble. $\beta_{\Delta V_{PL-PF}}$ est positif : plus le leader potentiel sur la voie cible circulera rapidement par rapport à son suiveur, plus la probabilité d'accepter le créneau d'insertion résultant sera élevée. Le coefficient $\beta_{\Delta V_{MV-PF}}$ étant négatif, la probabilité d'accepter un créneau sera d'autant plus faible que la différence des vitesses entre le véhicule cherchant à s'insérer et son suiveur potentiel sur la voie cible sera grande. On peut également observer que les intervalles de confiance du coefficient relatif à la position pour le jeu de données de Bodegraven et du coefficient relatif à la différence de vitesses entre le leader et le suiveur pour le jeu de données de Grenoble contiennent 0. Les deux coefficients n'ont pas été déterminés de façon significative. Nous avons donc à nouveau ajusté la régression logistique en supprimant les variables dont les coefficients n'étaient initialement pas significatifs. Les résultats sont identiques avec cependant une légère dégradation du caractère discriminatoire de la régression (voir courbes ROC).

La régression logistique exprime une probabilité. Elle peut donc être facilement implémentée comme module de changements de voie dans un outil de simulation. Une limite importante est cependant à souligner. Nous en effet en effet considéré l'ensemble des créneaux d'insertion acceptés et rejetés dans un unique jeu de données sans prendre en compte la dynamique du trafic. Les résultats de simulation obtenus éventuellement après implémentation de la régression logistique dans un module de changements de voie, ne convergeront pas vers les observations même après calage du modèle.

Conclusion

Nous avons présenté dans cet article une étude comparative du comportement d'insertion sur deux convergents autoroutiers situés respectivement à Bodegraven (Pays-Bas) et Grenoble (France). En utilisant des données microscopiques très précises, nous avons non seulement analysé les créneaux d'insertion acceptés mais aussi les créneaux d'insertion rejetés.

Nous avons observé des différences de comportement sur les deux sites d'étude : les conducteurs qui s'insèrent à Grenoble semblent plus agressifs et acceptent des créneaux d'insertion plus courts que les conducteurs qui s'insèrent à Bodegraven. La voie d'accélération plus courte et les conditions de trafic davantage dégradées à Grenoble peuvent expliquer cette différence.

Nous avons également comparé les créneaux d'insertion empiriques aux valeurs théoriques des créneaux d'insertion critiques proposées dans la littérature. Les créneaux critiques sont des seuils : si un conducteur qui souhaite s'insérer croise sur la voie principale un créneau d'insertion dont la longueur est supérieure à la valeur critique alors il l'acceptera. Dans le cas contraire, le créneau proposé sera rejeté. Nous avons montré que cette théorie, bien que couramment utilisée en pratique, n'est pas cohérente avec les observations réelles.

Nous avons également proposé un modèle stochastique qui exprime la probabilité d'accepter ou de rejeter un créneau d'insertion en fonction notamment de la position longitudinale le long de la bretelle d'insertion, de la longueur du créneau d'insertion et des différences de vitesses pratiquées entre le véhicule qui souhaite s'insérer et les véhicules dans son environnement proche. Le modèle a été développé en utilisant une régression logistique dont les coefficients ont été ajustés sur les deux jeux de données. Le modèle est très prometteur car il prédit correctement la probabilité d'accepter ou de rejeter un créneau dans 98% des cas.

Plusieurs pistes de recherche peuvent être évoquées. Dans un premier temps, l'analyse du comportement d'insertion devrait être poursuivie sous des conditions de trafic fluides et sur des sites d'étude avec des conditions géométriques différentes. Le trafic à Grenoble était essentiellement composé de véhicules particuliers. La variabilité des données n'étant pas suffisante, le type de véhicules (poids lourds, deux-roues, véhicules particuliers ...) n'a pas été analysé. Ce sujet sera l'objet de recherches futures.

Bibliographie

Barceló, J., & Casas, J. (2005). Dynamic Network Simulation with AIMSUN. In R. Kitamura & M. Kuwahara (Eds.), *Simulation approaches in transportation analysis: Recent advances and challenges* (pp. 57-98). Kluwer, Amsterdam.

Daamen, W., Loot, M. E. J., & Hoogendoorn, S. P. (2010). Empirical analysis of merging behavior at freeway on-ramp. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2188, 108-118.

Elefteriadou, L., Roess, R. P., & McShane, W. R. (1995). The probabilistic nature of 42 breakdown at freeway-merge junctions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1484, 80-89.

Govaert, G. (2009). *Data analysis*. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc. (Ed.), 318p.

Kerner, B.S., & Rehborn, H. (1997). Experimental properties of phase transitions in traffic flow. *Physical Review Letters*, 79(20), 4030-4033.

- Kita, H. (1993). Effects of merging lane length on the merging behavior at expressway on-ramps. In C.F. Daganzo (Ed.), *Proceedings of 12th International Symposium on transportation and traffic Theory* (pp. 37-51). Elsevier
- Kita, H., & Fukuyama, K. (1999). A merging-giveaway behavior model considering interactions at expressway on-ramps. In A. Ceder (Ed.), *Proceedings 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory* (pp. 173-187). Elsevier.
- Kita, H., & Keishi, T. (2002). A game theoretic analysis of merging-giveaway interaction: a joint estimation model. In M.A.P. Taylor (Ed.), *Proceedings of the 15th International Symposium on Transportation and Traffic Theory* (pp. 503-518). Pergamon
- Knoppers, P., van Lint, H. & Hoogendoorn, S.P. (2012). Automatic stabilization of aerial traffic images, 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington.
- Kondyli, A., & Elefteriadou, L. (2010). Driver behavior at freeway-ramp merging areas based on instrumented vehicle observations, 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington.
- Kondyli, A., & Elefteriadou, L. (2011). Modeling driver behavior at freeway-ramp merges. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2249, 29-37.
- PTV (2008). VISSIM 5.10 User Manual. Karlsruhe, Germany.
- Lee, G. (2006). Modeling gap acceptance in freeway merges. MSc thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, MIT
- Liu, H. X., Wuping, X., Adams, M. A, & Ban, J. X. (2007). A game theoretical approach for modeling merging and yielding behaviour at freeway on-ramp sections. In R. E. Allsop, M. G. H. Bell & B. G. Heydecker (Eds.), *Papers selected for presentation at ISTTT17, a peer reviewed series since 1959* (pp. 691-710). Elsevier, Oxford.
- Michaels, R. M., & Fazio, J. (1989). Driver behavior model of merging. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1213, 4-10.
- MOCOPo (2012), Measuring and modelling traffic congestion and pollution, <http://mocopo.ifsttar.fr/>, last accessed 23th July 2012.
- Sarvi, M., & Kuwahara M. (2007). Microsimulation of freeway ramp merging processes under congested traffic conditions, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8(3), 470-479.
- Yang, Q., & Koutsopoulos, H. N. (1996). A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 4(3), 113-129.
- Yi, H., & Mulinazzi, T. E. (2007). Urban freeway on-ramp invasive influences on 3 mainline operations. 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington.