



JULIEN SAUNIER

Modèle de comportement latéral des véhicules légers fondé sur des forces  
Volume 3, n° 5-6 (2022), p. 451-476.

DOI not yet assigned

© Les auteurs, 2022.



Cet article est diffusé sous la licence  
CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL LICENSE.  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



*La Revue Ouverte d'Intelligence Artificielle est membre du  
Centre Mersenne pour l'édition scientifique ouverte*  
[www.centre-mersenne.org](http://www.centre-mersenne.org)  
e-ISSN : pending

# Modèle de comportement latéral des véhicules légers fondé sur des forces

Julien Saunier<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Normandie Université, INSA Rouen-Normandie, LITIS

*E-mail* : julien.saunier@insa-rouen.fr.

---

**RÉSUMÉ.** — Le partage de la route entre différents modes de déplacement tels que les véhicules légers, les poids lourds et les vélos génère de nombreux problèmes de sécurité routière. Une solution envisagée pour faciliter le partage de l'espace routier est un repositionnement du marquage latéral afin de laisser plus d'espace aux modes doux. Cependant, l'effet d'un changement du profil en travers de la route sur les comportements des conducteurs a été jusqu'ici peu étudié. Le projet PROFIL a eu pour objectif d'étudier cet impact dans différentes situations (véhicule instrumenté, simulateur de conduite, simulateur de trafic). Dans ce cadre, nous proposons le modèle LFM (Lateral Force Model), prenant en compte les effets longitudinaux et latéraux du profil en travers au sein de la voie de circulation. Nous montrons que ce modèle, fondé sur IDM (Intelligent Driver Model) dans sa composante longitudinale, reproduit de façon effective les effets de la largeur de la voie en circulation libre, en situation de croisement de véhicules, en situation de dépassement de deux-roues non-motorisés et en virage selon les données recueillies dans des expérimentations en situation réelle et en simulateur.

**MOTS-CLÉS.** — Systèmes multi-agents, simulation de trafic, modèles de comportement.

---

## 1. INTRODUCTION

Les simulateurs de trafic permettent d'étudier à bas coût des modifications d'éléments ayant une influence sur le trafic (ajout de voies, systèmes d'information, etc). L'étude systématique des paramètres, en simulation, permet de générer un grand nombre de modalités, notamment en ce qui concerne la demande de trafic, *i.e.* le nombre et le type de véhicules en circulation. Les données recueillies permettent alors d'évaluer *a priori* l'impact de ces modifications du système routier en termes de capacité, via les courbes débit/vitesse, et de sécurité, via un ensemble d'indicateurs [12, 26].

Du point de vue des modèles utilisés, les simulateurs de trafic microscopiques classiques sont fondés sur la conjonction d'une équation de suivi de véhicule, un régime libre et un algorithme de changement de voie. Ces modèles utilisent des représentations très simplifiées de l'infrastructure (nombre de voies, longueur des segments), ce qui implique que les autres informations ne sont pas explicitement modélisées. En d'autres termes, le positionnement du marquage et le positionnement latéral du véhicule dans sa voie ne sont pris en compte qu'implicitement lors de la phase de calibrage du

modèle, et non explicitement comme une entrée (pour le marquage) et une sortie (pour le positionnement latéral) du modèle.

Le comportement latéral du véhicule est généralement assimilé à la problématique du changement de voie et non à la façon dont le conducteur se positionne au sein de celle-ci. La visualisation du modèle inclut alors un positionnement des véhicules se situant sur des trajectoires précalculées soit au centre de la voie, soit selon une distance fixe à celle-ci. Dans les cas où la position latérale intra-voie est prise en compte, la littérature s'est principalement intéressée à la notion de voie virtuelle afin de permettre soit de modéliser le comportement des 2-roues, motorisés ou non, soit de considérer leur potentiel, ou enfin d'intégrer des flux mixtes composés de véhicules d'encombrement différent.

Dans le cadre du projet PROFIL (Profil de la Route comme Facteur d'Influence de la Lisibilité), des Lidars embarqués permettent de capter les positions et inter-distances latérales des conducteurs en environnement réel (véhicule instrumenté) et simulé (simulateur de conduite). Ces données sont récoltées afin de comprendre et d'évaluer l'impact du marquage de la route sur la sécurité et l'écoulement des véhicules. En effet, une piste d'amélioration de la sécurité routière est de modifier le marquage en réduisant la taille des voies au profit de l'espace situé entre le marquage de droite et la fin du revêtement. L'objectif est alors de permettre d'une part un espace de récupération plus grand en cas de sortie de voie, et d'autre part la sécurisation de cet espace pour d'autres usagers, par exemple les cyclistes, sans agrandir la largeur réelle de revêtement, qui est une opération coûteuse.

Dans ce cadre, il s'agit donc d'intégrer explicitement le profil de la route dans les modèles de simulation afin d'étudier leur effet, tant latéral que longitudinal, à titre explicatif et prospectif. Cette étude est réalisée sur des routes françaises et avec des conducteurs français, et ne peut donc rendre compte d'autres usages, notamment en termes de composition du trafic ou d'infrastructures.

Notre approche se situe dans le domaine des modèles comportementaux, *i.e.* dont les paramètres peuvent être approchés de grandeurs réelles. Ces modèles se distinguent par leur dimension explicative, prenant en compte des facteurs explicites, et prédictive, puisque seuls les paramètres spécifiques à l'infrastructure d'un scénario doivent être recalibrés. À ce titre, nous proposons un modèle reproduisant les comportements latéraux observés en fonction du profil de la route et de son occupation par d'autres véhicules.

Cet article est une version révisée et étendue de Saunier [40]. Le modèle a été amélioré concernant la prise en compte des véhicules croisés et la modélisation des forces dans les virages, et nous y avons intégré la prise en compte des cyclistes avec les expérimentations correspondantes. Nous avons également introduit une discussion sur le modèle et l'architecture permettant de le mettre en œuvre selon une approche de délégation d'une partie des calculs à l'environnement multi-agents.

Le reste de l'article est structuré comme suit : la section 2 introduit l'état de l'art en matière de simulation de trafic et plus précisément du comportement latéral des

conducteurs. Nous proposons en section 3 le modèle LFM (Lateral Force Model) dont l'objectif est de reproduire la dynamique latérale des véhicules, puis nous montrons en section 4 les résultats des expérimentations. En section 5, nous discutons l'architecture de mise en œuvre du modèle. Enfin, la section 6 conclut et introduit les perspectives de ces travaux.

## 2. ÉTAT DE L'ART

### 2.1. SIMULATION DE TRAFIC

Pour modéliser et simuler le trafic routier, de nombreux modèles ont été développés depuis les années 1950 [3]. Les travaux se déclinent de l'échelle macroscopique, dans laquelle le trafic est vu comme un flux, à l'échelle nanoscopique, cherchant à reproduire le fonctionnement cognitif et sensorimoteur humain [20].

Les approches macroscopiques [7] se concentrent sur la modélisation de l'évolution spatio-temporelle des grandeurs du trafic, mesurées au niveau du flux de véhicules. Si ces approches sont pertinentes pour évaluer le trafic sur de grands réseaux, leur finalité n'est ni de décrire finement les comportements des conducteurs, ni de prendre en compte des grandeurs valides à l'échelle individuelle.

L'autre échelle classiquement utilisée dans le domaine de l'étude du trafic est le niveau microscopique. Dans ce cas, les auteurs s'attachent à modéliser l'évolution des variables de chacun des véhicules évoluant sur l'infrastructure. Historiquement, la modélisation microscopique s'est appuyée sur la mise au point de modèles mathématiques décrivant le comportement de chaque véhicule avec pour objectif de reproduire, à l'échelle de l'ensemble du système, les phénomènes majeurs du trafic tels que les vagues de *stop and go* et la formation d'encombres. Pour cela, chaque véhicule se voit attaché une position, une vitesse et éventuellement une accélération, qui évolue dynamiquement en fonction du trafic environnant.

La position du véhicule peut être scindée en deux composantes : (1) longitudinale le long de la route suivie  $x$ , avec  $x(t)$  une fonction croissante lorsque l'origine de la route est 0, et (2) latérale par rapport à l'axe de la route  $y$ , souvent limitée au numéro de voie sur laquelle le véhicule circule.

Les modèles de simulation microscopiques cherchent ainsi à déterminer l'évolution de la position longitudinale et latérale de chaque véhicule au cours du temps. Étant donné que le positionnement des véhicules possède deux composantes  $(x, y)$ , le modèle général contient ainsi souvent deux sous-modèles utilisés conjointement : le modèle de suivi de véhicule et le modèle de changement de voie.

De nombreux modèles ont été proposés pour le suivi de véhicule, une revue de littérature étant proposée par Brackstone et McDonald [6]. Ces modèles sont eux-mêmes composés de deux éléments, le premier correspondant au régime libre, dans lequel le véhicule peut choisir librement sa vitesse en fonction de l'infrastructure et d'éventuels paramètres individuels, et le second correspondant au régime de *suivi* de véhicule, qui décrit la façon dont le véhicule s'adapte à son prédécesseur.

Le processus de changement de voie est également souvent subdivisé en deux sous-processus, d'une part la prise de décision de changer de voie et d'autre part la recherche d'un créneau. Comme le souligne Six [42], « *le changement de voie est généralement discrétisé et se limite à déterminer la voie de circulation adoptée par un véhicule dans une situation où il circule sur une infrastructure disposant de plusieurs voies [...] La plupart du temps, et tout particulièrement lorsque le positionnement latéral du véhicule se limite au numéro de la voie empruntée, l'action de changement de voie est instantané (ce qui suppose une accélération latérale infinie)* ».

Comparée à l'approche macroscopique, le nombre de paramètres à déterminer est important puisque lié à chaque véhicule, nécessitant ainsi un calibrage plus fin, laquelle peut être simplifiée soit en homogénéisant tout ou partie des paramètres, soit en générant ces paramètres selon des lois de probabilités. Cependant, l'approche microscopique permet d'observer plus finement les interactions entre véhicules et ainsi d'expliquer la production de certaines situations.

Nous pouvons également citer l'existence d'autres types de modèles, à base d'automates cellulaires [33] pour discrétiser l'environnement, de modèles multi-niveaux [8] permettant de combiner des modèles d'échelles différentes, les approches mésoscopique, principalement utilisées pour les calculs d'itinéraire [50], et les approches nanoscopiques [5].

Cette dernière approche, nanoscopique, s'intéresse à la dimension opérationnelle de la conduite (selon la classification de Michon [32]), et pourrait être utilisée pour la modélisation fine du comportement latéral. Cependant, d'une part la complexité de ces modèles ne permet pas la simulation d'un grand nombre de véhicules, et d'autre part elle nécessite un calibrage sur la base d'éléments cognitifs difficilement mesurables.

Dans le cadre de ce travail, nous nous positionnons dans l'approche microscopique et plus particulièrement dans l'approche comportementale de la simulation de trafic. Les modèles comportementaux, dont le premier a été proposé par Gipps [14], sont une famille de modèles microscopiques se fondant non sur des valeurs abstraites, telles que les approches de Newell [34] et de Bando et al [2], mais sur des grandeurs théoriquement mesurables et fiables à des éléments du système réel, tels que l'accélération maximale d'un véhicule ou la vitesse à atteindre.

## 2.2. MODÉLISATION DU COMPORTEMENT LATÉRAL INTRA-VOIE

Nous nous focalisons dans cette partie sur les travaux antérieurs sur la modélisation du comportement latéral du véhicule, au sein d'une même voie physique. Les modèles à changement de voie instantané et ceux dont la déviation latérale transitoire consiste à quitter le centre d'une voie pour le centre d'une autre tels que [22] et [37] ne seront pas explicités.

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, très peu de modèles s'intéressent à cette problématique car si l'objectif principal de la plupart des simulations de

trafic est de générer un flux satisfaisant au niveau macroscopique, l'impact du comportement latéral intra-voie est mal connu en tant qu'élément contribuant au débit d'un tronçon routier.

Plusieurs travaux de la littérature [4, 11, 25] ont proposé une modélisation du comportement latéral en se fondant sur la notion de voies virtuelles. L'idée fondamentale est d'abstraire la notion de voie de façon à permettre l'inclusion de véhicules d'encombrements différents, notamment les deux roues, motorisés ou non. Une voie virtuelle est alors une sous partie d'une voie physique, qui permet : (1) de ne pas considérer un véhicule de faible encombrement comme véhicule « leader », donc nécessitant une adaptation en comportement de suivi, (2) de prendre en compte le cas où un véhicule empiète sur une autre voie, réduisant ainsi la largeur potentielle de passage, et (3) gérer les situations où le marquage est non existant, par exemple à l'approche d'un péage.

Si ces approches permettent de flexibiliser le comportement des véhicules, ceux-ci continuent de se déplacer au centre de leur voie, quand bien même celle-ci ne correspond pas à la voie physique correspondante. Nous pouvons noter que certains de ces modèles, dont [11], ne nécessitent pas obligatoirement de spécifier de largeur de voie. De plus, elles ne s'intéressent pas tant à la problématique du comportement latéral en général que sa prise en compte nécessaire dans des flux mixtes [23, 27, 29], contenant des motocyclistes [16] et/ou les modélisant [4].

Gunay [15] s'est intéressé à la modélisation de l'inconfort latéral et à son impact sur la vitesse du véhicule. La modélisation, fondée sur un modèle de temps d'arrêt du véhicule, met en lumière la façon dont l'effet de friction généré par la position latérale des véhicules influence la vitesse adoptée par les conducteurs, en se fondant sur la notion de dégagement latéral. De cette façon, l'auteur inclut également la largeur de voie comme paramètre du modèle. Cependant, ce modèle n'a été appliqué qu'au cas multi-voies, tout comme [36] et [28] qui modélisent, sans considérer les voies, seulement l'espace roulant dans un modèle thermodynamique.

Il n'existe ainsi, à notre connaissance, pas de modèle général de conducteur prenant en compte dans un cadre de route bidirectionnelle l'impact de la largeur de voie sur le comportement latéral et longitudinal des véhicules.

### **3. MODÈLE DE SIMULATION DE TRAFIC LFM**

Dans cette section, nous exposons en premier lieu les hypothèses de modélisation issues de l'état de l'art et des expérimentations en simulateur et en situation réelle. Ensuite, nous présentons succinctement le modèle IDM (Intelligent Driver Model), issu de la littérature, puis nous montrons comment les différentes spécifications ont été introduites pour former le modèle LFM (*Lateral Force Model*).

### 3.1. HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION

Nous considérons initialement un modèle de simulation de couple conducteur-véhicule prenant en compte un comportement longitudinal, mais ne prenant pas en compte l'infrastructure.

En nous fondant sur l'état de l'art [38], ainsi que sur les expérimentations en simulateur [30, 31] et les traces brutes issues de l'expérimentation en situation réelle [9], nous spécifions les différents éléments d'extension du modèle initial, résumées en Table 2.1 avec la ou les sources de chacune. Il est à noter que seule la partie longitudinale des données de [9] en régime libre ont été analysées, aussi nous ne présumons pas des autres résultats de cette étude.

TABLE 3.1. Hypothèses de modélisation et leurs sources

Facteur	Effet	(1)	(2)	(3)
Largeurs	sur longitudinal	X		X
Largeurs	sur latéral	X	X	?
Véhicules croisés	sur longitudinal			?
Véhicules croisés	sur latéral	X	X	?
Cycles dépassés	sur longitudinal			?
Cycles dépassés	sur latéral	X	X	?
Tracé de la route	sur latéral		X	?
Variabilité	sur latéral	X	X	?

1: (Rosey, 2016) [38]

2: (Mecheri et al., 2017) [30]

3: (Désiré et al., 2017) [9]

Concernant l'aspect longitudinal du comportement, le modèle doit intégrer l'effet de l'infrastructure, considéré selon les paramètres de largeur de voie, sur-largeur et largeur de plate-forme. En effet, une première analyse des données recueillies en situation réelle tend à montrer un impact, au moins de la largeur de plate-forme, sur la vitesse adoptée en régime libre. Cette observation n'a cependant pas été faite en simulateur de conduite. Cependant, considérant les biais liés aux simulateurs de conduite sur la perception de vitesse, nous considérons les données recueillies en situation réelle plus fiables. En effet, l'impression de vitesse en simulateur de conduite est sous-estimée [21] par rapport à la vitesse réelle, ce qui amène à des vitesses relevées plus élevées en simulateur. Cependant, l'usage du simulateur reste valide pour mesurer l'effet de changements d'infrastructures puisque les différences relatives sont conservées.

Certains travaux étudiés dans l'état de l'art ont identifié un impact des véhicules croiseurs sur la vitesse des véhicules, mais cette observation n'a pas été confirmée

selon nos premières analyses des traces brutes en situation réelle, ni de celles en simulateur [31].

Concernant la dynamique latérale du véhicule, celle-ci doit fluctuer en fonction de quatre influences : l'infrastructure, les variations de comportement du conducteur, les véhicules croiseurs, la géométrie du tracé et les cyclistes. L'influence latérale de l'infrastructure doit prendre en compte les mêmes éléments que l'influence longitudinale, *i.e.* la largeur de voie, la sur-largeur et la largeur de plate-forme. Les variations de comportement des conducteurs au cours de leur tâche de conduite peuvent être inter-ou intra-individuelles. Les différences inter-individuelles marquent les paramètres liés à la personnalité et aux habitudes de conduite des individus, tandis que les différences intra-individuelles représentent les variations de comportement au cours du temps. Si l'effet des véhicules croiseurs sur la vitesse des conducteurs n'a pas été démontré, la position latérale est impactée [30] de façon significative selon la présence de trafic, ce qui implique d'intégrer cet élément au modèle.

La seconde expérimentation en simulateur de conduite a montré, conformément à la littérature (*e.g.* [46]), que les conducteurs tendent à « couper » les virages, c'est à dire à s'écarter du centre de la voie dans la zone d'approche, puis s'en rapprocher à l'entrée du virage pour, en sortie de virage, être désaxé vers l'extérieur. La modélisation de ce comportement, en interaction avec les autres éléments, doit donc être réalisée.

Enfin, la troisième expérimentation en simulateur de conduite a montré et quantifié l'effet des cyclistes dépassés par les véhicules, ce qui permet de modéliser et reproduire le phénomène.

### 3.2. INTELLIGENT DRIVER MODEL

Nous avons vu dans l'état de l'art que les modèles comportementaux, *i.e.* fondés sur des grandeurs réelles, se montrent plus explicatifs que les autres familles de modèles. Parmi ces nombreux modèles, nous pouvons citer le modèle de Gipps [14], IDM [43] et Archisim [10].

Pour les besoins d'intégration de nouveaux paramètres de notre modèle, nous avons choisi le modèle IDM car celui-ci 1) est utilisé et intégré dans un grand nombre d'outils, et 2) il exprime un niveau de modélisation suffisant au regard de notre problématique. En effet, nous n'avons pas identifié la nécessité de prendre en compte plusieurs véhicules dans le suivi, comme le proposent les modèles HDM [44], qui est une extension d'IDM, et Archisim. Notons que ce choix de concevoir le modèle le plus simple possible compte tenu des objectifs de simulation<sup>(1)</sup> est pratiquement indépendant de la composante longitudinale et des décisions de changements de voie.

---

<sup>(1)</sup>Principe appelé rasoir d'Ockham, stipulant qu'entre deux explications d'un même phénomène la plus simple est la plus valable.

Le modèle IDM est un modèle dynamique s'exprimant par l'accélération du véhicule :

$$\ddot{x}_n = a_n \left[ 1 - \left( \frac{\dot{x}_n}{v_0^n} \right)^\delta - \left( \frac{s_n^* (\dot{x}_n, \Delta v_n)}{\Delta x_n} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

avec  $a_n$  l'accélération du véhicule  $n$ , le second terme représentant le régime libre, dans lequel le conducteur accélère jusqu'à sa vitesse de confort, et le troisième terme exprime la contrainte exercée par le véhicule *leader* situé devant le véhicule modélisé, impliquant un freinage.

Le second terme utilise  $v_0^n$  la vitesse désirée du véhicule, *i.e.* la vitesse du conducteur si il n'a aucune contrainte d'autres usagers sur l'infrastructure, et  $\delta$  l'exposant d'accélération.  $\Delta v_n = \dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}$  représente la vitesse de rapprochement du véhicule leader.  $s^*$  est une fonction donnant le *gap* (inter-distance) à maintenir pour un couple (vitesse, vitesse d'approche) donné :

$$s_n^* (\dot{x}_n, \Delta v_n) = s_0^n + s_1^n \sqrt{\frac{\dot{x}_n}{v_0^n}} + T_n \dot{x}_n + \frac{\dot{x}_n \Delta v_n}{2\sqrt{a_n b_n}} \quad (3.2)$$

avec  $T_n$  le temps de réaction du conducteur et  $b_n$  la plus grande décélération confortable.  $s_0^n$  et  $s_1^n$  représentent la distance inter-véhiculaire souhaitée en situation congestionnée,  $s_0^n$  étant la partie statique minimale et  $s_1^n$  la partie dynamique dépendant de la vitesse du véhicule.

TABLE 3.2. Valeurs des paramètres du modèle IDM

$v_0$	$T$	$a$	$b$	$s_0$	$s_1$	$l$
120 km/h	1.2 s	0.8 m.s <sup>-2</sup>	1.25 m.s <sup>-2</sup>	1 m	10 m	5 m

Les paramètres  $a_n$  et  $b_n$  dans ce modèle permettent de différencier le comportement qu'adoptent les différents véhicules selon leurs caractéristiques propres. Les paramètres du modèle proposés par ses auteurs [43] sont référencés en Table 3.2.

### 3.3. LATERAL FORCE MODEL

Dans cette section nous détaillons chaque élément du Lateral Force Model, à savoir l'impact de l'infrastructure sur la vitesse en régime libre, et les quatre influences du positionnement latéral : l'infrastructure, les variations de comportement du conducteur, les véhicules croiseurs et la géométrie du tracé.

#### 3.3.1. Impact longitudinal du profil en travers

Le rôle du profil en travers sur le comportement longitudinal du conducteur se traduit, d'après les observations de [9], par une vitesse plus faible en régime libre. Cependant, aucune baisse significative de vitesse n'a été observée lorsque les véhicules sont en situation de suivi.

Notre proposition d'intégration de cette observation est de modifier la vitesse désirée :

$$v_0^{n'} = v_0^n - P_{infra}^x(W_{platform}, sl) \quad (3.3)$$

avec  $P_{infra}^x(W_{platform}, sl)$  la pression de l'infrastructure et  $v_0^n$  la vitesse désirée initiale.

La vitesse désirée n'impactant que le régime libre (équation 3.1), l'adaptation de ce seul paramètre, sans modifier le modèle initial, est suffisante pour obtenir l'effet observé.

D'après les analyses des données acquises en situation réelle [9], la pression dépend exclusivement de la largeur de la plate-forme routière, autrement exprimée par l'addition de la largeur de voie et de la sur-largeur, et non de la largeur de voie exprimée par le marquage. Nous proposons en section 4.2 de se fonder sur la limite de vitesse, pondérée par la déviation de la largeur de voie à celle que rencontrent habituellement les conducteurs. En d'autres termes, une largeur de plateforme plus faible a tendance à diminuer la vitesse libre.

### 3.3.2. Impact latéral du profil en travers

La pression de l'infrastructure s'exprime également sur l'axe latéral en fonction de la pression du marquage de rive, du marquage central et du bord de la plate-forme (voir figure 3.1).

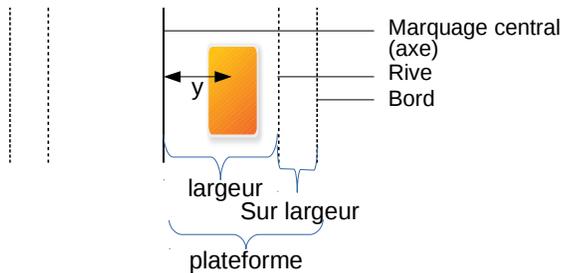


FIGURE 3.1. Éléments du profil en travers

Nous avons choisi une approche inspirée du modèle SFM (*Social Force Model*), initialement destiné à la simulation de la dynamique des piétons [17]. L'idée principale de ce modèle est de considérer le mouvement comme une résultante de forces externes et internes dont la somme indique la dynamique à chaque instant. Les forces prises en compte sont de deux ordres : les forces attractives vers la destination et les autres entités plaisantes de la scène, et les forces répulsives issues des autres piétons et des bordures non franchissables.

Le modèle a ensuite été généralisé [18] à la simulation de trafic, mais uniquement dans sa composante longitudinale. Nous proposons d'utiliser le concept pour influencer

le comportement latéral du véhicule, en considérant les éléments du profil en travers (marquage central, marquage de rive et véhicules) comme des forces répulsives.

Ainsi, la force latérale induite par l'infrastructure s'exprime par :

$$F_{infra}^n = \omega \frac{1}{y} - \beta \frac{1}{W_{lane} - y} - (1 - \beta) \frac{1}{W_{platform} - y} \quad (3.4)$$

avec  $y$  la position latérale du centre du véhicule par rapport au marquage central,  $W_{lane}$  la largeur de voie et  $W_{platform}$  la largeur de la plate-forme du côté de circulation du véhicule. Le premier terme représente la force issue du marquage central, le second celle issue du marquage de rive, et le dernier celle de la plate-forme.

Notons que ces forces s'équilibrent, en fonction du paramètre  $\beta$  représentant la proportion de répulsion des deux éléments situés à l'extérieur de la chaussée et  $\omega$  représentant le poids relatif des deux côtés de la chaussée.

Par nature, les forces sont monotones ; nous avons choisi la forme inverse  $\frac{1}{y}$  pour moduler la pression de façon plus importante lorsque le véhicule se rapproche des bords de sa voie. Notons qu'en théorie, utiliser la position relative au marquage central comme dénominateur pose problème dans le cas  $y = 0$  (et modifie drastiquement l'effet de la force si  $y < 0$ ). Le modèle proposé étant intra-voie, si le modèle est correctement calibré et le pas de temps est suffisamment petit, alors ce cas est peu probable compte tenu des autres forces prises en compte. En pratique, la prise en compte du marquage suivant (marquage de rive de la circulation en sens inverse, ou marquage de séparation de sens de circulation en cas multi-voies) pour le calcul de  $y$  permet de résoudre cette difficulté.

### 3.3.3. Variations latérales individuelles

Les variations inter-individuelles sont prises en compte par l'introduction de paramètres correspondant au profil de vitesse du conducteur, influant son comportement longitudinal en fonction de la limite de vitesse autorisée et de sa souplesse de trajectoire.

Le terme d'accélération latérale  $\ddot{y}_n$  en fonction de la force s'exprime ainsi :

$$\ddot{y}_n = \frac{\sum_i F_i^n - \dot{y}_n}{\tau_n} \quad (3.5)$$

avec  $F_i^n$  la somme des forces appliquées au véhicule  $n$ ,  $\dot{y}_n$  sa vitesse latérale courante et  $\tau_n$  son temps de relaxation. Ce dernier paramètre influe ainsi sur la variation d'accélération latérale maximale de chaque véhicule de façon différenciée.

Les variations intra-individuelles sont modélisées par l'adjonction d'un facteur correspondant à la dérive de la trajectoire liée au caractère imparfait du contrôle du véhicule  $\xi_n$ . Dans la suite de ce travail, nous avons considéré des véhicules sans dérive.

### 3.3.4. Impact latéral des véhicules croiseurs

Les véhicules croiseurs sont considérés comme une force répulsive ayant un effet pouvant être longitudinal (pression sur la vitesse du conducteur) et latéral (déportation

du véhicule vers l'extérieur de sa voie). Cette pression est perçue à distance (et non à l'aplomb comme la pression des bords de voie) et s'applique différenciellement selon les positions relatives des véhicules.

Soient  $\Delta_y(n, c)$  la distance latérale du véhicule  $n$  à la cible  $c$  et  $\Delta_x(n, c)$  sa distance longitudinale, la pression s'exerce sous forme triangulaire jusqu'à une certaine distance maximale  $d_{max}$  où celle-ci devient négligeable :

$$F_{vc}^n = \gamma \frac{1}{y} \times \left(1 - \frac{\Delta_y(n, c)}{2 \times W_{lane}}\right) \times \left(1 - \frac{\Delta_x(n, c)}{d_{max}}\right) \quad (3.6)$$

Le premier terme permet de proportionner la force à celle du marquage d'axe en fonction d'un paramètre  $\gamma$ , et les deux suivants indiquent que la force augmente quand la distance latérale (respectivement longitudinale) diminue.

### 3.3.5. Comportement latéral en virage

Le comportement en virage (déport précédent l'entrée du virage, puis trajectoire coupant celle de la voie, et sortie de virage déportée du centre de la voie) nécessite deux aspects : (1) l'agrégation de segments en un seul virage de longueur  $l$  et de rayon  $r$ , afin de positionner les forces sur l'infrastructure, et (2) la répartition des forces.

Ces forces, tout comme celles issues des véhicules croiseurs, sont perçues par les véhicules à l'approche de leur position.

$$F_{curve}^n = \frac{1}{y} \times edge_j^f \times \left(1 - \frac{\Delta_x(n, edge_j)}{d_{max}}\right) \quad (3.7)$$

avec  $edge_j^f$  la pression relative au point  $j$ . Cette pression dépend du tracé, et plus particulièrement de la distance angulaire  $ad_j$  entre le segment précédent l'entrée du virage et celui suivant la sortie du virage, ainsi que du rayon de courbure du virage donné par la distance curviligne entre l'entrée et la sortie du virage :

$$edge_j^f = \theta \frac{\min(ad_j, max_a)}{max_a} * \frac{\lambda}{\Delta(e, s)} \quad (3.8)$$

avec  $max_a$  l'angle maximal du virage de façon à limiter la force exercée,  $\lambda$  sa longueur minimale, et  $\theta$  le coefficient répulsion/attraction, positif pour le nœud d'entrée et négatif pour celui de sortie.

De plus, la rapidité des changements de position en virage peut induire une modification du temps de relaxation (*i.e.* temps de réaction / accélération latérale acceptable).

### 3.3.6. Impact latéral des cyclistes dépassés

Les cyclistes circulant sur le bord de route sont considérés, de même que les véhicules croisés, comme une force répulsive latérale (déportation du véhicule vers l'intérieur de sa voie).

En conséquence, considérant  $\Delta_y(n, v)$  la distance latérale du véhicule  $n$  au cycliste  $v$  et  $\Delta_x(n, v)$  leur distance longitudinale, la pression est formulée telle que :

$$F_{vd}^n = \zeta \frac{1}{y} \times \left(1 - \frac{\Delta_y(n, v)}{W_{platform}}\right) \times \left(1 - \frac{\Delta_x(n, v)}{d_{max}}\right) \quad (3.9)$$

avec  $\zeta$  paramétrisant la force.

### 3.4. RÉCAPITULATIF

Le modèle LFM s'exprime donc de la façon suivante :

$$F(n) = F_{infra}^n + \sum_j F_{vc_j}^n + \sum_k F_{curve_k}^n + \sum_j F_{vd_j}^n + \xi_n \quad (3.10)$$

Le premier terme exprime les forces exercées par l'infrastructure, le second terme celles des véhicules croisés, le troisième terme celles des courbes, le quatrième terme celles des deux-roues dépassés et le dernier terme les fluctuations intra-individuelles, illustrés en Figure 3.2. Cette somme des forces est utilisée pour calculer l'accélération latérale du véhicule  $\ddot{y}_n$ , laquelle prend en compte un facteur individuel relatif au contrôle du véhicule. Enfin, l'effet sur le comportement longitudinal est modélisé par la modification du paramètre de vitesse désirée présent dans le modèle initial IDM.

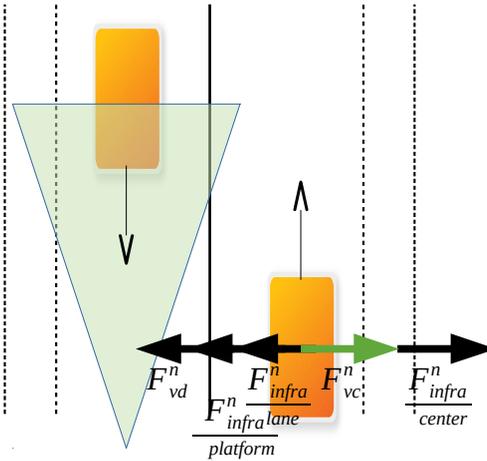


FIGURE 3.2. Bilan des forces

## 4. EXPÉRIMENTATIONS

### 4.1. SIMULATEUR DE TRAFIC

Nous avons implémenté un prototype pour analyser de façon indépendante les différents éléments du modèle LFM via un programme écrit en Python. De nombreux simulateurs de trafic ont été proposés dans la littérature [35], dont certains tel SUMO [1]

ont leur code source ouvert. S'ils permettent de mettre rapidement en œuvre des simulations à large échelle, leur maturité complique paradoxalement l'étude d'un modèle comme LFM : d'une part, il n'y a à notre connaissance pas de simulateur prévoyant explicitement d'adapter le comportement latéral du véhicule en fonction des autres véhicules et de l'infrastructure à chaque pas de temps, ce qui ne permet pas d'ajouter simplement le modèle sans modification substantielle du moteur de simulation ; d'autre part la complexité de ces outils rend difficile la maîtrise de l'ensemble des éléments de l'environnement de simulation et de leurs interactions avec le modèle implémenté.

L'architecture choisie repose sur une modélisation à base d'agents [45] : chaque entité perçoit son environnement, puis décide de son action avant de l'effectuer.

Compte tenu de sa formulation, le modèle IDM est sensible à l'ordre d'activation des déplacements. De façon à éviter ce biais, nous avons choisi d'implémenter une activation pseudo-parallèle des agents (algorithme 1). Ainsi, à chaque pas de simulation, l'environnement fournit l'ensemble des informations perceptuelles à l'ensemble des agents, puis une seconde boucle permet à ceux-ci de calculer leur nouvelle position en fonction des percepts stockés localement, ce qui rend l'ordre d'activation sans effet sur l'exécution de la simulation. Il est à noter que cette activation pseudo-parallèle peut générer des conflits de position entre véhicules, autrement dit il n'y a pas de garantie qu'il n'y ait pas de collision. En pratique, ces conflits n'apparaissent que pour des pas de temps supérieurs à 1 seconde ou en cas d'intervention scénarisée ou manuelle.

- 1- **Pour** chaque pas de simulation **faire**
- 2- **Pour** chaque  $v \in \mathcal{V}$
- 3-  $P_v = \text{calcul\_percepts}(v, S)$
- 4-  $\text{perception}(v, P_v)$
- 5- **Fin pour**
- 6- **Pour** chaque  $v \in \mathcal{V}$
- 7-  $(x, y) = \text{activer}(v)$
- 8- **Fin pour**
- 9- **Fin pour**

#### Algorithme 1 : Algorithme de simulation

Les paramètres du modèle ont été calibrés manuellement de façon à montrer la capacité du modèle à reproduire les comportements observés en simulateur de conduite. Il ne s'agit donc pas d'obtenir une validation quantitative du modèle par rapport à des données obtenues en situation réelle.

Le calibrage a été réalisé de façon indépendante pour les différents éléments intégrés au modèle, de façon incrémentale puisque chaque force est considérée indépendamment des autres. Une stratégie *one at a time* a été utilisée pour explorer l'espace de valeur de chaque paramètre du modèle, en reproduisant les conditions expérimentales des données obtenues en simulateur de conduite [31], afin de minimiser l'écart à la moyenne des observations dans chaque condition. Ce calibrage manuel a plusieurs limites : il ne permet pas l'exploration systématique des espaces de valeurs, et il suppose qu'il n'y a pas d'interactions entre les paramètres.

Concernant le modèle IDM, nous avons ré-utilisé les paramètres proposés par leur auteur et résumés en table 3.2. Par ailleurs, le modèle n'étant pas stochastique, les résultats indiqués résultent uniquement des scénarios décrits. De façon à simplifier l'étude, la variabilité inter-individuelle, issue des paramètres individuels de chaque agent, n'a pas été explorée.

Pour toutes les simulations, le pas de temps est de 0,5 seconde.

#### 4.2. ÉVALUATION DE L'IMPACT DU PROFIL EN TRAVERS SUR LE COMPORTEMENT LONGITUDINAL

Les données brutes recueillies lors de l'expérimentation en situation réelle [9] montrent un effet de la largeur de plate-forme sur la vitesse adoptée, en corrélation avec la vitesse autorisée (Figure 4.1).

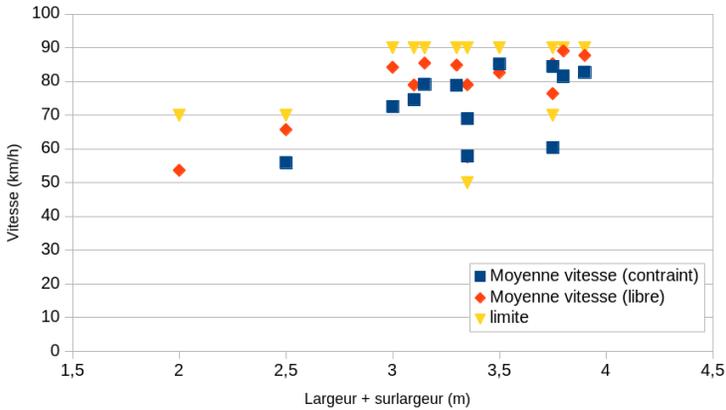


FIGURE 4.1. Vitesses moyennes en régimes libres et contraints selon la largeur de plate-forme.

Deux types de comportements sont observés : les conducteurs tendent à circuler à une vitesse inférieure à la limite autorisée, sauf lorsque la plate-forme est large considérant la limite.

Dans notre modèle, la vitesse désirée est modifiée par la pression de l'infrastructure  $P_{infra}^x(W_{platform}, sl)$  et d'un paramètre de conducteur représentant l'agressivité de conduite. Si l'on considère ce paramètre au neutre, *i.e.* que seule la pression de l'infrastructure influe sur la vitesse désirée, la formule est :

$$P_{infra}^x(W_{platform}, sl) = sl - (3.5 - W_{platform}) * 10 \quad (4.1)$$

avec  $sl$  la limitation de vitesse sur la portion de route,  $W_{platform}$  la largeur de la plate-forme, 3.5 la largeur moyenne des plate-formes rencontrées et 10 le coefficient d'impact.

La figure 4.2 montre que la formule proposée génère une vitesse désirée proche de celles observées, avec une erreur moyenne de 2.14 %. La déviation la plus grande se situe pour la limitation de vitesse la plus basse (50 km/h), pour laquelle nous ne disposons que d'un seul échantillon de données. Nous notons également une surestimation des vitesses en simulation pour les zones limitées à 90 km/h.

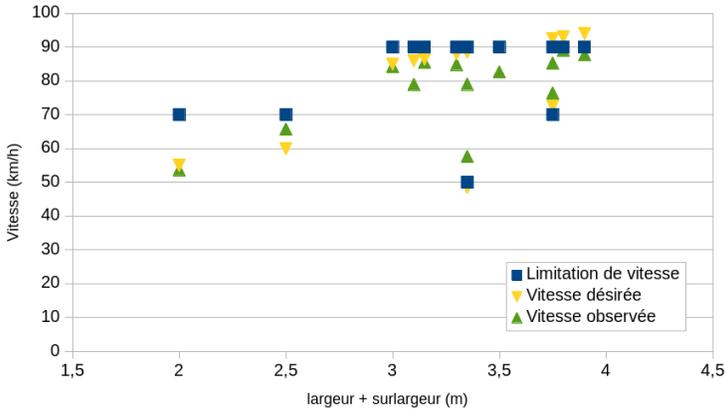


FIGURE 4.2. Moyenne des vitesses désirées et des vitesses observées en régime libre selon la largeur de plate-forme.

#### 4.3. ÉVALUATION DE L'IMPACT DU PROFIL EN TRAVERS SUR LE COMPORTEMENT LATÉRAL

Il a été montré que la position latérale des conducteurs était influencée par la largeur de la voie et par celle de la sur-largeur [31].

Les paramètres sont donnés en table 4.1, et les résultats sont montrés en figures 4.3 et 4.4. En figure 4.3, on observe que la position latérale prise par les véhicules simulés est très similaire à celles des conducteurs en simulateur de conduite. Les différences sont très inférieures aux écarts-type observés parmi les sujets, qui est de l'ordre de 20cm. De la même façon, la figure 4.4 montre que l'impact de la sur-largeur est bien capturé par le modèle LFM.

TABLE 4.1. Paramètres de la composante infrastructure du comportement latéral

	$\nu$	$\beta$	$\tau$
Valeur	1.2	0.5	4

Comme nous l'avons indiqué dans la section 3, nous n'avons pas simulé de variabilité intra-individuelle, aussi nous n'avons pas évalué la variabilité du contrôle latéral sans présence de trafic dans la voie contraire. En effet, un modèle fondé sur des forces ne produit pas de variations quand celles-ci sont constantes.

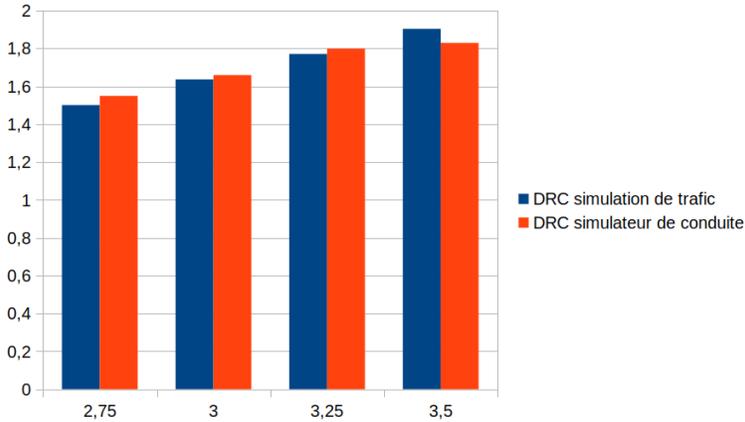


FIGURE 4.3. Distance au centre de la route (m) en simulateur de conduite et en simulateur de trafic en fonction de la largeur de voie sans sur-largeur (m), sur un segment droit d'1 km de route bidirectionnelle (1x1 voie) sans trafic sur la voie opposée, pour un véhicule en régime libre

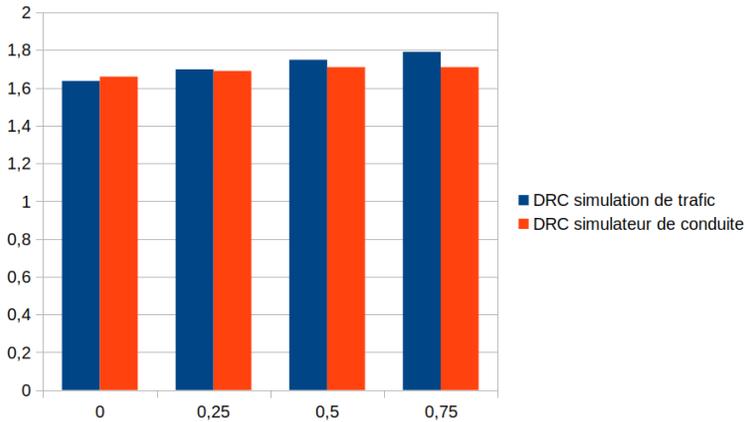


FIGURE 4.4. Distance au centre de la route (m) en simulateur de conduite et en simulateur de trafic en fonction de la largeur de bande dérasée (m) pour une voie de 3 m, sur un segment droit d'1 km de route bidirectionnelle (1x1 voie) sans trafic, pour un véhicule en régime libre

#### 4.4. ÉVALUATION DE L'IMPACT DES VÉHICULES CROISÉS SUR LE COMPORTEMENT LATÉRAL

Le trafic influence la position latérale en éloignant les conducteurs du centre de la route [31]. Pour cette étude, le paramètre  $\gamma$  a été paramétré à 1,5; et la distance  $d_{max}$  est fixée à 200 m. Les autres paramètres sont restés identiques. La figure 4.5

montre un exemple de trajectoire en présence de véhicules croisés. Jusqu'à une position  $x = 300$  m, le véhicule ne perçoit aucun autre véhicule. Il croise le premier véhicule à hauteur de  $x = 500$  m, puis un second à 700 m, et enfin un dernier à 950 m. On observe le déplacement latéral initié en amont du croisement, ainsi que la tentative de retour à une position latérale plus centrale, mais qui est contrariée par les autres véhicules croisés.

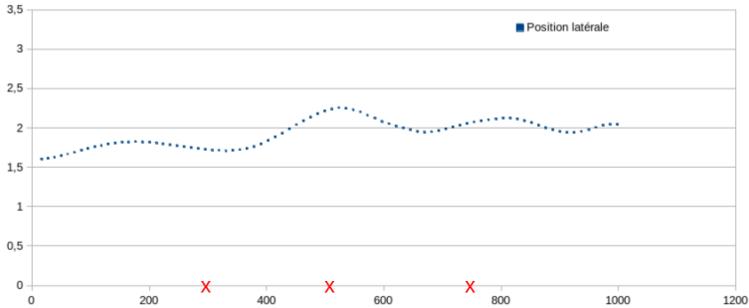


FIGURE 4.5. trajectoire d'un véhicule simulé en présence de véhicules croisés (déviation du marquage central (m)), sur un segment droit d'1,2 km de route bidirectionnelle (1 × 1 voie), en régime libre, les croix indiquent le début de perception d'un véhicule croiseur

La figure 4.6 montre les résultats de simulations dans deux conditions (trafic ou sans trafic), pour deux profils en travers différents (3 m + 0,5 m et 3 m + 0 m), ainsi que les observations de [30]. Les résultats du modèle calibré sont très semblables à ceux étudiés en simulateur de conduite, tant à travers les modalités de trafic que de profil.

Les indicateurs de variabilité du comportement latéral sont cohérents avec l'étude sus-cités mais moins marqués. En effet, dans le scénario avec trafic, la modalité 3 m + 0 m présente un écart-type des positions latérales de 0,12 m, tandis que la modalité 3 m + 0,5 m a un écart-type de 0,10 m, ce qui indique que la restriction de la largeur de voie génère un plus grand contrôle de la position latérale.

#### 4.5. ÉVALUATION DU COMPORTEMENT LATÉRAL EN VIRAGE

Dans cette expérimentation, nous étudions la composante en virage du modèle de comportement.

[40] considère seulement deux forces, une de répulsion en amont de l'entrée du virage, et une d'attraction en sortie du virage. Les résultats montrent un résultat acceptable dans l'approche et l'entrée du virage, mais peu fidèle en milieu et sortie de virage. Plus précisément, en considérant les trois points suivant : l'entrée  $e$ , l'apex  $a$  (*i.e.* la semi-distance) et la sortie  $s$ , [40] situe une force répulsive en amont de l'entrée en position  $x_{edge} = x_e - d$ , avec  $d$  le paramètre permettant le décalage de l'écartement du véhicule, et une force attractive à la sortie du virage  $x_s$ .

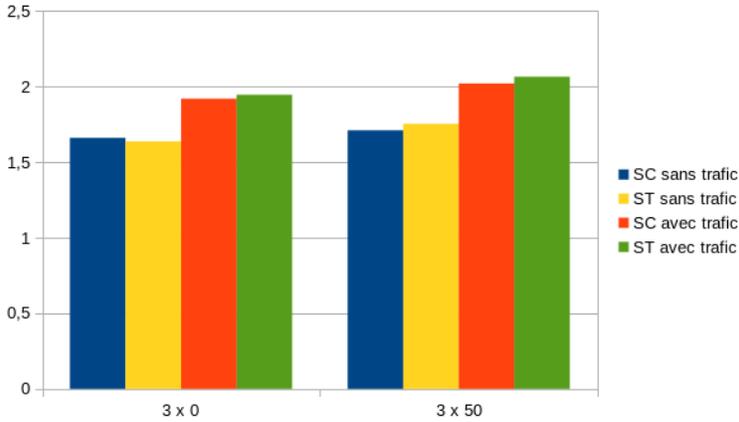


FIGURE 4.6. Distance moyenne au centre de la route (DRC) en simulateur de conduite et en simulateur de trafic en fonction du profil et de la présence de trafic sur la voie opposée (m), sur un segment droit d'1km de route bidirectionnelle (1x1 voie). Dans le cas *avec trafic*, 5 véhicules sont croisés sur le segment.

Nous proposons ici d'ajouter un troisième nœud intermédiaire permettant d'influer plus précisément sur le comportement au sein du virage.

Pour cela, nous avons utilisé les paramètres indiqués en tables 4.2 et 4.3. En comparaison avec la seconde expérimentation de [30] nous avons opté pour le virage difficile (rayon de courbure de 150 m, 76° de différence angulaire). Pour la réplification de [40] utilisant deux nœuds, le premier nœud répulsif est situé à 150 m en amont de l'entrée du virage, avec un coefficient répulsif de 1, tandis que le second nœud est à la sortie du virage, avec un coefficient attractif de  $-2$ . Notre proposition utilise trois nœuds, le premier étant également un nœud répulsif situé à 75 m de l'entrée du virage, puis un second attractif à 25 m de l'entrée, et enfin un troisième attractif également à 25 m de la sortie du virage. De plus, comme mentionné dans le modèle, nous réduisons le paramètre de relaxation de l'accélération latérale à 2.

TABLE 4.2. Valeurs des paramètres communs de la composante virage du modèle LFM

$d_{max}$	$ad_j$	$max_a$	$\lambda$
200	76	90	50

La figure 4.7 montre la position latérale à l'approche, à l'entrée du virage, à son apex et en sortie. Les résultats de [40] sont comparables avec ceux de l'étude en simulateur, hormis pour la position latérale à l'apex qui est plus fortement désaxée vers le centre de la route. Notre proposition améliore ces résultats pour toute les positions, hormis la position d'entrée du virage légèrement moins précise.

TABLE 4.3. Valeurs des paramètres des deux variantes

	$edge_1$	$\theta_1$	$edge_2$	$\theta_2$	$edge_3$	$\theta_3$	$\tau_n$
Nœuds = 2	$x_e - 150$	1	$x_s$	-2	-	-	4
Nœuds = 3	$x_e - 75$	2	$x_e - 25$	-2	$x_s - 25$	-4	2

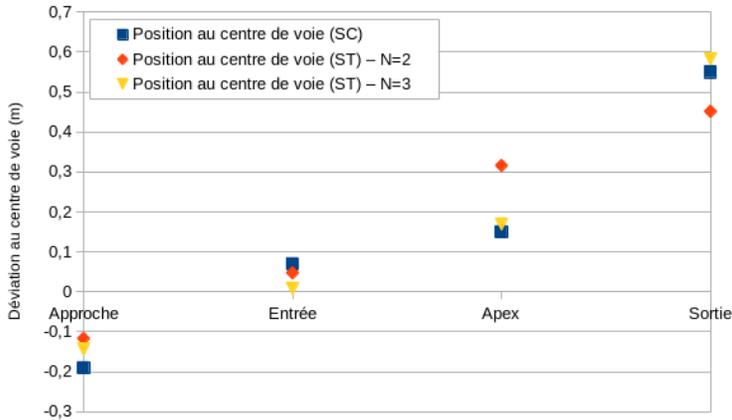


FIGURE 4.7. Distance au centre de la voie (m) en courbe en simulateur de trafic (ST) et en simulateur de conduite (SC), sur un segment de route bidirectionnelle (1 × 1 voie) comportant une section droite de 500 m, puis une courbe sur 200 m, puis une section droite de 300 m, sans trafic sur la voie opposée

Ce résultat s'explique par la modélisation à l'aide d'un troisième nœud qui permet de rabattre le véhicule plus rapidement entre l'approche du virage et son apex. Il est à noter que si  $\tau_n$  n'était pas modifié, le modèle ne pourrait pas reproduire l'accélération latérale observée en simulateur de conduite.

#### 4.6. ÉVALUATION DU COMPORTEMENT LATÉRAL EN DÉPASSEMENT

La présence de cycliste en bord de route influence la position latérale en rapprochant les conducteurs du centre de la route [30]. Le scénario de simulation est une circulation sur route bi-directionnelle, avec un trafic croisé constant obligeant le conducteur à ne pas utiliser la voie inverse pour effectuer son dépassement. L'étude a montré que la taille de la sur-largeur n'influe pas sur le positionnement du véhicule, aussi nous étudions une configuration de profil telle que la largeur de la voie est de 3 m et la sur-largeur de 0,75 m. Le cycliste est positionné latéralement soit à gauche du marquage de rive (-0,25 m), soit à droite (0,25 m et 0,75 m).

[30] a montré que la présence du cycliste dans la voie affectait l'interdistance pour une même contrainte latérale effective. Autrement dit, la position latérale à gauche du marquage de rive a un effet plus important qu'à droite, ce qui implique une non-linéarité

de l'interdistance. Nous proposons donc de modifier le coefficient  $\zeta$  en fonction de la présence ou non dans la voie de circulation du véhicule. Pour cette étude, le paramètre  $\zeta$  a été fixé à 2 lorsque le cycliste se situe à droite du marquage, et à 2,5 lorsqu'il se situe à gauche ; les autres paramètres sont restés identiques. La modélisation est semblable à celle des véhicules croisés : la force grandit lorsque le véhicule se rapproche du cycliste, à partir d'une distance de perception de 200 m.

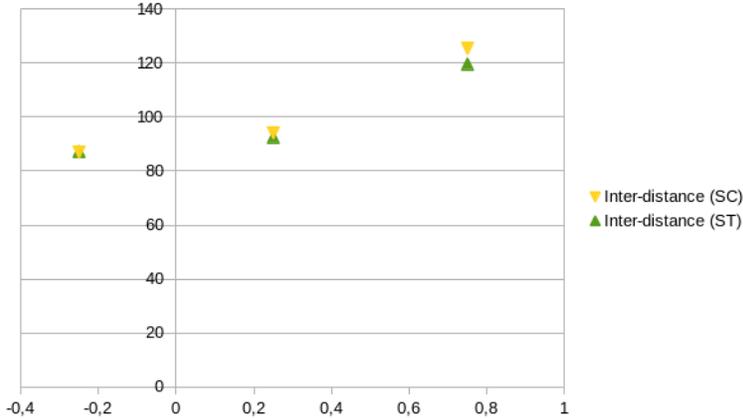


FIGURE 4.8. Interdistance entre le véhicule et le cycliste en simulateur de conduite et en simulateur de trafic en fonction de la position du cycliste par rapport au marquage de rive (m), sur un segment droit d'1 km de route bidirectionnelle (1 × 1 voie) sans trafic sur la voie opposée, pour un véhicule en régime libre

Les résultats (figure 4.8) montrent des interdistances cohérentes pour les positions de cycliste à droite du marquage de rive.

## 5. DISCUSSION

### *Modèle*

Comme nous l'avons vu, le modèle LFM a été associé à IDM pour la gestion des aspects longitudinaux. Le profil en travers a un impact faible sur la composante longitudinale du comportement des conducteurs, ne nécessitant ainsi qu'un aménagement marginal du modèle IDM dans la sélection de la vitesse désirée. Notons ainsi qu'il est possible de remplacer ce modèle longitudinal par tout modèle comportemental représentant explicitement la vitesse désirée. Par exemple, certains modèles comme [24] permettent d'assurer l'absence de collision entre véhicules.

Concernant les positions latérales, LFM inclut quatre éléments :

- la pression de l'infrastructure, via ses marquages, pour positionner le véhicule dans sa voie,

- l'impact des véhicules croisés qui provoquent un écart important à la situation sans trafic,
- la pression des virages, décomposée en nœuds, et
- l'impact des cyclistes dépassés.

Les expérimentations montrent que, suite à un calibrage manuel du modèle, des valeurs proches de celles ayant été obtenues par [30] sont observées.

Concernant la prise de virage, notre paramétrage est dépendant du virage particulier du scénario. La modélisation à base de nœuds permet d'envisager la construction automatique de ces nœuds à partir de la géométrie du virage.

Comme indiqué en section 3.1, l'ensemble des analyses en situation réelle n'a pas encore été effectuée, LFM est donc principalement fondé sur les données obtenues en simulateur de conduite. Cependant, [39] ont montré que si l'effet de la représentation en simulateur sur le comportement du conducteur était similaire à celui en situation réelle (les conducteurs se positionnent effectivement plus à gauche ou plus à droite de leur voie), les grandeurs mesurées ne sont pas les mêmes. Mecheri et al [30] indiquent également que le dispositif utilisé (avec ou sans représentation visuelle de la cabine) modifiait le positionnement absolu, mais pas les impacts relatifs. Le calibrage final du modèle doit donc être fait sur les données réelles et non celles issues des études en simulateur.

Par ailleurs, une limite du modèle proposé est qu'il possède un grand nombre de paramètres à calibrer, dont les interactions n'ont pas été entièrement explorées. En conjonction avec les données réelles, qui peuvent amener à simplifier le modèle, une analyse de sensibilité sera à mener pour détecter les paramètres les plus importants.

### *Architecture*

Pour modéliser le comportement latéral du véhicule admettant des variations en fonction de l'infrastructure et du trafic environnant, l'approche adoptée dans le modèle LFM s'appuie sur le concept de forces sociales, issue des travaux de Helbing [17, 18]. L'idée fondamentale est de proposer un modèle simple et robuste qui, sans reproduire les mécanismes cognitifs mis en œuvre dans le système véhicule/conducteur réel, produit un résultat semblable.

Cette approche sub-symbolique, si elle ne permet pas de produire des comportements complexes, a pour avantages sa tractabilité et dans certains cas, comme pour LFM, la possibilité de déléguer une partie des calculs à l'environnement multi-agents. L'environnement est ici considéré au sens de [49] comme un bloc architectural fournissant un ensemble de service aux agents, notamment en structurant un environnement logique venant en sur-couche de l'environnement réel ou simulé [47, 48].

Dans le cas de LFM, on distingue au sein du modèle deux catégories d'influences générant le comportement d'un agent  $n$  :

- les influences externes statiques : marquage et largeur de plateforme routière  $F_{infra}^n$ , géométrie via l'ajout de nœuds  $F_{curve_k}^n$  ;
- les influences externes dynamiques : véhicules croisés  $F_{vc_j}^n$ , cycles  $F_{vd_j}^n$  ;
- les influences internes : variation individuelle  $\xi_n$ , temps de relaxation  $\tau_n$ .

Les influences internes sont par définition liées à chaque agent, leur calcul peut ainsi être intégré à ceux-ci. Concernant les influences externes, il y a deux possibilités : soit elles sont calculées au sein de chaque agent, ce qui implique de transmettre à ceux-ci via leur perception toutes les informations nécessaires, soit elles sont calculées par l'environnement, puis transmises et appliquées par l'agent.

La délégation à l'environnement du calcul des influences externes suit deux objectifs : améliorer le temps de calcul [19], et séparer explicitement ce qui relève du processus cognitif de l'agent de ce qui ne nécessite pas de traitement interne de la part de celui-ci [41]. Dans le cadre de la mise en place de LFM, si la dynamique des influences externes (puisque même les influences statiques dépendent du positionnement des agents) implique une amélioration du temps de calcul modeste, la délégation à l'environnement permet de simplifier le module de décision de l'agent par l'application de la théorie des affordances [13] : nous considérons alors que l'environnement routier *afforde* au conducteur son positionnement latéral via cet ensemble de forces.

## 6. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé un nouveau modèle de simulation de trafic permettant de prendre en compte explicitement le profil en travers de la route. Pour cela, nous avons introduit le modèle LFM, *Lateral Force Model*, qui reproduit le comportement latéral des véhicules par l'assimilation des contraintes routières sous forme de forces répulsives et attractives. Les contraintes intégrées au modèle sont l'infrastructure (marquages et géométrie), les véhicules croisés, les virages, et les cyclistes.

La prise en compte du positionnement latéral à l'intérieur de la voie poursuit deux objectifs : d'une part, si la position latérale influence la vitesse des autres véhicules, sa prise en compte explicite permet de prédire et expliquer l'impact des modifications du profil de la route sur le comportement des conducteurs et les flux résultants, d'autre part une modélisation plus proche des situations réelles permet d'améliorer la fidélité des situations produites pour les utilisateurs dans le cadre de simulations immersives telles que les simulateurs de déplacement.

Les expérimentations indiquent la validité de l'approche à base de forces et du modèle LFM au vu des données obtenues. Des expérimentations supplémentaires doivent être menées afin d'étudier les interactions entre les différentes forces, notamment dans le cas de scénarios limites. De plus, une analyse de sensibilité permettrait de vérifier la résistance au bruit du modèle de simulation. Une phase de calibrage multi-critères sur la base des données réelles doit également être menée. En effet, ces nouvelles données peuvent d'une part infirmer certains résultats de l'expérimentation en simulateur et d'autre part permettre la détection de nouvelles influences, comme un effet des

véhicules croisés sur le comportement longitudinal, aux niveaux microscopiques et macroscopiques. Un second axe d'investigation concerne les routes à plusieurs voies, pour lesquelles l'effet des véhicules circulant dans le même sens n'a pas été étudié. La littérature semble indiquer un effet de la position des véhicules dépassés en fonction de leur type (véhicule léger ou poids lourds). L'introduction des deux-roues non-motorisés est un premier pas en ce sens.

Enfin, les expérimentations en simulateurs de conduite ont été effectuées avec des véhicules qui conservaient la même position latérale tout au long des scénarios. Il serait ainsi intéressant de voir si l'introduction du modèle LFM aurait un impact sur le comportement des conducteurs et les grandeurs mesurées.

### REMERCIEMENTS

Le projet PROFIL est une opération réalisée avec l'aide financière de la FONDATION SECURITE ROUTIERE, en partenariat avec le CEREMA et l'IFSTTAR. L'objectif du projet est une meilleure compréhension de la façon dont le profil de la route, et notamment le positionnement des marquages, influence le comportement des conducteurs et donc leur sécurité. Pour cela, sont mises en œuvre des études en situation réelle à l'aide d'un véhicule instrumenté, menées par le CEREMA, d'études en simulateur de conduite, menées par l'IFSTTAR, de comparaison entre les deux situations, menée par le CEREMA, et de simulations de trafic, menées par l'INSA.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. ALVAREZ LOPEZ, M. BEHRISCH, L. BIEKER-WALZ, J. ERDMANN, Y.-P. FLÖTTERÖD, R. HILBRICH, L. LÜCKEN, J. RUMMEL, P. WAGNER & E. WIESSNER, « Microscopic Traffic Simulation using SUMO », in *The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, 2018.
- [2] M. BANDO, K. HASEBE, A. NAKAYAMA, A. SHIBATA & Y. SUGIYAMA, « Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation », *Physical Review E* **51** (1995), p. 1035-1042.
- [3] J. BARCELÓ et al., *Fundamentals of traffic simulation*, ISOR, vol. 145, Springer, 2010.
- [4] L. BONTE, S. ESPIÉ & P. MATHIEU, « Virtual lanes interest for motorcycles simulation », Tech. report, HAL, 2007.
- [5] J.-C. BORNARD, « Développement d'un modèle du conducteur automobile : De la modélisation cognitive à la simulation numérique », Thèse, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2012.
- [6] M. BRACKSTONE & M. McDONALD, « Car-following : a historical review », *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* **2** (1999), n° 4, p. 181-196.
- [7] C. BUISSON & J.-B. LESORT, *Comprendre le trafic routier. Méthodes et calculs*, Certu, 2010.
- [8] G. CZURA, P. TAILLANDIER, P. TRANOUEZ & É. DAUDÉ, « MOSAIIC: City-Level Agent-Based Traffic Simulation Adapted to Emergency Situations », in *Proceedings of the International Conference on Social Modeling and Simulation, plus Econophysics Colloquium 2014*, Springer, 2015, p. 265-274.
- [9] L. DÉSIRÉ, Y. DUPUIS, R. GRITTI & M. ADAM, « Mesure de la trajectoire en situation réelle de conduite et comparaison avec les comportements en simulateur de conduite », Tech. report, Cerema – Dter Ouest et Dter NC, 2017.
- [10] S. ESPIÉ & J. M. AUBERLET, « ARCHISIM: A behavioral multi-actors traffic simulation model for the study of a traffic system including ITS aspects », *International Journal of ITS Research* (2007), n° 1, p. p7-16.
- [11] M. FELLENDORF & P. VORTISCH, « Microscopic traffic flow simulator VISSIM », in *Fundamentals of traffic simulation*, Springer, 2010, p. 63-93.

- [12] D. GETTMAN & L. HEAD, « Surrogate safety measures from traffic simulation models », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2003), n° 1840, p. 104-115.
- [13] J. J. GIBSON, *The Ecological Approach to Visual Perception*, Lawrence Erlbaum Associates, 1979.
- [14] P. GIPPS, « A model for the structure of lane-changing decisions », *Transportation Research Part B: Methodological* **20** (1986), n° 5, p. 403-414.
- [15] B. GUNAY, « Car following theory with lateral discomfort », *Transportation Research Part B: Methodological* **41** (2007), n° 7, p. 722-735.
- [16] A. K. GUPTA & I. DHIMAN, « Analyses of a continuum traffic flow model for a nonlane-based system », *International Journal of Modern Physics C* **25** (2014), n° 10, article no. 1450045.
- [17] D. HELBING & P. MOLNAR, « Social force model for pedestrian dynamics », *Physical review E* **51** (1995), n° 5, p. 4282-4286.
- [18] D. HELBING & B. TILCH, « Generalized force model of traffic dynamics », *Physical review E* **58** (1998), n° 1, p. 133-138.
- [19] E. HERMELLIN & F. MICHEL, « Expérimentation du principe de délégation GPU pour la simulation multiagent. Les boîds de Reynolds comme cas d'étude », *Revue d'Intelligence Artificielle* **30** (2016), n° 1-2, p. 109-132.
- [20] S. P. HOOGENDOORN & P. H. L. BOVY, « State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling », *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering* **215** (2001), n° 4, p. 283-303.
- [21] Q. HUSSAIN, W. K. ALHAJYASEEN, A. PIRDAVANI, N. REINOLSMANN, K. BRIJS & T. BRIJS, « Speed perception and actual speed in a driving simulator and real-world: A validation study », *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour* **62** (2019), p. 637-650.
- [22] A. KESTING, M. TREIBER & D. HELBING, « General lane-changing model MOBIL for car-following models », *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board* (2007), n° 1999, p. 86-94.
- [23] S. KHAN & P. MAINI, « Modeling heterogeneous traffic flow », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (1999), n° 1678, p. 234-241.
- [24] S. KRAUSS, « Microscopic Modeling of Traffic Flow : Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics », Thèse, Université de Cologne, 1998.
- [25] F. KSONTINI, Z. GUESSOUM, R. MANDIAU & S. ESPIÉ, « Using ego-centered affordances in multi-agent traffic simulation », in *Proceedings of the 2013 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems*, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2013, p. 151-158.
- [26] A. LAURESHYN, Å. SVENSSON & C. HYDÉN, « Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data : Theoretical framework and first implementation », *Accident Analysis & Prevention* **42** (2010), n° 6, p. 1637-1646.
- [27] T.-C. LEE, J. POLAK & M. BELL, « New approach to modeling mixed traffic containing motorcycles in urban areas », *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board* (2009), n° 2140, p. 195-205.
- [28] Y. LI, L. ZHANG, S. PEETA, H. PAN, T. ZHENG, Y. LI & X. HE, « Non-lane-discipline-based car-following model considering the effects of two-sided lateral gaps », *Nonlinear Dynamics* **80** (2015), n° 1-2, p. 227-238.
- [29] B. R. MARWAH & B. SINGH, « Level of service classification for urban heterogeneous traffic: A case study of Kanpur metropolis », in *fourth international symposium on Highway Capacity, Hawaii*, 2000.
- [30] S. MECHERI, R. LOBJOIS & F. ROSEY, « PROFIL – Profil de la ROute comme Facteur d'Influence de la Lisibilité de l'infrastructure et son effet sur la trajectoire – Expérimentations sur simulateur de conduite », Tech. report, Ifsttar et Cerema – Dter NC, 2017.
- [31] S. MECHERI, F. ROSEY & R. LOBJOIS, « The effects of lane width, shoulder width, and road cross-sectional reallocation on drivers' behavioral adaptations », *Accident Analysis & Prevention* **104** (2017), p. 65-73.
- [32] J. A. MICHON, « A critical view of driver behavior models: What do we know, what should we do », *Human behavior and traffic safety* (1985), p. 485-520.
- [33] K. NAGEL & M. SCHRECKENBERG, « A cellular automaton model for freeway traffic », *Journal de physique I* **2** (1992), n° 12, p. 2221-2229.

- [34] G. F. NEWELL, « A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, Part I: General theory », *Transportation Research Part B : Methodological* **27** (1993), n° 4, p. 281-287.
- [35] J. NGUYEN, S. T. POWERS, N. URQUHART, T. FARRENKOPF & M. GUCKERT, « An overview of agent-based traffic simulators », *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* **12** (2021), article no. 100486.
- [36] G. H. PENG, X. H. CAI, B. F. CAO & C. Q. LIU, « Non-lane-based lattice hydrodynamic model of traffic flow considering the lateral effects of the lane width », *Physics Letters A* **375** (2011), n° 30, p. 2823-2827.
- [37] K. A. REDMILL & U. OZGUNER, « Vatsim: a vehicle and traffic simulator », in *Intelligent Transportation Systems, 1999. Proceedings. 1999 IEEE/IEEEJ/JSIAI International Conference on*, IEEE, 1999, p. 656-661.
- [38] F. ROSEY, « PROFIL – Profil de la ROute comme Facteur d’Influence de la Lisibilité de l’infrastructure et son effet sur la trajectoire -Etat de l’art », Tech. report, Cerema – Dter NC, 2016.
- [39] F. ROSEY, J.-M. AUBERLET, O. MOISAN & G. DUPRÉ, « Impact of narrower lane width: Comparison between fixed-base simulator and real data », *Transportation research record* **2138** (2009), n° 1, p. 112-119.
- [40] J. SAUNIER, « Simulation du comportement latéral des véhicules fondée sur une approche à base de forces », in *Distribution et Décentralisation – Vingt-sixièmes journées francophones sur les systèmes multi-agents, JFSMA 2018, Métabief, France, 10-12 Octobre 2018.*, 2018, p. 11-20.
- [41] J. SAUNIER & H. JONES, « Mixed agent/social dynamics for emotion computation », in *International conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, AAMAS '14, Paris, France, May 5-9, 2014*, 2014, p. 645-652.
- [42] L. SIX, « Vers un modèle de comportements de véhicules lourds en utilisant une méthode incrémentale basée sur la vérification et l’hystérésis : le modèle ArchiPL », Thèse, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2014.
- [43] M. TREIBER, A. HENNECKE & D. HELBING, « Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations », *Physical review E* **62** (2000), n° 2, p. 1805-1824.
- [44] M. TREIBER, A. KESTING & D. HELBING, « Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models », *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* **360** (2006), n° 1, p. 71-88.
- [45] J.-P. TREUIL, A. DROGOU & J.-D. ZUCKER, *Modélisation et simulation à base d’agents : exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques*, Dunod, 2008.
- [46] W. VAN WINSUM & H. GODTHELP, « Speed choice and steering behavior in curve driving », *Human factors* **38** (1996), n° 3, p. 434-441.
- [47] M. VIROLI, T. HOLVOET, A. RICCI, K. SCHELFTHOUT & F. ZAMBONELLI, « Infrastructures for the environment of multiagent systems », *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* **14** (2007), n° 1, p. 49-60.
- [48] D. WEYNS & T. HOLVOET, « Architectural design of a situated multiagent system for controlling automatic guided vehicles », *International Journal of Agent-Oriented Software Engineering* **2** (2008), n° 1, p. 90-128.
- [49] D. WEYNS, A. OMICINI & J. ODELL, « Environment as a First-class Abstraction in Multi-Agent Systems », *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* **14** (2007), n° 1, p. 5-30, Special Issue on Environments for Multi-agent Systems.
- [50] X. ZHOU & J. TAYLOR, « DTALite: A queue-based mesoscopic traffic simulator for fast model evaluation and calibration », *Cogent Engineering* **1** (2014), n° 1, article no. 961345.

**ABSTRACT.** — Sharing the road between different modes of transport such as light vehicles, heavy vehicles and bicycles involves many road safety problems. One solution considered to facilitate the sharing of road space is a repositioning of the side marking to allow more space for soft modes. However, the effect of a change in the profile across the road on driver behaviour has so far been little studied. The PROFIL project aimed to study this impact in different situations (instrumented vehicle, driving simulator, traffic simulator). In this context, we propose the Lateral Force Model (LFM), which takes into account the longitudinal and lateral effects of the cross-sectional profile within the traffic lane. We show that this model, based on the Intelligent Driver Model (IDM) in its longitudinal component, effectively reproduces the effects of lane and platform width in open traffic, vehicle crossing situations, overtaking of non-motorized two-wheelers and curves, based on data collected in real-life and simulator experiments.

**KEYWORDS.** — Multiagent systems, Traffic simulation, Behaviour models.

---

*Manuscrit reçu le 13 juillet 2021, révisé le 31 janvier 2022, accepté le 31 mars 2022.*