Simulation du comportement latéral des véhicules fondée sur une approche à base de forces

Julien Saunier

▶ **To cite this version:**

Julien Saunier. Simulation du comportement latéral des véhicules fondée sur une approche à base de forces. 26èmes journées francophones sur les sytèmes multi-agents, Oct 2018, Métabief, France. hal-02117646

HAL Id: hal-02117646

https://normandie-univ.hal.science/hal-02117646

Submitted on 2 May 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Simulation du comportement latéral des véhicules fondée sur une approche à base de forces

Julien Saunier
julien.saunier@insa-rouen.fr

Normandie Université, INSA de Rouen, LITIS

Résumé

Dans le domaine de la sécurité routière a lieu une réflexion sur le partage de la route aux différents modes de déplacements, notamment via le repositionnement du marquage latéral. 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 des véhicules croisés, de la largeur de la voie en circulation libre, et des situations de croisement et de 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*

Abstract

In the field of road safety, consideration is being given to sharing the road between the various modes of transport, in particular by repositioning the lateral marking. 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 framework, we propose the LFM (Lateral Force Model) Model, taking into account the longitudinal and lateral effects of the cross-sectional profile within the traffic lane. We show that this model, based on IDM (Intelligent Driver Model) in its longitudinal component, effectively reproduces the effects of crossed vehicles, the width of the lane in free traffic, and crossing and turning situations according to the data collected in real-life and simulator experiments.

Keywords: *mutliagent systems, traffic simulation, behaviour models*

1 Introduction

Les simulateurs de trafic permettent d'étudier à bas coût des modifications d'éléments influant sur le trafic (ajout de voies, systèmes d'information...). L'étude systématique des paramètres, en simulation, permet de générer un grand nombre de modalités, notamment en ce qui concerne la demande de trafic. Les données recueillies permettent d'évaluer *a priori* l'impact en terme de capacité, sécurité et nuisances environnementales. Cependant, 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 calibration du modèle.

De plus, 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, oe encore 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 Lisibi-

lité), 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 évaluer l'impact d'un repositionnement du marquage sur la sécurité et l'écoulement des véhicules. Cette étude est réalisée sur des routes et avec des conducteurs français, et ne peut donc rendre compte d'autres usages, notamment en terme 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 de facteurs explicites, et prédictive, puisque seuls les paramètres spécifiques à l'infrastructure d'un scénario doivent être recalibrés.

Cet article est structuré comme suit : la section 2 introduit l'état de l'art et les hypothèses de modélisation issues des observations. 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 premières expérimentations. Enfin, la section 5 conclut et introduit quelques perspectives.

2 État de l'art et hypothèses

2.1 Simulation de trafic

Pour modéliser et simuler le trafic routier, de nombreux modèles ont été développés depuis les années 1950 [1]. 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 [12].

Les approches macroscopiques 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*. 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 [3]. Ces modèles sont eux-mêmes composés de deux éléments, le régime libre, dans lequel le véhicule peut choisir librement sa vitesse en fonction de l'infrastructure et d'éventuels paramètres individuels, et le modèle de *suivi*, 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 [22], *"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 une calibration plus fine, 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.

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 [7], sont une famille de modèles microscopiques se fondant non sur des valeurs abstraites,mais sur des grandeurs théoriquement mesurables et reliables à des éléments du système réel, tels que l'accélération maximale d'un véhicule.

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 instantanée et ceux dont la déviation latérale transitoire consiste à quitter le centre d'une voie pour le centre d'une autre 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 [2, 14, 6] 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 [6], ne nécessitent pas obligatoirement de spécifier de largeur de voie. De plus, elles ne s'intéressent pas tant à la problématique du comportmeent latéral en général que sa prise en compte nécessaire dans des flux mixtes [15, 17, 13], contenant des motocyclistes [9] et/ou les modélisant [2].

Gunay [8] 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 [20] et [16] qui modélisent, sans considérer les voies, seulement l'espace roulable 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.

2.2 Hypothèses de modélisation

Nous considérons un modèle de simulation de couple conducteur/véhicule prenant en compte un comportement longitudinal, mais ne prenant pas en compte l'infrastructure. En se fondant sur l'état de l'art [21], ainsi que sur les expérimentations en simulateur [18, 19] et les traces brutes issues de l'expérimentation en situation réelle [4], nous spécifions les différents éléments d'extension du modèle initial.

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 plateforme. 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. 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.

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 croi-

seurs et la géométrie du tracé. L'influence latérale de l'infrastructure doit prendre en compte les même 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 habitude 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 [18] de façon significative selon la présence de trafic, ce qui implique d'intégrer cet élément au modèle. Enfin, la seconde expérimentation en simulateur de conduite a montré, conformément à la littérature (*e.g.* [26]), 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.

3 Modèle de simulation de trafic LFM

Dans cette section, nous présentons en premier lieu succintement le modèle IDM (Intelligent Driver Model), issu de la littérature, puis nous montrons comment les différentes spécifications données en section 2.2 ont été introduites pour former le modèle LFM (*Lateral Force Model*).

3.1 Intelligent Driver Model

Nous avons vu dans la section précédente 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 [7], IDM [23] et Archisim [5]. 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 [24], 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 [1] est pratiquement indépendant de la composante longitudinale et des décisions de changements de voie.

v_0	T	a	b
$120km/h$	$1.2s$	$0.8m.s^{-2}$	$1.25m.s^{-2}$

s_0	s_1	l
$1m$	$10m$	$5m$

TABLE 1 – Valeurs des paramètres du modèle IDM proposé par [23]

.

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

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

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 δ 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 :

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

avec T_n le temps de réaction du conducteur, b_n la plus grande décélération confortable, et s_0^n et s_1^n les distances inter-véhiculaires en situation congestionnée.

Les paramètres a_n et b_n dans ce modèle permettent de différencier le comportement qu'adoptent les différents véhicules selon leurs caractéristiques propres.

3.2 Lateral Force Model

Dans cette section nous détaillons chaque élément du Lateral Force Model, à savoir l'impact

1. Principe appelé rasoir d'Ockham, stipulant qu'entre deux explications d'un même phénomène la plus simple est la plus valable.

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.

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 [4], 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 :

$$v_0^{n\prime} = v_0^n - P^x_{infra}(W_{platform}, sl) \tag{3}$$

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

La vitesse désirée n'impactant que le régime libre (équation 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 [4], cette 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.

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 1).

Nous avons choisi une approche inspirée du Social Force Model, initialement destiné à la simulation de la dynamique des piétons [10]. 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

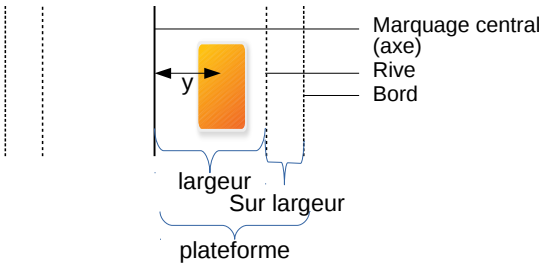

FIGURE 1 – Eléments du profil en travers

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 [11] 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 (marquages, véhicules) comme des forces répulsives.

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

$$F^n_{infra} = \omega\frac{1}{y} - \beta\frac{1}{W_{lane} - y} - (1-\beta)\frac{1}{W_{platform} - y} \tag{4}$$

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 β représentant la proportion de répulsion des deux éléments situés à l'extérieur de la chaussée et ω 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.

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 :

$$\ddot{y}_n = \sum_i F^n_i \times \frac{\dot{y}_n}{\tau_n} \tag{5}$$

avec F^n_i la somme des forces appliquées au véhicule n, $\dot{y}_n$ sa vitesse courante et τ_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 ξ_n. Dans la suite de ce travail, nous avons considéré des véhicules sans dérive.

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'exterieur de sa voie). Cette pression est perçue à distance (et non à l'aplomb comme la pression des bords de voie) et s'applique différentiellement 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 :

$$F^n_{vc} = \gamma \frac{1}{y} \times \frac{\Delta_y(n,c)}{2W_{platform}} \times 1 - \frac{\Delta_x(n,c)}{d_{max}} \qquad (6)$$

Le premier terme permet de proportionner la force à celle du marquage d'axe en fonction d'un paramètre γ.

Comportement latéral en virage. Enfin, 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 de deux forces, une de répulsion en amont de l'entrée du virage, et une d'attraction en sortie du virage.

En considérant les trois points suivant : l'entrée e, l'apex a et la sortie s, la force répulsive est placée en amont de l'entrée en position $x_{edge} = x_e - d$, avec d le paramètre permettant le décalage de l'écartement du véhicule. De même, la force attractive est placée directement à la sortie du virage x_{Fa}. Ces forces, tout comme celles issues des véhicules croiseurs, sont perçues par les véhicules à l'approche de leur position.

$$F^n_{curve} = \frac{1}{y} \times edge^f_j \times 1 - \frac{\Delta_x(n, edge_j)}{d_{max}} \qquad (7)$$

avec $edge^f_j$ 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 :

$$edge^f_j = \theta \frac{min(ad_j, max_a)}{max_a} * \frac{\lambda}{\Delta(e,s)} \qquad (8)$$

avec max_a l'angle maximal du virage de façon à limiter la force exercée, λ sa longueur minimale, et θ le coefficient répulsion/attirance, positif pour le noeud d'entrée et négatif pour celui de sortie.

3.3 Récapitulatif

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

$$F(n) = F^n_{infra} + \sum_j F^n_{vc_j} + \sum_k F^n_{curve_k} + \xi_n \qquad (9)$$

Le premier terme exprime les forces exercées par l'infrastructure, le second terme celles des véhicules croisés, le troisième terme celles des courbes et le dernier terme les fluctuations intra-individuelles. 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.

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. L'architecture choisie repose sur une modélisation à base d'agents [25] : chaque entité perçoit son environnement, puis décide de son action avant de l'effectuer.

Compte tenu de la formulation du modèle IDM, celui-ci 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.

Algorithm 1 Algorithme de simulation

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

Les paramètres du modèle ont été calibrés manuellement de façon à reproduire les données issues des expérimentations. Cette calibration a été réalisée de façon indépendante pour les différents éléments intégrés au modèle, de façon incrémentale puisque chaque force est considérée indépendemment des autres. Concernant le modèle IDM, nous avons ré-utilisé les paramètres proposés par leur auteur et résumés en table 1. Par ailleurs, le modèle n'étant pas stochastique, les résultats indiqués résultent uniquement des scénarios décrits. La variabilité inter-individuelle, issue des paramètres individuels de chaque agent, n'a pas été étudiée.

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 [4] montrent un effet de la largeur de plate-forme sur la vitesse adoptée, en corrélation avec la vitesse autorisée (figure 2).

Deux types de comportements sont observés : les conducteurs tendent à circuler à une vitesse inférieure à la limite autorisée, sauf lorsque la

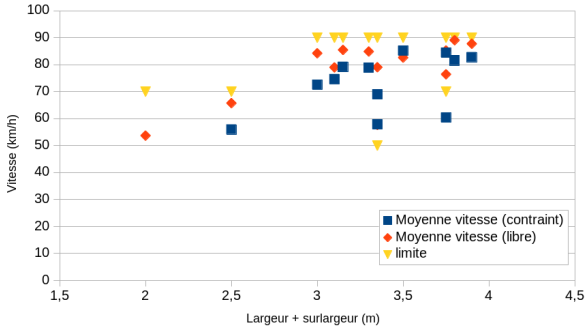

FIGURE 2 – Vitesses moyennes en régimes libres et contraints selon la largeur de plate-forme.

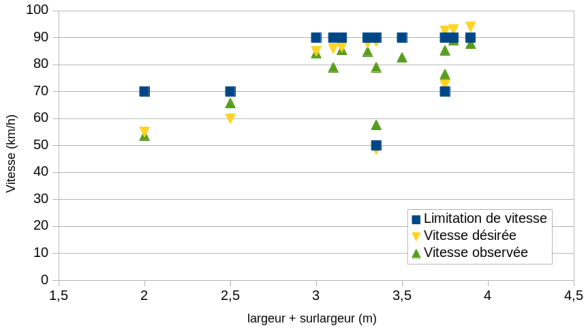

FIGURE 3 – Moyenne des vitesses désirées et des vitesses adoptées selon la largeur de plate-forme.

plate-forme est large considérant la limite.

Dans notre modèle, la vitesse désirée est modifiée par la pression de l'infrastructure $P^x_{infra}(W_{platform}, sl)$ 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 :

$$P^x_{infra}(W_{platform}, sl) = sl - (3.5 - W_{platform}) * 10 \quad (10)$$

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 3 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.

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 [19].

Les paramètres sont donnés en table 2, et les résultats sont montrés en figures 4 et 5. En figure 4, 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

	ν	β
Valeur	1.2	0.5

TABLE 2 – Paramètres de la composante infrastructure du comportement latéral

.

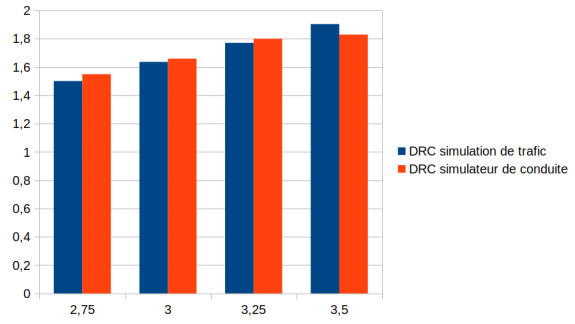

FIGURE 4 – Distance au centre de la route (m) en simulateur de conduite (tiré de [18]) et en simulateur de trafic en fonction de la largeur de voie sans sur-largeur (m).

20cm. De la même façon, la figure 5 montre que l'impact de la sur-largeur est bien capturée par le modèle LFM.

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 forces constantes.

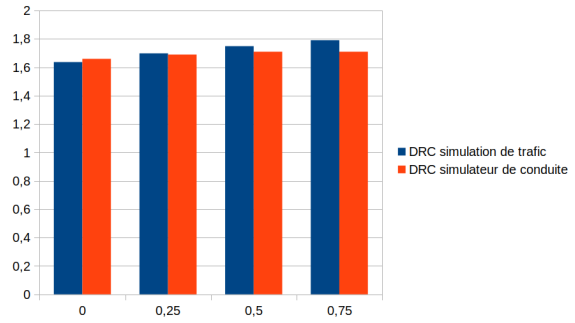

FIGURE 5 – Distance au centre de la route (m) en simulateur de conduite (tiré de [18]) et en simulateur de trafic en fonction de la largeur de bande dérasée (m) pour une voie de 3m.

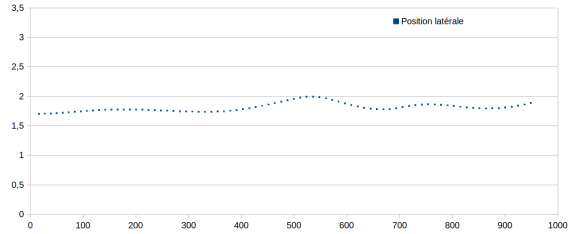

FIGURE 6 – trajectoire d'un véhicule simulé en présence de véhicules croisés (déviation du marquage central (m))

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 [19]. Pour cette étude, le paramètre γ a été paramétré à $1,5$; et la distance d_{max} est fixée à 200m. Les autres paramètres sont restés identiques. La figure 6 montre un exemple de trajectoire en présence de véhicules croisés. Jusqu'à une position $x = 300m$, le véhicule ne perçoit aucun autre véhicule. Il croise le premier véhicule à hauteur de $x = 500m$, puis un second à $700m$, et enfin un dernier à $950m$. 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.

La figure 7 montre les résultats de simulations dans deux conditions (trafic ou sans trafic), pour deux profils en travers différents (3m + 0,5m et 3m + 0m), ainsi que les observations de [18]. 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-citée. En effet, dans le scénario avec trafic, la modalité 3m + 0m présente un écart-type des positions latérales de $0,042m$, tandis que la modalité 3m + 0,5m a un écart-type de $0,060m$, 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 dernière expérimentation, nous avons étudié la composante en virage du modèle de comportement. Pour cela, nous avons utilisé les paramètres indiqués en table 3. Le premier noeud

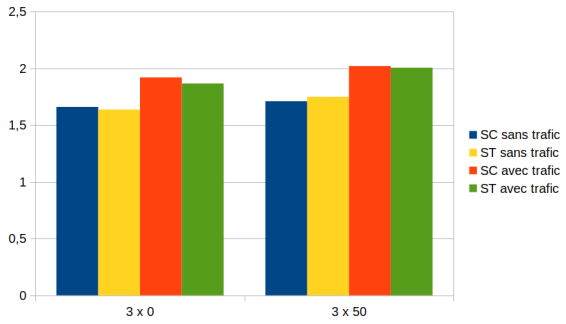

FIGURE 7 – Distance au centre de la route (DRC) en simulateur de conduite (tiré de [18]) et en simulateur de trafic en fonction du profil et de la présence de trafic (m)

répulsif est situé à 150m en amont de l'entrée du virage, avec un coefficient répulsif de 1, tandis que le second noeud est à la sortie du virage, avec un coefficient attractif de -2. En comparaison avec la seconde expérimentation de [18] nous avons opté pour le virage difficile (rayon de courbure de 150m, 76^o de différence angulaire).

d_max	$edge_j$	ad_j	max_a	λ	θ_e	θ_s
300	$x_{deb} - 150$	76	90	50	1	-2

TABLE 3 – Valeurs des paramètres de la composante virage du modèle LFM

.

La figure 8 montre la position latérale à l'approche, à l'entrée du virage, à son apex (*i.e.* semi-distance) et en sortie. Les résultats 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.

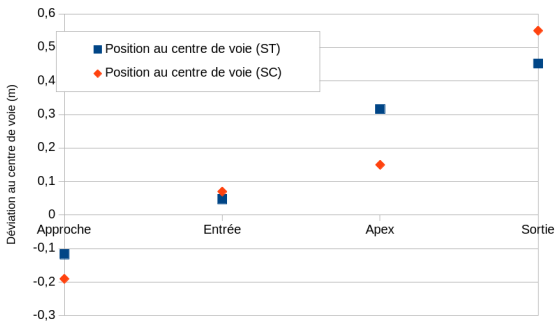

FIGURE 8 – Distance au centre de la voie (m) en courbe en simulateur de trafic (ST) et en simulateur de conduite (SC)

Ce résultat s'explique par la modélisation à l'aide de seulement deux noeuds, l'un de répulsion à l'approche du virage et l'autre d'attraction en sortie de virage. Une piste d'amélioration serait de discrétiser le virage en plusieurs noeuds afin de mieux contrôler les influences latérales dans les différentes zones du virage. Ce processus pourrait être fait automatiquement à partir de la géométrie du virage.

5 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. Ce modèle a été associé à IDM pour la gestion des aspects longitudinaux.

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.

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. Concernant les positions latérales, LFM inclut la pression de l'infrastructure, via ses marquages, pour positionner le véhicule dans sa voie. Le troisième élément du modèle concerne l'impact des véhicules croisés qui provoquent un écart important à la situation sans trafic. Les expérimentations montrent que, suite à une calibration manuelle du modèle, des valeurs proches de celles ayant été obtenues par [18] sont observées. Enfin, la prise de virage obtient des résultats plus mitigés puisque si les positions relatives à l'approche, à l'entrée et en sortie de virage sont correctes, nous observons une déviation à mi-distance. Des études complémentaires sont ainsi requises pour ce point.

Ces éléments indiquent la validité du modèle LFM au vu des données obtenues. Des expérimentations supplémentaires, ainsi qu'une phase

de calibration multi-critères sur la base des données réelles doivent cependant être achevées. En effet, celles-ci 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). Enfin, les résultats d'une troisième expérimentation en simulateur de conduite sur la perception des bandes multi-fonctionnelles doit permettre l'inclusion de cyclistes au sein des simulations.

Références

[1] J. Barceló et al. *Fundamentals of traffic simulation*, volume 145. Springer, 2010.

[2] L. Bonte, S. Espié, and P. Mathieu. Virtual lanes interest for motorcycles simulation. Technical report, HAL, 2007.

[3] M. Brackstone and M. McDonald. Car-following : a historical review. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 2(4) :181–196, 1999.

[4] L. Désiré, Y. Dupuis, R. Gritti, and M. Adam. Mesure de la trajectoire en situation réelle de conduite et comparaison avec les comportements en simulateur de conduite. Technical report, Cerema - Dter Ouest et Dter NC, 2017.

[5] S. Espié and 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*, (n1) :p7–16, 2007.

[6] M. Fellendorf and P. Vortisch. Microscopic traffic flow simulator vissim. In *Fundamentals of traffic simulation*, pages 63–93. Springer, 2010.

[7] P. Gipps. A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B : Methodological*, 20(5) :403–414, 1986.

[8] B. Gunay. Car following theory with lateral discomfort. *Transportation Research Part B : Methodological*, 41(7) :722–735, 2007.

[9] A. K. Gupta and I. Dhiman. Analyses of a continuum traffic flow model for a nonlane-based system. *International Journal of Modern Physics C*, 25(10) :1450045, 2014.

[10] D. Helbing and P. Molnar. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, 51(5) :4282, 1995.

[11] D. Helbing and B. Tilch. Generalized force model of traffic dynamics. *Physical review E*, 58(1) :133, 1998.

[12] S. Hoogendoorn and P. 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(4) :283–303, 2001.

[13] S. Khan and P. Maini. Modeling heterogeneous traffic flow. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (1678) :234–241, 1999.

[14] F. Ksontini, Z. Guessoum, R. Mandiau, and 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*, pages 151–158. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2013.

[15] T.-C. Lee, J. Polak, and M. Bell. New approach to modeling mixed traffic containing motorcycles in urban areas. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2140) :195–205, 2009.

[16] Y. Li, L. Zhang, S. Peeta, H. Pan, T. Zheng, Y. Li, and X. He. Non-lane-discipline-based car-following model considering the effects of two-sided lateral gaps. *Nonlinear Dynamics*, 80(1-2) :227–238, 2015.

[17] B. Marwah and 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.

[18] S. Mecheri, R. Lobjois, and 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. Technical report, Ifsttar et Cerema - Dter NC, 2017.

[19] S. Mecheri, F. Rosey, and R. Lobjois. The effects of lane width, shoulder width, and road cross-sectional reallocation on drivers' behavioral adaptations. *Accident Analysis & Prevention*, 104 :65–73, 2017.

[20] G. Peng, X. Cai, B. Cao, and C. Liu. Non-lane-based lattice hydrodynamic model of traffic flow considering the lateral effects of the lane width. *Physics Letters A*, 375(30) :2823–2827, 2011.

[21] 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. Technical report, Cerema - Dter NC, 2016.

[22] 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*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2014.

[23] M. Treiber, A. Hennecke, and D. Helbing. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical review E*, 62(2) :1805, 2000.

[24] M. Treiber, A. Kesting, and D. Helbing. Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 360(1) :71–88, 2006.

[25] J.-P. Treuil, A. Drogoul, and J.-D. Zucker. *Modélisation et simulation à base d'agents : exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques*. Dunod, 2008.

[26] W. Van Winsum and H. Godthelp. Speed choice and steering behavior in curve driving. *Human factors*, 38(3) :434–441, 1996.