

PROFIL

Rapport de la tâche 4 Étude sur simulateur de trafic

30 novembre 2017

Julien Saunier

julien.saunier@insa-rouen.fr
LITIS, INSA Rouen

Projet FSR n°2014/MP/2

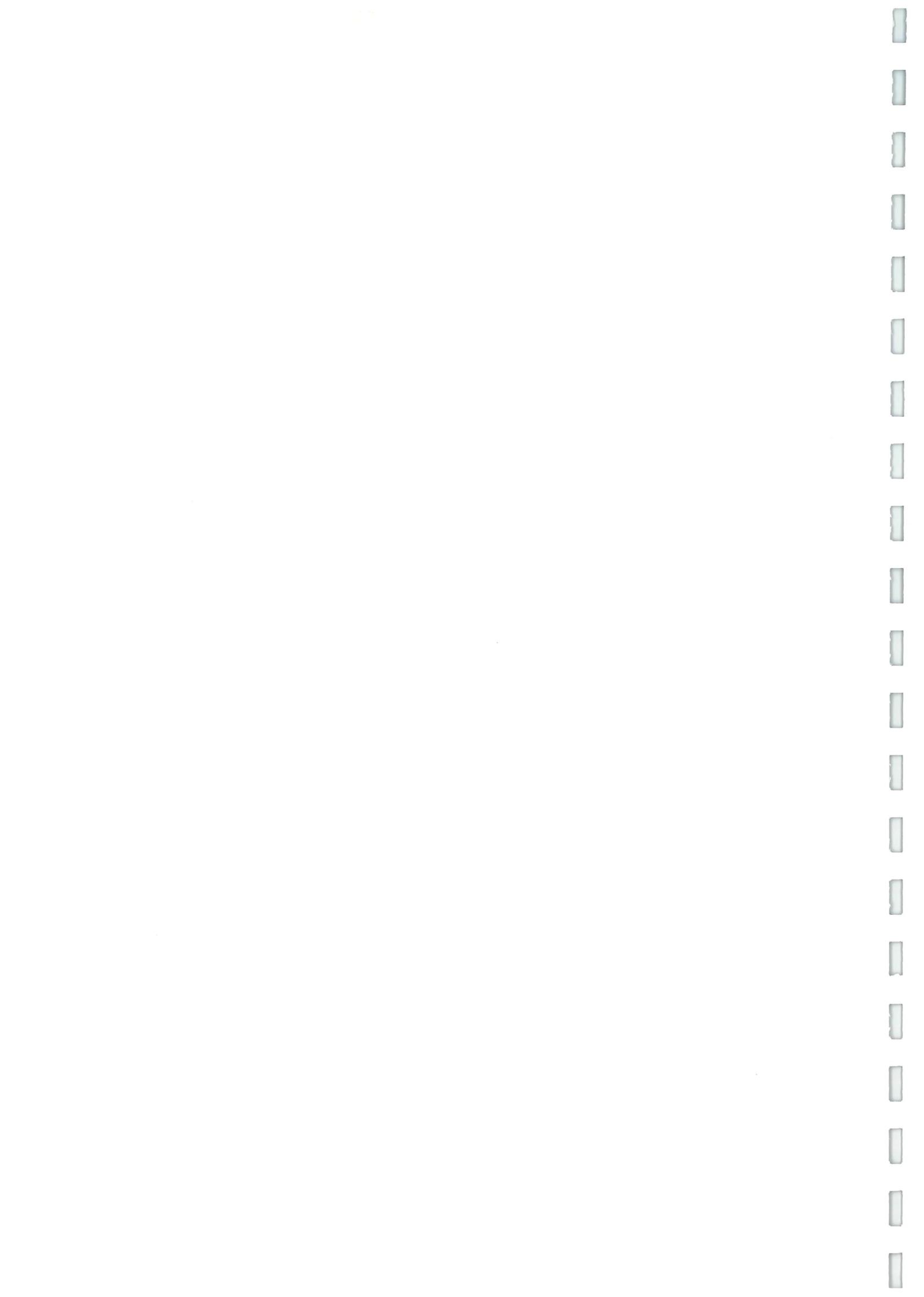


Table des matières

1	Introduction	7
1.1	Contexte	7
1.2	Déroulement de la tâche 4	8
1.3	Organisation du document	9
2	État de l’art et problématique	11
2.1	Simulation de trafic	11
2.1.1	Approches macroscopiques	11
2.1.2	Approches microscopiques	12
2.1.3	Modélisation du comportement latéral intra-voie	14
2.2	Hypothèses de modélisation	15
2.3	conclusion	16
3	Modèle de simulation de trafic LFM	17
3.1	Intelligent Driver Model	17
3.2	Lateral Force Model	18
3.2.1	Impact longitudinal du profil en travers	18
3.2.2	Impact latéral du profil en travers	19
3.2.3	Variations latérales individuelles	19
3.2.4	Impact latéral des véhicules croiseurs	20
3.2.5	Comportement latéral en virage	20
3.3	conclusion	21
4	Expérimentations	23
4.1	Simulateur de trafic	23
4.2	Évaluation de l’impact du profil en travers sur le comportement longitudinal	24
4.3	Évaluation de l’impact du profil en travers sur le comportement latéral . .	25
4.4	Évaluation de l’impact des véhicules croisés sur le comportement latéral . .	26
4.5	Évaluation du comportement latéral en virage	28
5	Conclusion	31

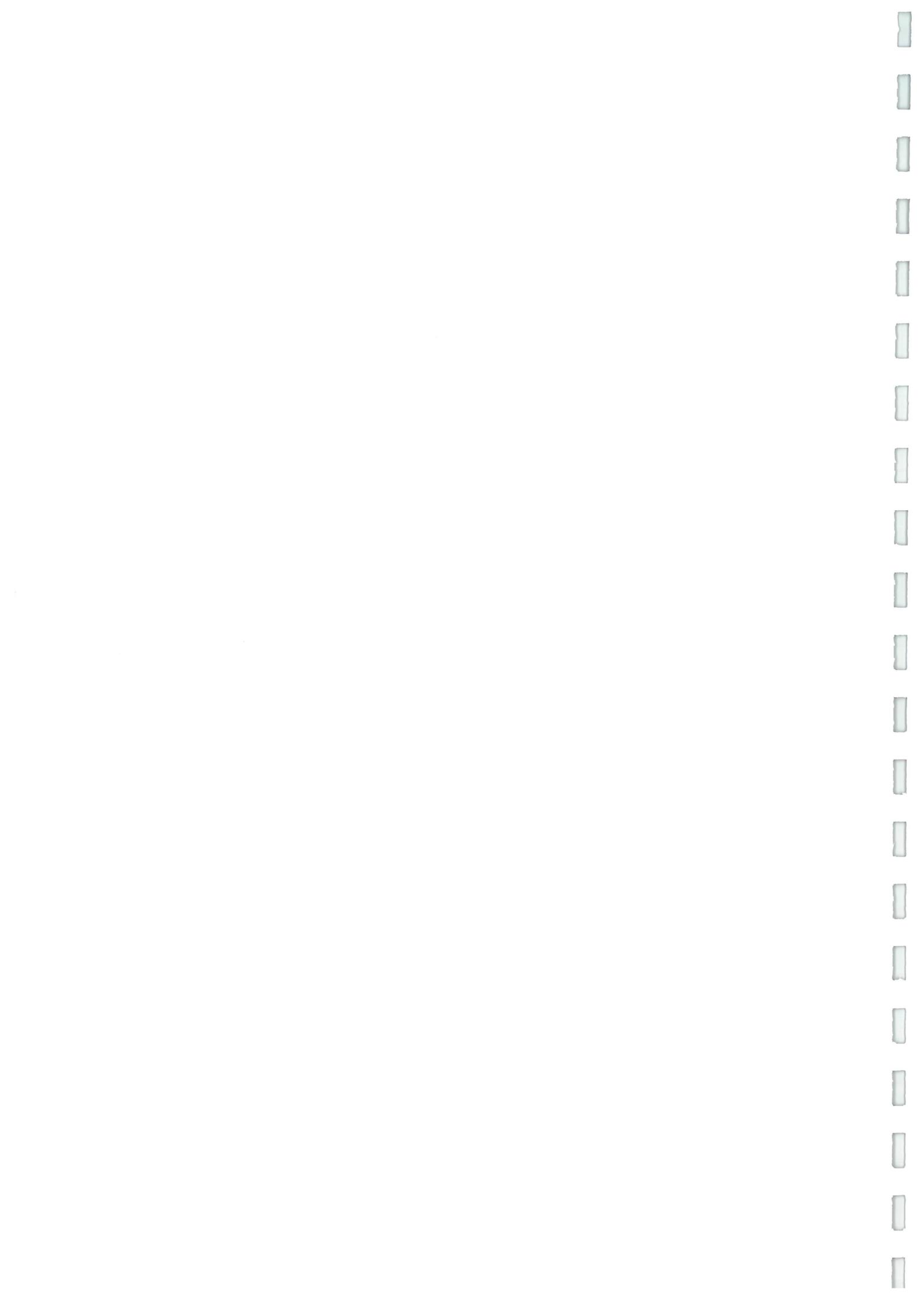


Table des figures

1.1	Exemple de circuit.	9
2.1	Comparaison des approches microscopiques et macroscopiques	13
4.1	Moyenne des vitesses adoptées en régime libre et contraint selon la largeur de plate-forme.	24
4.2	Moyenne des vitesses désirées et des vitesses adoptées selon la largeur de plate-forme.	25
4.3	Distance au centre de la route (DRC) en simulateur de conduite (tiré de [Mecheri et al., 2017a]) et en simulateur de trafic en fonction de la largeur de voie	26
4.4	Distance au centre de la route (DRC) en simulateur de conduite (tiré de [Mecheri et al., 2017a]) et en simulateur de trafic en fonction de la largeur de bande dérasée	26
4.5	trajectoire d'un véhicule simulé en présence de véhicules croisés	27
4.6	Distance au centre de la route (DRC) en simulateur de conduite (tiré de [Mecheri et al., 2017a]) et en simulateur de trafic en fonction du profil et de la présence de trafic	27
4.7	Distance au centre de la voie en simulateur de trafic en courbe	28

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte

Les simulateurs de trafic permettent d'étudier à bas coût des modifications d'éléments influant le trafic (ajout de voies, systèmes d'information...). L'étude systématique, en simulation, des paramètres 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 même, 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, soit d'intégrer des flux mixtes, composés de véhicules d'encombrement différent.

Dans le cadre du projet PROFIL, de nouvelles données issues de capteurs innovants permettent de capter les positions et inter-distances latérales des conducteurs, en environnement réel (véhicule instrumenté) et simulé (simulateur de conduite). Ces données sont récupérées afin de comprendre et évaluer l'impact d'un repositionnement du marquage sur la sécurité et l'écoulement des véhicules. Pour cela, la tâche 4 (simulation de trafic) a pour objectif de permettre le passage à l'échelle de la compréhension de cet

impact dans des configurations de flux diverses.

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, par la prise en compte de facteurs explicites, et prédictive, puisque seuls les paramètres spécifiques à l'infrastructure d'un scénario doivent être recalibrés.

À fin de réaliser des simulations de trafic tenant compte du profil en travers, trois étapes sont nécessaires :

1. Proposer un modèle computationnel de l'impact de la compréhension de l'infrastructure sur le comportement, en utilisant les nouveaux éléments de compréhension du mécanisme cognitif du conducteur pour mettre au point un modèle d'agent conducteur prenant en compte les caractéristiques dynamiques de l'infrastructure et du trafic.
2. Calibrer le modèle à l'aide des données quantitatives issues des tâches 2 et 3.
3. Évaluer les impacts sécurité & trafic. La modification des paramètres de simulation (demande de trafic / paramétrage de celui-ci) permet d'évaluer sur un grand espace de données les impacts sécurité et capacité en fonction de l'aménagement du profil en travers. Les indicateurs de capacité sont classiques, par exemple via des courbes débit/vitesse. Pour les indicateurs de sécurité, il existe un corpus de connaissances sur l'efficacité des micro-simulations à déterminer la sécurité des infrastructures [Gettman and Head, 2003, Svensson and Hydén, 2006, Laureshyn et al., 2010] via l'extraction d'indicateurs. Nous pouvons noter le temps à la collision (TTC, extrapolation linéaire ou stochastique), la vitesse relative, le temps inter-véhiculaire (TIV), etc.

1.2 Déroulement de la tâche 4

La tâche simulation étant dépendante des données recueillies, nous avons en première année du projet effectué un travail de modélisation au sein de la plateforme YATS¹, disponible en open-source. YATS (Yet Another Traffic Simulator) est un simulateur de trafic utilisé pour le prototypage de modèles de trafic en 1,5D (réseau représenté sous forme de graphe à largeur non contrainte pour permettre l'étude des comportements latéraux) selon une approche incarnée [Saunier, 2015] permettant la différenciation entre modèle de décision au niveau stratégique/tactique et sa mise en oeuvre au niveau opérationnel.

YATS (figure 1.1) est implémenté en C++, et utilise les bibliothèques Boost (pour les calculs physiques) et SDL (pour la partie graphique). La génération des perceptions et la gestion des prises de virage a été implémentée, ainsi qu'une première version des interactions entre véhicules sur une même voie. Un ensemble de circuits permettant la

1. <https://www.github.com/Ifsttar/YATS>

vérification de comportements unitaires est également disponible, ainsi que les points d'apparition et disparition des véhicules.

Lors de la seconde année, nous avons recruté une stagiaire de Master 2, Mme Souhir Helali, pour travailler sur « Une modélisation multiagent des comportements latéraux des véhicules légers ». Le stage a débuté le 17 mai 2016 pour une durée de 6 mois, co-encadré par Julien Saunier (Insa) et Sio-Song Ieng (Ifsttar). L'état de l'implémentation disponible a nécessité d'une part que celui-ci soit au préalable remis au propre en séparant les parties visuelles et comportementales. Le mécanisme de perception, modélisé par des communications inter-agents, a ensuite été mise en place. Cependant, à la fin du stage, l'implémentation des fonctionnalités attendues (interactions entre utilisateurs et modèle de déplacement) n'étaient pas entièrement implémentées [Helali, 2016].

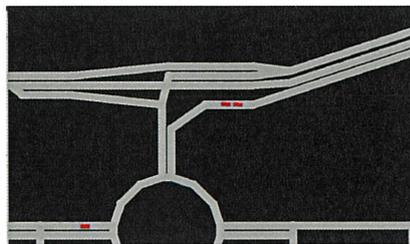


FIGURE 1.1 – Exemple de circuit.

Nous avons donc décidé de simplifier l'approche en nous focalisant sur les éléments constitutifs des modifications de comportement longitudinal et latéral sur la base d'un modèle de déplacement reconnu, IDM (Intelligent Driver Model, [Treiber et al., 2000]) et en limitant l'étude aux voies bi-directionnelles. Ceci nous a permis de produire un nouveau modèle, LFM (pour *Lateral Force Model*), qui interprète l'effet latéral de l'infrastructure et des autres usagers sous forme de forces d'attraction et de répulsion.

Compte tenu du décalage temporel relatif aux productions de la tâche 2, il ne fût pas possible de finaliser la calibration du nouveau modèle à l'aide de données réelles. Les éléments de modélisation, génériques pour leur plus grande part, ont donc vocation à être précisés et calibrés plus finement lorsque les dites productions seront disponibles. L'évaluation du modèle a consisté en une vérification de ses propriétés selon les observations des tâches 2 et 3, sous réserve de validation de celles-ci à l'aide des données issues de l'expérimentation en conduite naturelle à l'aide des véhicules instrumentés.

1.3 Organisation du document

La suite du document est organisée en 4 chapitres.

Le chapitre 2, "État de l'art et problématique", présente les différentes échelles de simulation, puis indique les éléments à prendre en compte dans le processus de modélisation grâce à l'étude bibliographique et les études en situation réelle et simulée.

Le chapitre 3, "mModèle de simulation de trafic LFM", décrit dans un premier temps le modèle initial, IDM, et les modifications apportées au comportement longitudinal. Ensuite, il expose le modèle de forces appliquées au comportement latéral du véhicule.

Le chapitre 4, "Expérimentations", montre la calibration du modèle et ses propriétés expérimentales en comparaison aux données disponibles.

Enfin, le chapitre 5 résume les contributions et propose des perspectives d'amélioration du modèle.

Chapitre 2

État de l'art et problématique

Nous avons vu dans l'introduction que les modèles classiques de trafic ne s'intéressent généralement au comportement latéral des véhicules qu'au travers du changement de voie, alors que l'objectif du projet Profil est de comprendre, modéliser et simuler l'impact du profil en travers sur le comportement du conducteur. Dans la prochaine section, nous introduisons les notions nécessaires au choix d'un modèle de simulation initial dans lequel introduire le déplacement latéral intra-voie. Dans la section suivante, nous spécifions les différents éléments, issus des tâches précédentes, devant être modélisés.

2.1 Simulation de trafic

Pour modéliser et simuler le trafic routier, les travaux existants 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 [Hoogendoorn and Bovy, 2001, Helbing, 2001]. De très nombreux modèles ont été développés depuis les années 1950, et cette section présente un survol des principales familles. Un état de l'art complet peut être trouvé dans [Barceló et al., 2010].

2.1.1 Approches macroscopiques

Les approches macroscopiques [Buisson and Lesort, 2010] se concentrent sur la modélisation de l'évolution spatio-temporelle des grandeurs du trafic, mesurées au niveau du flux de véhicules. Ces grandeurs relatives aux flux de véhicules sont généralement :

- la densité de véhicules \mathcal{K} ,
- la vitesse moyenne des véhicules \mathcal{V} ,
- le débit de véhicules \mathcal{Q} .

Ces trois éléments sont reliés par la relation suivante :

$$\mathcal{Q} = \mathcal{K} * \mathcal{V} \tag{2.1}$$

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.

2.1.2 Approches microscopiques

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. Si certains travaux montrent qu'il est possible d'interfacer des modèles macroscopiques et microscopiques (par exemple [Burghout et al., 2005]), la cohérence de la simulation est difficile à maintenir lors de la discrétisation des flux issus des modèles macroscopiques. En tout état de cause, les grandeurs (débit, vitesse, densité) directement manipulées par les modèles macroscopiques servent, dans le cas microscopique à l'évaluation du trafic produit.

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 simulé, 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 :

- longitudinale le long de la route suivie x , avec $x(t)$ une fonction croissante lorsque l'origine de la route est 0, et
- 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 historique étant proposée par [Brackstone and McDonald, 1999]. Ces modèles sont eux-mêmes composés de deux éléments, le premier représentant 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 [Six, 2014], "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 importante, 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. Un résumé des caractéristiques de ces familles est donné en figure 2.1. Nous pouvons citer l'existence d'autres types de modèles, à base d'automates cellulaires [Nagel and Schreckenberg, 1992], de modèles multi-niveaux [Czura et al., 2015] et les approches nanoscopiques [Bornard, 2012].

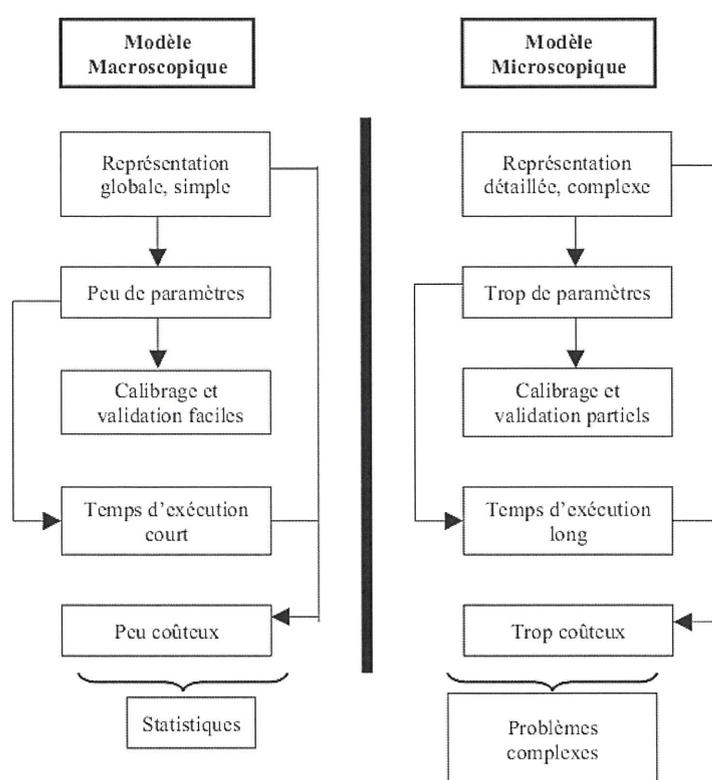


FIGURE 2.1 – Comparaison des approches microscopiques et macroscopiques par [El Hadouaj, 2004]

Cette dernière approche, nanoscopique s'intéresse à la dimension opérationnelle de la conduite (selon la classification de [Michon, 1985]), 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 une calibration sur la base d'éléments cognitifs encore mal connus et difficilement mesurables.

Dans le cadre de ce travail, nous nous positionnons donc 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, 1986], sont une famille de modèles microscopiques se fondant non sur des valeurs abstraites, telles que les approches de [Newell, 1993] et de [Bando et al., 1995], mais sur des grandeurs théoriquement mesurables et reliables à des éléments du système réel, telle que l'accélération maximale d'un véhicule ou la vitesse à atteindre.

2.1.3 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, ou ceux dont la déviation latérale transitoire consiste à quitter le centre d'une voie pour le centre d'une autre, tels que [Kesting et al., 2007] et [Redmill and Ozguner, 1999] 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 de [Bonte et al., 2007], de [Ksontini et al., 2013] et de [Fellendorf and Vortisch, 2010] 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, et notamment les deux roues motorisés ou non. Une voie virtuelle devient alors une sous partie d'une voie physique, qui permet :

- de ne pas considérer un véhicule de faible encombrement comme véhicule "leader", donc nécessitant une adaptation en comportement de suivi,
- de prendre en compte le cas où un véhicule empiète sur une autre voie, réduisant ainsi la largeur potentielle de passage, et
- 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 [Fellendorf and Vortisch, 2010], 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 [Lee et al., 2009, Marwah and Singh, 2000, Khan and Maini, 1999], contenant des motocyclistes [Gupta and Dhiman, 2014] et/ou les modélisant [Bonte et al., 2007], et particulièrement dans les pays en voie de développement où l'usage des infrastructures est

parfois plus informel.

[Gunay, 2007] 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 [Peng et al., 2011] et [Li et al., 2015] 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 bi-directionnelle l'impact de la largeur de voie sur le comportement latéral et longitudinal des véhicules.

2.2 Hypothèses de modélisation

Soit 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 [Rosey, 2016], ainsi que sur les résultats de la tâche 3 [Mecheri et al., 2017a, Mecheri et al., 2017b] et les traces brutes issues de la tâche 2 [Désiré et al., 2017], nous avons spécifié les différents éléments d'extension du modèle initial de la façon suivante : 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.

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 de la tâche 2, ni de celles de la tâche 3.

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 et la géométrie du tracé.

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 plateforme.

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 première expérience de la tâche 3 a montré une position latérale significativement

différente en présence et en absence 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.* [Van Winsum and Godthelp, 1996]), 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'intérieur de sa voie. La modélisation de ce comportement, qui entre en interaction avec les autres éléments, doit donc être réalisée.

2.3 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons brièvement décrit les différentes approches de modélisation de trafic existantes. Sur la base de cette littérature, nous pouvons conclure d'une part que les modèles microscopiques comportementaux sont les mieux adaptés pour la conception d'un modèle intégrant l'effet de l'infrastructure, et d'autre part qu'il n'existe pas de modèle pré-existant permettant de répondre à notre problématique.

Nous avons ensuite spécifié les différents aspects à prendre en compte pour concevoir un modèle de comportement incluant les effets longitudinaux et latéraux des comportements en fonction des caractéristiques de l'infrastructure.

Dans le prochain chapitre, nous introduisons notre nouveau modèle, LFM (Lateral Force Model), qui permet de prendre en compte l'impact de l'infrastructure sur la dynamique des véhicules.

Chapitre 3

Modèle de simulation de trafic LFM

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

3.1 Intelligent Driver Model

Nous avons vu dans le chapitre précédent 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 celui de [Gipps, 1986], IDM [Treiber et al., 2000] et Archisim [Espié and Auberlet, 2007]. 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 propose les modèles HDM [Treiber et al., 2006], 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 simulation¹ est indépendant du modèle produit, puisque celui-ci est pratiquement indépendant de la composante longitudinale et des changements de voie.

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

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

Type	v_0	T	a	b	s_0	s_1	l
Voiture	120km/h	1.2s	0.8m.s ⁻²	1.25m.s ⁻²	1m	10m	5m

TABLE 3.1 – Valeurs des paramètres du modèle IDM proposé par [Treiber et al., 2000]

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 :

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

avec T_n le temps de réaction du conducteur, 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 composant 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.

3.2.1 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 [Désiré et al., 2017], 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 suffisant pour obtenir l'effet observé.

D'après les premières analyses en situation réelle, cette pression est dépendante exclusivement de la largeur de la plate-forme routière, autrement exprimée par l'addition

de la largeur de voie et de la sur-largeur.

3.2.2 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.

Nous avons choisi une approche inspirée du Social Force Model, initialement destiné à la simulation de la dynamique des piétons [Helbing and Molnar, 1995]. 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, des forces attractives vers la destination et les autres entités plaisantes de la scène, et des forces répulsives issues des autres piétons et des bordures non franchissables.

[Helbing and Tilch, 1998] ont ensuite généralisé ce modèle 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 bord de la plate-forme) 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, 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 marque de rive, et le dernier 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 relatifs des deux côtés de la chaussée.

Par nature, les forces sont monotones ; par ailleurs nous avons choisi la forme inverse $\frac{1}{y}$ de façon à moduler la pression de façon plus importante lorsque le véhicule se rapproche des bords de sa voie.

3.2.3 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 à sa souplesse de trajectoire, exprimée par le temps de réaction.

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

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

avec F_i^n la somme des forces appliquées au véhicule n , \dot{y}_n sa vitesse 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.

3.2.4 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 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 :

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

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

3.2.5 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. Le premier est (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.

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

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, λ sa longueur minimale, et θ le coefficient répulsion/attraction, positif pour le noeud d'entrée et négatif pour le noeud de sortie.

3.3 conclusion

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

$$F(n) = F_{infra}^n + \sum_j F_{vc_j}^n + \sum_k F_{curve_k}^n + \xi_n \quad (3.9)$$

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 individuelle 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.

Chapitre 4

Expérimentations

4.1 Simulateur de trafic

Dans un premier temps, nous avons étendu les fonctionnalités du simulateur YATS afin de prendre en compte la perception sous forme de communication inter-véhiculaire. Nous avons ensuite simplifié le prototype pour analyser de façon indépendante les différents éléments du modèle LFM via un programme implémenté en Python.

L'architecture choisie repose sur une modélisation à base d'agents [Treuil et al., 2008] : 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).

Algorithm 1 Algorithme de simulation

```
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
```

Ainsi, à chaque pas de simulation, l'environnement fournit l'ensemble des informations perceptuelles aux agents, puis les agents calculent leurs nouvelles positions en fonction de ces percepts stockés localement.

Les paramètres du prototype ont été calibrés manuellement de façon à reproduire les données issues des tâches 2 et 3. Cette calibration a été réalisée de façon indépendante pour les différents éléments intégrés au modèle. Concernant le modèle IDM de base, nous avons ré-utilisé les paramètres proposés par leur auteur et résumés en table 3.1.

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 montre un effet de la largeur de plate-forme sur la vitesse adoptée, en corrélation avec la vitesse autorisée (figure 4.1). Deux types de comportements sont observés : les conducteurs



FIGURE 4.1 – Moyenne des vitesses adoptées en régime libre et contraint selon la largeur de plate-forme.

tendent à circuler à une vitesse inférieure à la limite autorisée, sauf lorsque la plate-forme est large par rapport à la limite imposée.

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 pour les zones limitées à 90 km/h.

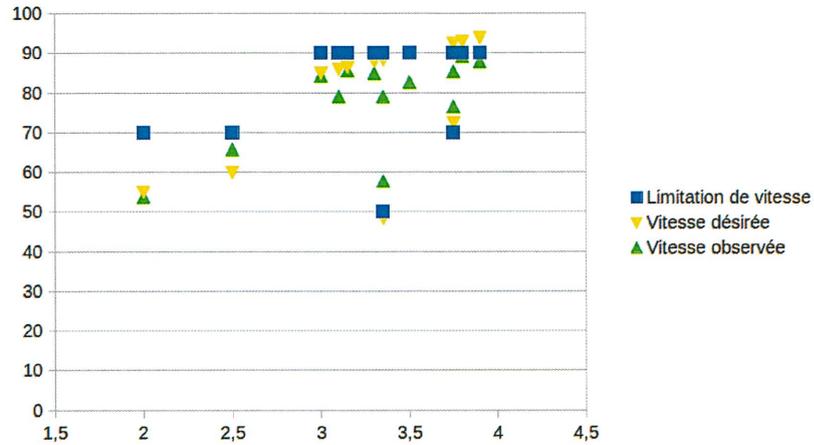


FIGURE 4.2 – Moyenne des vitesses désirées et des vitesses adoptées selon la largeur de plate-forme.

4.3 Évaluation de l'impact du profil en travers sur le comportement latéral

[Mecheri et al., 2017b] a montré que la position latérale des conducteurs était influencée par la largeur de la voie et par celle de la bande dérasée (aussi appelée sur-largeur).

Nous avons paramétré notre modèle de la façon suivante :

	ν	β
Valeur	1.2	0.5

TABLE 4.1 – Valeurs des paramètres de la composante infrastructure du comportement latéral

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 bande dérasée est bien capturée par le modèle LFM.

Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre 3, nous n'avons pas mis en place 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 en présence de forces constantes.

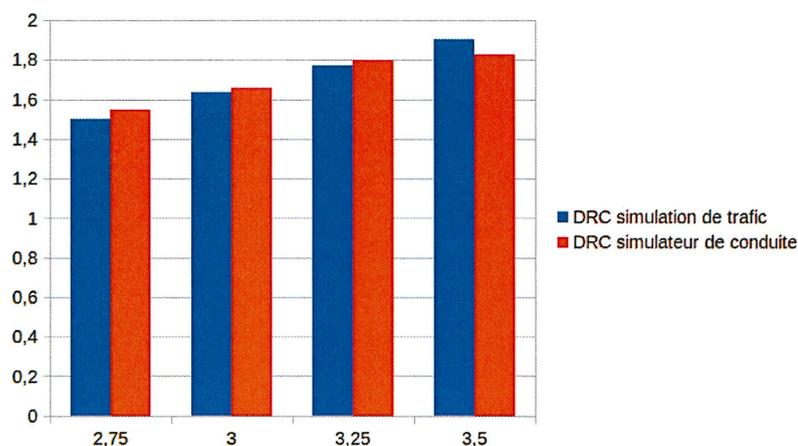


FIGURE 4.3 – Distance au centre de la route (DRC) en simulateur de conduite (tiré de [Mecheri et al., 2017a]) et en simulateur de trafic en fonction de la largeur de voie

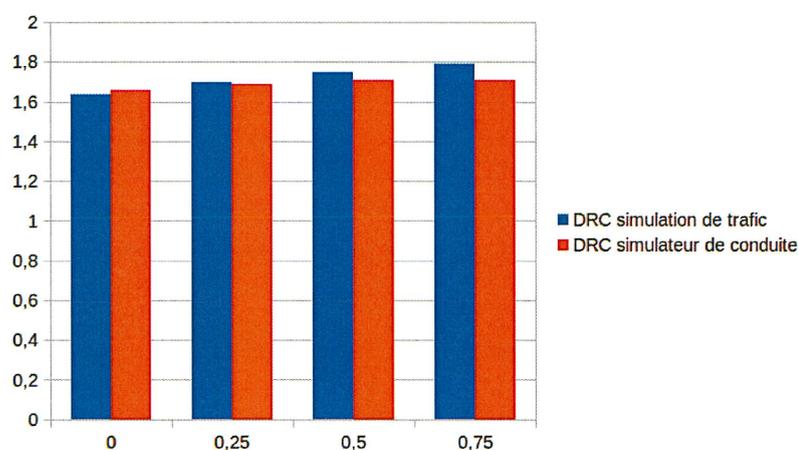


FIGURE 4.4 – Distance au centre de la route (DRC) en simulateur de conduite (tiré de [Mecheri et al., 2017a]) et en simulateur de trafic en fonction de la largeur de bande dérasée

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 selon [Mecheri et al., 2017b].

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 4.5 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.

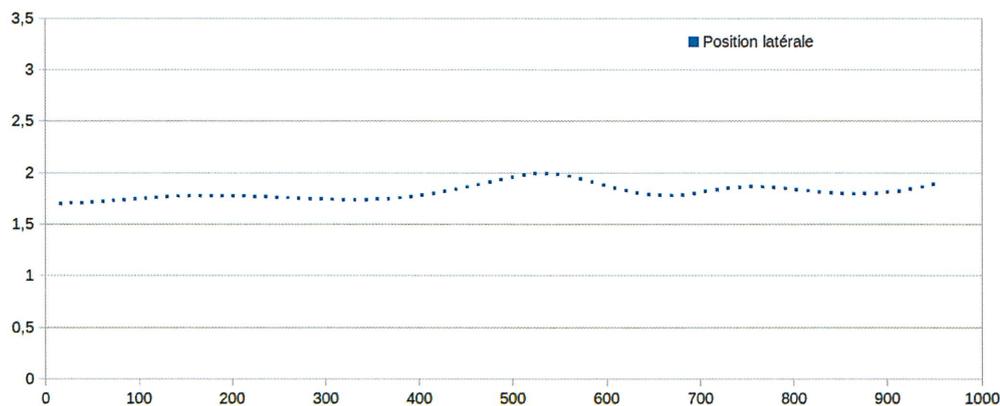


FIGURE 4.5 – trajectoire d'un véhicule simulé en présence de véhicules croisés

La figure 4.6 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 [Mecheri et al., 2017a]. Les résultats du modèle comportemental calibré sont très semblables à ceux étudiés en simulateur de conduite, tant à travers les modalités de trafic que de profil.

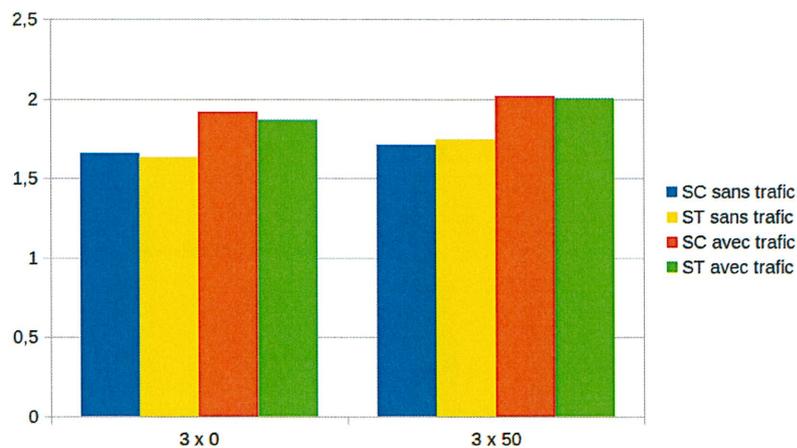


FIGURE 4.6 – Distance au centre de la route (DRC) en simulateur de conduite (tiré de [Mecheri et al., 2017a]) et en simulateur de trafic en fonction du profil et de la présence de trafic

De plus, les indicateurs de variabilité du comportement latéral sont cohérents avec

l'étude sus-citée. En effet, la modalité 3m + 0m présente un écart-type des positions latérales de 0,042, tandis que la modalité 3m + 0,5m a un écart-type de 0,060, ce qui indique que la restriction de la largeur de voie implique 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 4.2. Le premier noeud 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 [Mecheri et al., 2017a], nous avons opté pour le virage difficile (rayon de courbure de 150m, soit 76° de différence angulaire).

	d_{max}	$edge_j$	adj_j	max_a	λ	θ_e	θ_s
Valeur	300	$x_{entree} - 150$	76	90	50	1	-2

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

La figure 4.7 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 désaxée vers le centre de la route.

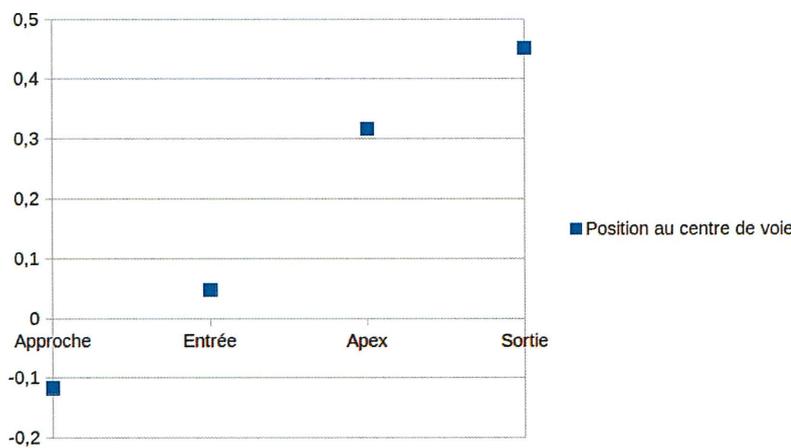


FIGURE 4.7 – Distance au centre de la voie en simulateur de trafic en courbe

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.

Chapitre 5

Conclusion

Dans ce rapport, 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.

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, et plus précisément des marquages d'axe, de rive et le bord de route pour positionner le véhicule dans sa voie. Les expérimentations montrent que, suite à une calibration manuelle du modèle, des valeurs proches de celles ayant été obtenues par [Mecheri et al., 2017a] sont observées, en faisant varier la largeur de voie et de bande dérasée.

Le troisième élément du modèle concerne l'impact des véhicules croisés. Ceux-ci provoquent un écart important à la situation sans trafic. À nouveau, les expérimentations montrent des résultats fidèles à ceux observés en simulateur de conduite.

Enfin, le dernier élément du modèle, 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 tendent à valider notre approche et le modèle LFM. Des expérimentations supplémentaires, ainsi qu'une calibration sur la base des données réelles analysées doivent cependant être réalisées. 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 par exemple un effet des véhicules croisés sur le comportement longitudinal.

Enfin, la mise à disposition des résultats de la troisième expérimentation en simulateur de conduite sur la perception des bandes multi-fonctionnelles doit permettre à terme

l'inclusion de cyclistes au sein des simulations.

Remerciements

Je tiens à remercier Sio-Song Ieng, dont la compétence et la disponibilité pour la mise au point du modèle et l'encadrement de Souhir Helali a permis la production du travail effectué sur Profil.

Bibliographie

- [Bando et al., 1995] Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata, A., and Sugiyama, Y. (1995). Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation. *Physical Review E*, 51 :1035–1042.
- [Barceló et al., 2010] Barceló, J. et al. (2010). *Fundamentals of traffic simulation*, volume 145. Springer.
- [Bonte et al., 2007] Bonte, L., Espié, S., and Mathieu, P. (2007). Virtual lanes interest for motorcycles simulation. Technical report, HAL.
- [Bornard, 2012] Bornard, J.-C. (2012). *Développement d'un modèle du conducteur automobile : De la modélisation cognitive à la simulation numérique*. PhD thesis, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.
- [Brackstone and McDonald, 1999] Brackstone, M. and McDonald, M. (1999). Car-following : a historical review. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 2(4) :181–196.
- [Buisson and Lesort, 2010] Buisson, C. and Lesort, J.-B. (2010). *Comprendre le trafic routier. Méthodes et calculs*.
- [Burghout et al., 2005] Burghout, W., Koutsopoulos, H., and Andreasson, I. (2005). Hybrid mesoscopic-microscopic traffic simulation. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (1934) :218–255.
- [Czura et al., 2015] Czura, G., Taillandier, P., Tranouez, P., and Daudé, É. (2015). Mosaïcic : 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*, pages 265–274. Springer.
- [Désiré et al., 2017] Désiré, L., Dupuis, Y., Gritti, R., and Adam., M. (2017). 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.
- [El Hadouaj, 2004] El Hadouaj, S. (2004). *Conception de comportements de résolution de conflits et de coordination : Application à une simulation multi-agent du trafic routier*. PhD thesis, Thèse de Doctorat de l'Université de Paris 6, France.
- [Espié and Auberlet, 2007] Espié, S. and Auberlet, J. M. (2007). 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.

- [Fellendorf and Vortisch, 2010] Fellendorf, M. and Vortisch, P. (2010). Microscopic traffic flow simulator vissim. In *Fundamentals of traffic simulation*, pages 63–93. Springer.
- [Gettman and Head, 2003] Gettman, D. and Head, L. (2003). Surrogate safety measures from traffic simulation models. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (1840) :104–115.
- [Gipps, 1986] Gipps, P. (1986). A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B : Methodological*, 20(5) :403–414.
- [Gunay, 2007] Gunay, B. (2007). Car following theory with lateral discomfort. *Transportation Research Part B : Methodological*, 41(7) :722–735.
- [Gupta and Dhiman, 2014] Gupta, A. K. and Dhiman, I. (2014). Analyses of a continuum traffic flow model for a nonlane-based system. *International Journal of Modern Physics C*, 25(10) :1450045.
- [Helali, 2016] Helali, S. (2016). Modélisation multi-agent des comportement latéraux des véhicules légers. Master’s thesis, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne.
- [Helbing, 2001] Helbing, D. (2001). Traffic and related self-driven many-particle systems. *Reviews of modern physics*, 73 :1067.
- [Helbing and Molnar, 1995] Helbing, D. and Molnar, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, 51(5) :4282.
- [Helbing and Tilch, 1998] Helbing, D. and Tilch, B. (1998). Generalized force model of traffic dynamics. *Physical review E*, 58(1) :133.
- [Hoogendoorn and Bovy, 2001] Hoogendoorn, S. and Bovy, P. (2001). 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.
- [Kesting et al., 2007] Kesting, A., Treiber, M., and Helbing, D. (2007). General lane-changing model mobil for car-following models. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (1999) :86–94.
- [Khan and Maini, 1999] Khan, S. and Maini, P. (1999). Modeling heterogeneous traffic flow. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (1678) :234–241.
- [Ksontini et al., 2013] Ksontini, F., Guessoum, Z., Mandiau, R., and Espié, S. (2013). 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.
- [Laureshyn et al., 2010] Laureshyn, A., Svensson, Å., and Hydén, C. (2010). Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data : Theoretical framework and first implementation. *Accident Analysis & Prevention*, 42(6) :1637–1646.
- [Lee et al., 2009] Lee, T.-C., Polak, J., and Bell, M. (2009). New approach to modeling mixed traffic containing motorcycles in urban areas. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2140) :195–205.

- [Li et al., 2015] Li, Y., Zhang, L., Peeta, S., Pan, H., Zheng, T., Li, Y., and He, X. (2015). Non-lane-discipline-based car-following model considering the effects of two-sided lateral gaps. *Nonlinear Dynamics*, 80(1-2) :227–238.
- [Marwah and Singh, 2000] Marwah, B. and Singh, B. (2000). Level of service classification for urban heterogeneous traffic : A case study of kanpur metropolis. In *fourth international symposium on Highway Capacity, Hawaii*.
- [Mecheri et al., 2017a] Mecheri, S., Lobjois, R., and Rosey, F. (2017a). 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.
- [Mecheri et al., 2017b] Mecheri, S., Rosey, F., and Lobjois, R. (2017b). The effects of lane width, shoulder width, and road cross-sectional reallocation on drivers' behavioral adaptations. *Accident Analysis & Prevention*, 104 :65–73.
- [Michon, 1985] Michon, J. (1985). A critical view of driver behavior models : What do we know, what should we do. *Human behavior and traffic safety*, pages 485–520.
- [Nagel and Schreckenberg, 1992] Nagel, K. and Schreckenberg, M. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de physique I*, 2(12) :2221–2229.
- [Newell, 1993] Newell, G. (1993). A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part i : General theory. *Transportation Research Part B : Methodological*, 27(4) :281–287.
- [Peng et al., 2011] Peng, G., Cai, X., Cao, B., and Liu, C. (2011). Non-lane-based lattice hydrodynamic model of traffic flow considering the lateral effects of the lane width. *Physics Letters A*, 375(30) :2823–2827.
- [Redmill and Ozguner, 1999] Redmill, K. A. and Ozguner, U. (1999). Vatsim : a vehicle and traffic simulator. In *Intelligent Transportation Systems, 1999. Proceedings. 1999 IEEE/IEEEJ/JSIAI International Conference on*, pages 656–661. IEEE.
- [Rosey, 2016] Rosey, F. (2016). Profil - profil de la route comme facteur d'influence de la lisibilité de l'infrastructure et son effet sur la trajectoire – état de l'art. Technical report, Cerema - Dter NC.
- [Saunier, 2015] Saunier, J. (2015). De l'intérêt de la cognition incarnée pour les agents logiciels (présentation courte). In [Vercouter and Picard, 2015], pages 101–110.
- [Six, 2014] Six, L. (2014). *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.
- [Svensson and Hydén, 2006] Svensson, Å. and Hydén, C. (2006). Estimating the severity of safety related behaviour. *Accident Analysis & Prevention*, 38(2) :379–385.
- [Treiber et al., 2000] Treiber, M., Hennecke, A., and Helbing, D. (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical review E*, 62(2) :1805.

- [Treiber et al., 2006] Treiber, M., Kesting, A., and Helbing, D. (2006). Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 360(1) :71–88.
- [Treuil et al., 2008] Treuil, J.-P., Drogoul, A., and Zucker, J.-D. (2008). *Modélisation et simulation à base d’agents : exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques*. Dunod.
- [Van Winsum and Godthelp, 1996] Van Winsum, W. and Godthelp, H. (1996). Speed choice and steering behavior in curve driving. *Human factors*, 38(3) :434–441.
- [Vercouter and Picard, 2015] Vercouter, L. and Picard, G., editors (2015). *Environnements socio-techniques - JFSMA 15 - Vingt-troisièmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents, Rennes, France, June 30th-July 1st, 2015*. Cépaduès Éditions.