

**Modélisation microscopique et
macroscopique du trafic.
Impact des véhicules automatisés sur
la sécurité du conducteur**

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 19 Décembre 2014

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Haute-Alsace – Mulhouse
(spécialité automatique)

par

Oussama DERBEL

devant la commission d'examen :

Directeur de thèse : Michel Basset (Université de Haute-Alsace, France)

Co-directeur de thèse: Benjamin Mourllion (Université de Haute-Alsace, France)

Rapporteurs : Prof. Said Mammar Université d'Evry Val-d'Essonne, France
Prof. Xavier Moreau Université de Bordeaux 1, France

Examineurs : Prof. Peter Tamas Université de Technologie et d'Economie, Hongrie
Prof. Jean-Christophe Popieul Université de valenciennes, France

Mis en page avec la classe thloria.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier le directeur de cette thèse, M. Michel Basset, pour m'avoir accueilli et m'avoir fait confiance durant toute la période de mon travail au laboratoire MIPS. J'espère avoir été à la hauteur. Je le remercie encore de m'avoir financé durant les trois ans de la thèse.

Mes remerciements vont spécialement à M. Benjamin Mourllion pour la gentillesse et la patience qu'il a manifestées à mon égard durant cette thèse. Certainement, j'ai appris beaucoup de choses de lui et je suis en train de les transmettre à mes stagiaires.

Je remercie particulièrement le professeur M. Said Mammar de l'intérêt qu'il a manifesté à l'égard de cette recherche en s'engageant à être rapporteur.

Également, je remercie le professeur Xavier Moreau d'avoir accepté de rapporter mes travaux de thèse et de trouver le temps pour assister à la soutenance.

Mes remerciements vont aussi au professeur Peter Tamas avec qui j'ai travaillé durant une petite période de ma thèse et développé des résultats intéressants, communiqué dans une conférence et publié un papier dans un journal.

Je remercie également le professeur Monsieur Jean-Christophe Popieul d'avoir accepté d'examiner les travaux de ma thèse et trouver de son temps pour assister à la soutenance.

Ces remerciements seraient incomplets si je n'en adressais pas à l'ensemble de l'équipe MIAM. Je remercie tous les membres permanents de cette équipe ainsi que les non permanents.

Je remercie le professeur M. René Jr. Landry, mon big boss, de m'avoir accueilli et de me donner sa confiance pour diriger la recherche dans le laboratoire LASSENA. Il était toujours patient avec moi en ce moment transitoire.

Ma reconnaissance va particulièrement à mes parents et mes frères, avec leurs petites familles. C'est grâce à leurs encouragements et leurs soutiens sans faille à tous les niveaux que je suis arrivé à ce niveau.

Je remercie de tout mon coeur Rachid (on n'est pas ensemble), également Hamdi, Hossni, Wajdi et Mahfouth d'avoir été des frères plus que des amis. On a vécu ensemble des moments très agréables. Également, je remercie Nessrine d'avoir été ma soeur en plus qu'une amie.

J'exprime ma gratitude à Aymen, Foued, Omar, Mohamed. K, Mohamed A.k, Raki, Mohamed A.S, et à tous mes amis en Tunisie et partout dans le monde. Je sais qu'ils sont nombreux. Mes remerciements vont aussi à Maroua pour son soutien moral. Vous m'avez tous soutenu par votre encouragement.

*Je dédie cette thèse
à mes parents,
mes frères
et mes amis.*

Table des matières

Table des figures	10
-------------------	----

Liste des tableaux	12
--------------------	----

Notations

Acronymes

Notes aux lecteurs

Introduction générale

1	Contexte général	19
2	Objectifs et contributions	20
3	Organisation de la mémoire	21

1

Modèles pour le trafic mixte

1.1	Introduction	23
1.2	Modèles microscopiques longitudinaux	25
1.2.1	Introduction	25
1.2.2	Modèles de « conducteurs »	26
1.2.2.1	Introduction	26
1.2.2.2	Contexte d'étude : critères de choix	26
1.2.2.3	État de l'art des modèles « conducteur »	27
1.2.2.4	Synthèse et modèle retenu	31
1.2.2.5	Conclusions	33
1.2.3	Modèles de véhicules automatisés	33
1.2.3.1	Introduction	33
1.2.3.2	Contexte d'étude : critères de choix	34
1.2.3.3	État-de-l'art des modèles de véhicules automatisés	34

1.2.3.4	Synthèse du modèle retenu	38
1.2.3.5	Conclusions	39
1.2.4	Conclusions	39
1.3	Modèles microscopiques latéraux	39
1.3.1	Introduction	39
1.3.2	État-de-l'art des modèles de changement de voie	40
1.3.2.1	Modèle de Gipps	40
1.3.2.2	Modèle de Kita	41
1.3.2.3	Modèle de Hidas	42
1.3.2.4	Modèle de Kesting	42
1.3.2.5	Conclusions	44
1.3.3	Synthèse du modèle matriciel du trafic	44
1.3.3.1	Introduction	45
1.3.3.2	Formulation	45
1.3.3.3	Conclusions	54
1.3.4	Conclusions	55
1.4	Modèle macroscopique pour le trafic	55
1.4.1	Introduction et contexte d'études	56
1.4.2	État-de-l'art des modèles vitesse-densité	57
1.4.2.1	Modèle de Greenshields	57
1.4.2.2	Modèle de Greenberg	58
1.4.2.3	Modèle de Underwood	58
1.4.2.4	Modèle de Newell	59
1.4.2.5	Modèle de Drake	59
1.4.2.6	Modèle de Pipes	60
1.4.2.7	Modèle de Drew	60
1.4.2.8	Modèle de Del Castillo	61
1.4.2.9	Modèle de Aerde	61
1.4.2.10	Modèle de Mac Nicholas	62
1.4.2.11	Synthèse	62
1.4.3	Du microscopique au macroscopique	63
1.4.3.1	Hypothèses de simulation	63
1.4.3.2	Démarches de simulation	63
1.4.3.3	Résultats de simulation et discussion	65
1.4.3.4	Conclusions	67
1.4.4	Méthode de synthèse du modèle vitesse-densité	67
1.4.4.1	Démarches	69

1.4.4.2	Conclusions	70
1.4.5	Synthèse du modèle générique vitesse-densité	72
1.4.5.1	Synthèse du modèle	72
1.4.5.2	Modèle vitesse-densité généralisé	73
1.4.5.3	Sous-modèles	73
1.4.5.4	Conclusions	74
1.4.6	Conclusions	74
1.5	Conclusions	75

2

Scénarios et critères pour l'évaluation d'un ADAS

76

2.1	Introduction	76
2.2	Impact de l'ADAS sur la sécurité dans un trafic mixte	78
2.2.1	Introduction	78
2.2.2	Scénarios d'évaluation	79
2.2.2.1	Freinage d'urgence	79
2.2.2.2	Freeze	79
2.2.2.3	Mur de brique	80
2.2.2.4	Véhicule en sens inverse	80
2.2.2.5	Goulot d'étranglement	80
2.2.2.6	Commutation des modes de conduite : automatisé ou manuel	80
2.2.2.7	Profil de vitesse	80
2.2.3	Indicateurs d'évaluation de la sécurité dans un trafic	80
2.2.3.1	Introduction	80
2.2.3.2	État-de-l'art des indicateurs d'évaluation de la sécurité dans un trafic	81
2.2.4	Conclusions	98
2.3	Modèles de consommation et d'émission des polluants pour le trafic mixte	99
2.3.1	Introduction	99
2.3.2	Facteurs et paramètres influents sur la consommation et les émissions de polluants d'un véhicule	100
2.3.2.1	Facteurs directs	100
2.3.2.2	Facteurs indirects	101
2.3.3	État de l'art des modèles de consommation	108
2.3.3.1	Modèles empiriques	108
2.3.3.2	Modèles mécaniques	111
2.3.3.3	Modèles mixtes	112

2.3.3.4	Conclusions	113
2.3.4	État de l'art des modèles d'émission des polluants	114
2.3.4.1	Modèles statiques	114
2.3.4.2	Modèles dynamiques	115
2.3.4.3	Calcul des émissions de CO_2 à partir de la consommation	116
2.3.4.4	Conclusions	116
2.3.5	Conclusions	117
2.4	Conclusions	117

3	118
Outils de simulation et résultats	

3.1	Introduction	119
3.2	Simulateur et scénarios	120
3.2.1	Introduction	120
3.2.2	Structure du simulateur	120
3.2.2.1	Entrées	120
3.2.2.2	Corps	120
3.2.2.3	Sorties	121
3.2.3	Modèles	122
3.2.3.1	Modèles longitudinaux	122
3.2.3.2	Modélisation du changement de voie	122
3.2.4	Géométrie de la route	123
3.2.4.1	Infrastructure Ring sans voie d'insertion	123
3.2.4.2	Infrastructure Ring avec voie d'insertion	123
3.2.5	Scénarios développés	124
3.2.6	Gestion des collisions	125
3.2.7	Résultats et niveau de confiance	125
3.2.8	Conclusions	126
3.3	Résultats relatifs au scénario freeze	127
3.3.1	Introduction	127
3.3.2	Conditions de simulation et principes d'évaluation	127
3.3.3	Gestion des collisions : modèle sans agglomérat	128
3.3.3.1	Résultats relatifs au nombre de collisions	128
3.3.3.2	Résultats relatifs à la sévérité des collisions	129
3.3.4	Gestion des collisions : modèle avec agglomérat	130
3.3.4.1	Résultats relatifs au nombre de collisions	130
3.3.4.2	Résultats relatifs à la sévérité des collisions	132

3.3.5	Conclusions	133
3.4	Résultats relatifs au scénario sans collision	133
3.4.1	Introduction	133
3.4.2	Conditions de simulation et principes d'évaluation	134
3.4.3	Résultats relatifs à l'indicateur DWell Time (DWT)	135
3.4.4	Résultats relatifs à l'indicateur Modified Dwell Time (MDWT)	136
3.4.5	Résultats relatifs à la consommation et aux émissions de polluants	138
3.4.6	Conclusions	141
3.5	Résultats relatifs au scénario profil de vitesse	142
3.5.1	Introduction	142
3.5.2	Conditions de simulations	142
3.5.3	Résultats relatifs aux nombre de collisions et à la sévérité	142
3.5.4	Résultats relatifs à la consommation en carburant et aux émissions de polluants	143
3.5.5	Conclusions	145
3.6	Résultats relatifs au goulot d'étranglement	146
3.6.1	Introduction	146
3.6.2	Conditions de simulation et principes d'évaluation	146
3.6.3	Résultats relatifs au nombre de collisions et à la sévérité	146
3.6.4	Résultats relatifs à la consommation et aux émissions de polluants	148
3.6.5	Conclusions	150
3.7	Modified Intelligent Driver Model	150
3.7.1	Introduction	150
3.7.2	Adaptation aux capacités réelles du véhicule	151
3.7.3	Nouvelle formulation de l'IDM	151
3.7.4	Détermination du paramètre Fv	153
3.7.4.1	Scénario	153
3.7.4.2	Résultats et discussions	153
3.7.5	Conclusions	154
3.8	Conclusions	154

Conclusions générales et perspectives	158
--	------------

Bibliographie	161
----------------------	------------

Annexes	171
----------------	------------

Table des figures

1	Positions des véhicules dans une file	13
1.1	Diagramme fondamental d'un trafic selon [Kerner, 1998]	24
1.2	Accélérations du premier suiveur suivant les modèles OVM, GFM, FVDM et TVDM	29
1.3	Vitesses des véhicules en utilisant le modèle TVDM	31
1.4	Modèle ACC de [Germann and Isermann, 1995]	35
1.5	Modélisation longitudinale d'un véhicule automatisé selon [Molina, 2005]	36
1.6	Intelligent Driver Model : vitesses des véhicules avec différentes vitesses désirées et temps en amont de sécurité	38
1.7	Position des véhicules dans une section du trafic	40
1.8	Position des véhicules dans une portion d'un trafic	46
1.9	$\hat{k}(t)$ lors d'un changement de voie	55
1.10	Diagramme fondamental de [Greenshields, 1934] ($V_{\max} = 50 \text{ km.h}^{-1}$)	58
1.11	Diagramme fondamental de [Greenberg, 1959] ($V_{\max} = 50 \text{ km.h}^{-1}$)	59
1.12	Diagramme fondamental de [Pipes, 1967] ($V_{\max} = 50 \text{ km.h}^{-1}$)	60
1.13	Diagramme fondamental de [Drew, 1968] ($V_{\max} = 50 \text{ km.h}^{-1}$)	61
1.14	Positions des véhicules dans la file	63
1.15	Vitesse et densité en fonction du temps	66
1.16	Densité de la file pour différentes valeurs de a_n , b_n et T_n	67
1.17	Vitesse de la file pour différentes valeurs de a_n , b_n et T_n	68
1.18	Données vitesse-densité obtenues à partir de la simulation du modèle IDM	68
1.19	Identification des fonctions D et v à partir des données macroscopiques issues de la simulation	70
1.20	Erreur absolue de la vitesse et la densité	71
1.21	Erreur relative de la vitesse et de la densité	71
2.1	Sévérité du choc en fonction de l'EES	84
2.2	Risque en fonction du TTC	88
2.3	Position du problème pour le PICUD	91
2.4	Bilan des forces extérieures au véhicule	104
2.5	Puissance de traction selon le modèle de [Luu, 2009]	107
2.6	Régime moteur en fonction de la vitesse du véhicule	108
2.7	Consommation du véhicule à vitesse constante : modèle de [Luu, 2009]	114
2.8	Emission de CO_2	116
3.1	Structure du simulateur	121
3.2	Architectures de route développées	123
3.3	Résultat basé sur l'indice relatif au nombre de collisions : S_{Coll}	128

3.4	Résultats relatifs à la sévérité des collisions pour le scénario freeze (sans agglomérat)	129
3.5	Indice de sécurité basé sur le nombre de collisions : S_{Coll}	131
3.6	Résultats relatifs à la sévérité pour le scénario freeze	132
3.7	Diagramme fondamental vitesse - capacité [Buisson and Lesort, 2010]	135
3.8	Relation entre la sécurité (S_{DWT}), la densité et le pourcentage des véhicules automatisés	136
3.9	Relation entre la sécurité (S_{MDWT}), la capacité et le pourcentage de véhicules automatisés	137
3.10	Module de la consommation et des émissions de polluants	138
3.11	Consommation moyenne en carburant par véhicule	139
3.12	Relation entre la vitesse moyenne et la densité de la file (sans scénario)	140
3.13	Résultats relatifs à l'émission de CO_2	140
3.14	Résultats relatifs aux émissions de CO et HC	141
3.15	Relation entre la sécurité et le pourcentage de véhicules automatisés en termes de nombre de collisions	143
3.16	Relation entre les valeurs de l_{ees} et le pourcentage de véhicules automatisés	144
3.17	Indice de sécurité basé sur la sévérité du collision : S_{ees}	144
3.18	Consommation moyenne en carburant par véhicule	145
3.19	Résultats relatifs aux émissions de CO et HC	145
3.20	Résultats relatifs aux émissions de CO et HC	146
3.21	Sécurité basée sur le nombre de collisions : goulot d'étranglement	147
3.22	Résultats relatifs à la sévérité pour le goulot d'étranglement	148
3.23	Résultats relatifs à la consommation en carburant par véhicule	149
3.24	Résultats relatifs aux émissions de CO_2	149
3.25	Résultats relatifs aux émissions de CO et de HC	150
3.26	Vitesses des véhicules pour différentes valeurs de Fv_n	156
3.27	Accélérations des véhicules pour différentes valeurs de Fv_n	157
1	Graphe d'appel de la fonction « main »	173
2	Graphe d'appel de la fonction « StringEvolution »	176
3	Position d'un véhicule pour deux différents pas de simulation	177

Liste des tableaux

1.1	État de l'art du modèle GHR	28
1.2	Paramètres du modèle GFM	30
1.3	Paramètres des modèles conducteurs	32
1.4	Partie 1 du tableau de comparaison	32
1.5	Partie 2 du tableau de comparaison	32
1.6	Paramètres du modèle IDM	38
1.7	Tableau de comparaison des modèles ACC	39
1.8	Matrice de gains pour le véhicule c	41
1.9	Matrice de gains pour le véhicule p_s	41
1.10	Classification du comportement conducteur selon les paramètres p_f et Δa_{th} du modèle de [Kesting, 2008] selon [Massonnet, 2009]	44
1.11	Synthèse des modèles	62
1.12	Paramètres de simulation du modèle IDM [Kesting, 2008]	64
1.13	Paramètres de simulation	64
1.14	Paramètres des fonctions D et v pour $\gamma = 0,8$	69
1.15	Erreur sur la densité et sur la vitesse	70
2.1	Sévérité d'un choc en fonction de l'EES	84
2.2	Description de la possibilité de collision entre deux voitures	86
2.3	Risque selon l'indicateur IBTR	94
2.4	Tableau récapitulatif des indicateurs de sécurité	96
2.5	Paramètres du modèle d'EMITp	106
2.6	Rapport de transmission pour chaque position de la boîte vitesse	108
2.7	Valeurs de DPDi selon le style de conduite [Fonseca et al., 2010]	109
2.8	Coefficients relatifs au modèle consommation de [Fonseca et al., 2010]	109
2.9	Valeurs des paramètres du modèle de [Luu, 2009]	113
2.10	Paramètres du modèle d'EMITe	115
3.1	Paramètres de simulations pour le scénario freeze	128
3.2	Paramètres de simulation du modèle IDM	128
3.3	Paramètres de simulation	134
3.4	Paramètres de simulation du modèle IDM	134
3.5	Paramètres de simulation	142
3.6	Paramètres de simulation	147
1	Paramètres du véhicule [Luu, 2011]	172
2	Rapport de transmission pour chaque position de la boîte vitesse [Luu, 2011]	172

Notations

La figure 1 présente une file de N véhicules.

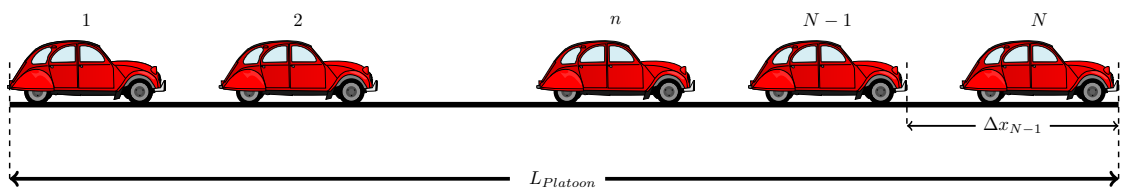


FIGURE 1 – Positions des véhicules dans une file

Notations

n	Indice du véhicule
ℓ_n	Longueur du véhicule n
ℓ	Longueur moyen des véhicules
x_n	Position du véhicule n
$\dot{x}_n = v_n$	Vitesse du véhicule n
$\ddot{x}_n = \dot{v}_n$	Accélération du véhicule n
$\Delta x_n = x_{n+1} - x_n$	Distance entre les pare choc avant des véhicules n et $n + 1$
$\Delta v_n = v_{n+1} - v_n$	Vitesse relative du véhicule n
s	Distance entre le pare choc du arrière du véhicule $n + 1$ et le pare choc avant du véhicule n [m]
τ_n	Temps de réaction du conducteur
s_e	Sensibilité du conducteur
γ_n	Capacité maximale de décélération
<hr/>	
V_s	Le véhicule suivi
P_f	La position dans la file
<i>voie</i>	Le numéro de la voie où se trouve le véhicule N_{Veh}
N	Nombre de véhicule dans le trafic
<hr/>	
D	Densité du trafic
V	Vitesse du trafic
D_{\max}	Densité maximale
V_{\max}	Vitesse maximale
a_n	Accélération maximale
b_n	Décélération maximale
T_n	Temps de sécurité en amont
$L_{platoon}$	Longueur de la file
v_n^0	Vitesse désirée
m_n	Masse du véhicule n
TTC_n	Time To Collision du véhicule n
\overline{TET}	Time Exposed to Time to collision moyen
T	Temps de simulation
TTC_n^*	Time To Collision critique du véhicule n
Δx_{n-crit}^{dr}	Inter-distance critique du conducteur
Δx_{n-crit}^{av}	Inter-distance critique du véhicule automatisé
DWT_n	DWell Time du véhicule n
$D_n^{freinage}$	Distance de freinage du véhicule n
$D_n^{arrêt}$	Distance d'arrêt du véhicule n
T_n^f	Temps de freinage du véhicule n
r_n	Rayon de la roue du véhicule n
N_n^t	Rapport de multiplicité de la boîte à vitesse
N_n^f	Rapport de multiplicité de la transmission
T_n^e	Le couple fourni par le moteur
\dot{w}_n^e	La vitesse du moteur
I_n^e	Moment d'inertie du moteur
I_n^t	Moment d'inertie de la transmission
I_n^d	Moment d'inertie de l'arbre de transmission
I_n^w	Moment d'inertie de la roue
w_n^w	La vitesse de rotation de la roue

Acronymes

ABS	Anti-lock Braking System
ABV	Automatisation Basse Vitesse
ACC	Adaptive/Automatic/Advanced cruise control
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
AEB	Autonomous Emergency Braking
AHS	Automated Highway Systems
AICC	Adaptive Intelligent Cruise Control
ATIS	Advanced Traveler Information Systems
ATMS	Advanced Traffic Management Systems
AVCS	Advanced Vehicle Control Systems
CI	Crash Index
CORSIM	CORridor SIMulation
COSMODRIVE	COgnitive Simulation MOdel of the DRIVER
CrI	Criticality Index
CVO	Commercial Vehicle Operation
DRIVE	Dedicated Road Infrastructure for Vehicle safety in Europe
DWT	DWell Time
EBS	Equivalent Barrier Speed
EES	Energy Equivalent Speed
ESC	Electronic Stability Control
ESP	Electronic Stability Program
FCW	Forward Collision Warning
FVDM	Full Velocity Difference Model
GES	Gaz à Effet de Serre
GFM	General Force Model
GHR	Ghazis - Hermann - Rothery
GIDS	Generic Intelligent Driver Support
GPS	Global Positionning System
IBDR	Indicator Braking Distance Risk
IBTR	Individual Braking Time Risk
IBRDR	Individual Braking Residual Distance Risk
IDM	Intelligent Driver Model
ITS	Intelligent Transportation System
ITTC	Inverse of Time To Collision
MDWT	Modified DWell Time
MOBIL	Minimizing Overall Braking Induced by Lane Changes
MTTC	Modified Time to Collision
ONU	Organisation des Nation Unis
OVM	Optimal Velocity Model
16 UTAC	Union Technique de l'Automobile du motocycle et du Cycle
PICUD	Potential Index for Collision with Urgent Deceleration
TET	Time Exposed Time to collision
TIT	Time Integrated Time to collision
TTC	Time To Collision
TVDM	Two Velocity Difference Model

C_x	Coefficient aérodynamique
CO	Oxyde de carbone
CO_2	Dioxyde de carbone
HC	Hydrocarbure
NO_x	Oxyde d'azote
SO_2	Dioxyde de soufre

Notes aux lecteurs

Notes aux lecteurs

La connaissance de quelques règles permet une lecture plus pratique de cet ouvrage. Chaque lien en bleu représente une référence bibliographique, une figure ou un tableau. Le fait de cliquer sur le lien permet d'aller consulter à la référence. Pour revenir à la lecture, la combinaison de touche « AltGr » + « flèche gauche » avec la plupart des lecteurs PDF permet de revenir à la source du lien précédemment utilisé. Les liens internes peuvent renvoyer vers une section, vers un terme du glossaire ou de la liste des acronymes, ou à l'égard d'une figure ou un tableau.

Introduction générale

1 Contexte général

Un système de transport efficace est essentiel pour le bon fonctionnement et la prospérité de la société moderne. Il doit répondre, entre autres, aux trois enjeux majeurs que sont la sécurité, la réduction de la consommation et la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) dont le dioxyde de carbone (CO_2) et le monoxyde de carbone (CO) indépendamment des performances du véhicule (mode économique, type du moteur, ...). Ces trois critères se dégradent fortement en cas de congestion de trafic. La congestion peut se définir par la formation de files de véhicules « en attente » qui roulent à basse vitesse ($\leq 50 \text{ km.h}^{-1}$) dans une zone de trafic. Selon [Lomax, 2013], en 2011 aux États Unis, le coût de congestion de trafic était de 121 milliards de dollars, en hausse d'un milliard de dollars par rapport à 2010. En Allemagne, le coût de congestion de trafic est estimé à 20 milliards d'euros chaque année d'après [Schrank and Lomax, 2005]. Toutefois, la congestion de trafic peut causer non seulement des dégâts financiers mais aussi des dégâts matériels et humains à travers les accidents. Pour pallier ce problème, de nombreux efforts technologiques comme politiques ont été investis à différents niveaux. Une première solution consiste à étendre les infrastructures de transport routier dans les zones de trafic les plus denses. L'inconvénient de cette solution est son coût très élevé. Parallèlement, la recherche dans le domaine de l'automobile a permis de développer des systèmes d'aide à la conduite, en anglais Advanced Driver Assistance Systems. Leur objectif est d'apporter de l'aide voire de remplacer le conducteur humain dans certaines tâches de conduite. Comme ils peuvent optimiser le chemin, ils peuvent intervenir dans des situations critiques comme l'accident (e.g. airbag). Ils peuvent aussi assurer les fonctions de prévention (collision avec un obstacle fixe...) comme l'action (e.g. système anti-blocage des freins, en anglais Anti-lock Braking System (ABS)).

Progressivement, les attentes techniques des systèmes d'aide à la conduite ont évolué. En 1990, l'automatisation totale du trafic routier, basée sur des véhicules automatisés, a été proposée comme une solution visionnaire [Varaiya, 1993]. Néanmoins, ces systèmes doivent être accompagnés par une infrastructure spécifique et des voies réservées selon [Ioannou, 1997]. Plusieurs constructeurs automobiles et instituts de recherche ont commencé cette initiative d'automatisation du trafic. Une série de projets a été réalisée dans ce cadre dont la plupart d'entre eux visent à trouver des solutions pratiques aux problèmes de la sécurité, la surconsommation en carburant et les émissions des gaz à effet de serre.

En Amérique, le projet ITS - AHS (Intelligent Transportation System - Automated Highway Systems) a été lancé avec, parmi les objectifs d'optimisation du trajet du véhicule en utilisant des données de navigation comme le GPS, l'étude des systèmes anti-collision et l'étude de la coopération entre véhicules et entre le véhicule et l'infrastructure. En Amérique également, en 1994, le projet PATH (Partners for Transit and Highway) a envisagé de développer des concepts et des techniques dans le domaine de la modélisation et du contrôle du véhicule.

En Europe, plus particulièrement en France, le projet ABV (Automatisation Basse Vitesse)

a débuté en 2009 afin de mettre l'accent sur la sécurité dans les voies rapides urbaines et autoroutes sujettes à congestion. Il vise l'automatisation de la conduite par le désengagement partiel ou complet du conducteur, à basse vitesse, sur des itinéraires sécurisés assurant une certaine qualité de service. Les travaux menés dans ce mémoire entre dans le cadre de ce projet labellisé et financé par l'agence national de la recherche en France (ANR VTT-ABV).

Ces projets ont permis aux constructeurs automobiles de bénéficier d'une évolution technologique, théorique et pratique, de nouveaux systèmes d'aide à la conduite et l'obtention des véhicules entièrement automatisés, sécuritaires et écologiques. Récemment, en 2010, la société Google a annoncé avoir un système de pilotage automatique pour l'automobile et qui est installé sur différents véhicules, en l'occurrence l'Audi TT et la Toyota Prius. Ce dernier véhicule a été testé dans le territoire de Californie et a parcouru une distance de 120 km en mode autonome. Cependant, aujourd'hui encore, la législation concernant la circulation des véhicules totalement automatisés reste restreinte à quelques territoires des États Unis. Récemment, en Janvier 2014, l'état du Michigan est le quatrième état aux États Unis qui a autorisé le test des véhicules sans conducteur sur son territoire.

Ainsi, la commercialisation des systèmes de pilotage automatiques du véhicule est estimée dans un futur proche. En outre, leur intérêts en termes de sécurité du trafic, de consommation de carburant et d'émission de polluants doit accélérer leur introduction dans le marché.

2 Objectifs et contributions

Il faut noter que le système de pilotage automatiques a été déjà évalué au niveau du véhicule seul (local) et les résultats ont montré une amélioration potentielle au niveau de la sécurité, de la consommation en carburant et des émissions de polluants. Jusqu'à présent, l'apport des véhicules automatisés en termes de sécurité globale (au niveau du trafic), consommation de carburant et émissions de polluants n'a pas retenu beaucoup d'attention. Pourtant, ces véhicules sont censés réduire le nombre de collisions, leur sévérité et remplacer la conduite manuelle pour diminuer les fautes dues au conducteur.

L'objectif principal de cette thèse est donc l'évaluation de l'impact des véhicules automatisés sur la sécurité dans un trafic mixte (cohabitation de véhicules à conduite manuelle et automatisée), la consommation en carburant et les émissions de polluants d'un point de vue global. Nos sources de motivations et les nouveautés que nous voulons apporter dans le cadre de cette thèse sont les suivants :

1. Actuellement, la grande majorité des travaux présentés dans la littérature qui portent sur l'étude de la sécurité du conducteur, sont fondés sur une approche locale. En effet, l'évaluation de la sécurité, de la consommation en carburant ou des émissions de polluants, sont réalisés en considérant le véhicule seul. Une extension de ces études peut être menée en étudiant la sécurité totale du trafic. Plus précisément, il est intéressant d'étudier l'impact sur les trois points énoncés précédemment, d'un trafic mixte composé de voitures conduites manuellement et de voitures automatisés. Les paramètres en jeu seront évalués du point de vue global et pour une section définie du trafic.
2. L'évaluation de la sécurité globale dans un environnement de simulation, nécessite des scénarios et des indicateurs pertinents. Ces scénarios peuvent être classés selon deux cas : avec collisions et sans collision.

Dans le premier cas, un simple indicateur comme le nombre de collisions peut donner un premier indice sur la sécurité. Mais, pour évaluer le risque d'un évènement, l'estimation

de la sévérité ou la gravité de celle-ci est indispensable. Partant de ce constat, la quantification de la sévérité a fait l'objet de la synthèse d'un indicateur de sécurité dans le cas des scénarios avec collisions.

La quantification de la sécurité dans le cas d'un scénario sans collision nécessite le choix d'un critère bien fondé. En effet, c'est à partir de cet indicateur que le conducteur sera alerté de son état de conduite. Dans la littérature, la plupart des travaux ont été menés sur la base du critère Time To Collision (TTC) critique. La pertinence d'un tel choix peut être discutable si l'on considère la diversité de valeurs prises pour le critère TTC critique. Nous avons alors proposé un indicateur qui permet de remplacer ce paramètre et de donner plus de pertinence à l'évaluation de la sécurité locale du véhicule. Cette dernière a, ensuite, permis la synthèse d'un indicateur plus générique de sécurité globale du trafic.

3. Les simulateurs de trafic commercialisés possèdent les inconvénients suivants :
- La difficulté de simuler un trafic mixte caractérisé par la coexistence de deux styles de conduite : automatisé et manuel.
 - La gestion de collision qui n'est pas prise en compte.

Puisque l'objectif principal de cette thèse est l'évaluation de la sécurité dans un trafic mixte, nous avons été amenés à développer un simulateur de trafic mixte qui intègre les modèles suivants :

- Un modèle identifié d'un conducteur,
- Un modèle de véhicule automatisé,
- Un modèle de changement de voie,
- Un modèle de gestion des collisions à travers la formation des agglomérats,

Ce simulateur a été développé avec le langage C et la bibliothèque OpenGL. Différentes architectures routières ont été conçues comme, par exemple, le goulot d'étranglement afin d'étudier le trafic du point de vue macroscopique.

4. La modélisation macroscopique de premier ordre du trafic a fait l'objet de différents travaux dans la littérature. Les modèles en jeu permettent d'avoir une relation entre la vitesse moyenne du trafic et sa densité. La diversité de ces modèles et leurs incapacités à prédire toutes les situations du trafic (e.g. trafic libre ou congestionné) a fait l'objet d'une nouvelle méthode de synthèse d'un modèle macroscopique. Ce modèle est caractérisé essentiellement par sa généralité. En effet, la fixation de quelques paramètres permet d'avoir trois modèles existant dans la littérature et qui correspondent à la prédiction des caractéristiques macroscopiques pour des situations spécifiques du trafic.
5. À travers le modèle de véhicule automatisé, un modèle matriciel de trafic a été synthétisé. Ce modèle donne la possibilité de gérer le trafic routier à travers un paramètre de contact. Ceci permet de diminuer la congestion dans le trafic en terme de formation de file d'attente.

3 Organisation de la mémoire

Ce manuscrit est organisé suivant la démarche utilisée pour atteindre les objectifs fixés. Il commence par définir le contexte de notre travail, les objectifs et les motivations de cette thèse dans le chapitre intitulé « Introduction générale ».

Ensuite, le premier chapitre intitulé « Modèles pour le trafic mixte » présente, dans sa première section, un état-de-l'art des modèles microscopiques et macroscopiques du trafic. Deux modèles microscopiques longitudinaux sont choisis pour caractériser respectivement le comportement de

conduite en file du véhicule automatisé et celui régi par l'action du conducteur. Un troisième modèle latéral est développé afin de gérer les changements de voies. Ces trois modèles définissent la base pour le développement de notre simulateur de trafic mixte. Dans la même section, le modèle matriciel, fondé sur le modèle microscopique du véhicule automatisé, est synthétisé.

La troisième section traite le trafic du point de vue macroscopique et présente le nouveau modèle développé « modèle vitesse - densité ». Ce modèle fait l'objet d'une étude de sensibilité des paramètres macroscopiques par rapport aux paramètres microscopiques. Cette étude donne la possibilité d'identifier les paramètres microscopiques.

Pour analyser la sécurité dans un trafic mixte, le scénario freeze est présenté dans le deuxième chapitre avec ses indicateurs de sécurité basés sur le nombre de collision et la sévérité. Pour un scénario sans collision, deux nouveaux indicateurs de sécurité sont synthétisés. Ce chapitre fait aussi l'objet du choix des modèles de consommation en carburant et des émissions de polluants comme le CO_2 , le HC et le CO .

Le troisième chapitre intitulé « Outils de simulation et résultats » commence, en premier lieu, par la présentation de l'architecture du simulateur de trafic mixte développé au laboratoire MIPS. En deuxième lieu et à travers les indicateurs présentés dans le deuxième chapitre, les résultats concernant l'impact des véhicules automatisés sur la sécurité dans le trafic sont analysés. Parmi ces résultats, ceux relatifs aux scénarios freeze, profil de vitesse et goulot d'étranglement en terme de nombre de collisions, de sévérité, de consommation en carburant et d'émissions de polluant.

Le chapitre « Conclusions générales et perspectives » permet de faire le bilan sur les travaux présentés et donne des perspectives permettant de les améliorer.

Chapitre 1

Modèles pour le trafic mixte

Sommaire

1.1	Introduction	23
1.2	Modèles microscopiques longitudinaux	25
1.2.1	Introduction	25
1.2.2	Modèles de « conducteurs »	26
1.2.3	Modèles de véhicules automatisés	33
1.2.4	Conclusions	39
1.3	Modèles microscopiques latéraux	39
1.3.1	Introduction	39
1.3.2	État-de-l'art des modèles de changement de voie	40
1.3.3	Synthèse du modèle matriciel du trafic	44
1.3.4	Conclusions	55
1.4	Modèle macroscopique pour le trafic	55
1.4.1	Introduction et contexte d'études	56
1.4.2	État-de-l'art des modèles vitesse-densité	57
1.4.3	Du microscopique au macroscopique	63
1.4.4	Méthode de synthèse du modèle vitesse-densité	67
1.4.5	Synthèse du modèle générique vitesse-densité	72
1.4.6	Conclusions	74
1.5	Conclusions	75

1.1 Introduction

La simulation du trafic reçoit une attention croissante de la part des chercheurs dans le domaine du transport. De nombreux problèmes, telles que la congestion et la gestion des priorités d'un carrefour, ne peuvent pas être résolus par les outils traditionnels d'analyse, en raison de leur complexité. Les simulateurs de trafic permettent l'étude de l'ensemble du système routier et l'évaluation des différentes alternatives de gestion du trafic afin de déterminer des solutions optimales pour différents scénarios qui peuvent se produire dans un trafic.

En général, il existe trois grandes approches pour décrire et évaluer les phénomènes d'un trafic en l'occurrence, macroscopique, microscopique et mésoscopique.

Avec l'approche macroscopique, le trafic est considéré comme un groupe de véhicules. Dans ce cas, les paramètres mis en jeu sont la densité (ou concentration), la vitesse et la capacité (ou le débit) du trafic. Ces paramètres peuvent caractériser les trois états d'un trafic ainsi que son diagramme fondamental, dont la figure 1.1 en présente un exemple. Dans cette figure, le trafic libre est qualifié par sa faible densité (zone verte). Dans cette zone, une augmentation de la densité se traduit par une augmentation de la capacité. Un trafic congestionné est caractérisé par sa densité élevée (zone rouge). Dans cette zone, une augmentation de la densité du trafic est accompagnée par une diminution de la capacité. La majorité des travaux dans la littérature définissent deux zones du trafic alors que [Kerner, 1998] a introduit une troisième zone caractérisée par une densité moyenne et une capacité maximale (appelé aussi critique) du trafic (zone rouge). Il l'a qualifié par un trafic synchronisé.

Partant de cette approche, plusieurs travaux ont été réalisés parmi lesquels ceux de [Holden and Risebro, 1995], [Herty and Klar, 2003], [Coclite et al., 2004], [Treiber et al., 2004], [Bede and Peter, 2011] et [Peter, 2012].

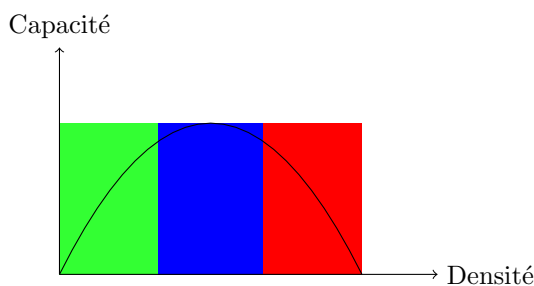


FIGURE 1.1 – Diagramme fondamental d'un trafic selon [Kerner, 1998]

Dans l'approche microscopique, le trafic est considéré comme un système de particules (ou véhicules) en interaction dont chacune est gérée par un modèle. À titre d'exemple, les paramètres mis en jeu dans cette approche sont la vitesse, l'interdistance ou la densité de chaque véhicule. Deux types de modèle sont considérés : le modèle longitudinal et le modèle latéral.

- Le modèle microscopique longitudinal est utilisé pour décrire le mouvement du véhicule seul ou pour représenter son comportement de poursuite d'un autre véhicule. À ce stade, ces modèles se divisent selon deux types : le modèle « conducteur » et le modèle de véhicule automatisé ou semi-automatisé. [Bando et al., 1998] et [Ge et al., 2008] se sont intéressés à la modélisation longitudinale du conducteur, alors que celle du véhicule automatisé a intéressé [Helbing and Tilch, 1998], [Treiber et al., 2004], [Molina, 2005], [Kesting, 2008] et [Rakha and Gao, 2008].
- Le modèle latéral est utilisé pour gérer le changement de voie des véhicules dans un trafic à deux ou plusieurs voies. Ce modèle intègre en général deux étapes : prise de décision et action de changement de voie. Deux approches pour l'action de changement de voie existent dans littérature. La première consiste à faire des sauts entre les voies comme dans les travaux de [Kesting, 2008]. Dans ce cas, le changement de voie se fait d'une manière discrète. Dans la deuxième approche, le véhicule suit une trajectoire bien déterminée, définie par exemple par une spline, pour changer de voie. Dans ce cas, le changement de voie se fait d'une manière continue. Ce type de changement de voie existe dans la plupart

des simulateurs de trafic (AIMSUN¹, etc.). [Venglar et al., 2002] et [Krol, 2009], se sont focalisés sur la précision des modèles et l’optimisation du changement de voie.

La modélisation mésoscopique du trafic apparaît comme une approche intermédiaire entre les deux précédentes. Ici, le trafic est considéré comme un ensemble de groupes de véhicules. Selon [Gorkem, 2013], deux stratégies se distinguent de cette approche. La première consiste à combiner le comportement microscopique d’un véhicule avec les règles macroscopiques comportementales. Cela permet de prendre en considération l’hétérogénéité des différents conducteurs. La deuxième stratégie consiste à spécifier les comportements d’un groupe hétérogène de véhicules. Plusieurs travaux sont développés avec cette approche à savoir ceux faits par [Prigogine and Herman, 1971], [Paveri-Fontana, 1975], [Mahnke and Kaupuzs, 1999], [Hoogendoorn and Bovy, 2001] et [Leclerc and Becarie, 2012].

Les simulateurs de trafic permettent d’étudier les modèles issus de ces approches et de développer des solutions à des problèmes existants ou futurs, liés au transport. À notre connaissance, l’étude du trafic mixte, caractérisé par la coexistence de deux styles de conduite en l’occurrence manuel et automatisé, n’a pas encore suscité un grand intérêt de la part des spécialistes du domaine. Cette absence pourrait être due au retard de l’introduction du véhicule totalement automatisé dans le marché.

Ce chapitre décrit en détail toutes les approches citées précédemment en présentant les modèles significatifs correspondant à la conduite longitudinale microscopique humaine et automatisée ainsi que le changement de voie (latéral). De plus, il introduit un nouveau modèle macroscopique du trafic pour analyser les différentes situations de trafic qui seront étudiées ici. La deuxième section présente tout d’abord un état-de-l’art des modèles microscopiques d’un conducteur, puis un état-de-l’art des modèles du véhicule automatisé. Le modèle de conducteur Two Velocity Difference Model (TVDM) et de véhicule automatisé Intelligent Driver Model (IDM) ont été choisis en se basant sur des critères relatifs à notre contexte de travail. Ces modèles seront, ensuite, intégrés dans notre simulateur de trafic mixte.

Dans la première partie de la troisième section, un état-de-l’art des modèles microscopiques latéraux est présentée. Le modèle de [Kesting, 2008] a été choisi pour la gestion du changement de voie dans le simulateur. Dans la deuxième partie, une nouvelle représentation du trafic est introduite. Son objectif est l’étude des interactions microscopiques entre les véhicules, dans un trafic à deux voies. Ce modèle offre l’avantage de pouvoir gérer microscopiquement le trafic pour agir sur les paramètres mésoscopiques et macroscopiques.

Dans la quatrième section, un état-de-l’art des modèles macroscopiques « vitesse-densité » est présenté. À partir de l’identification de ces modèles, avec des données issues de la simulation microscopique du modèle IDM, une nouvelle méthode de synthèse d’un nouveau modèle « vitesse-densité » est proposée.

La cinquième section conclue ce chapitre.

1.2 Modèles microscopiques longitudinaux

1.2.1 Introduction

Les modèles microscopiques longitudinaux permettent non seulement de gérer la poursuite d’un véhicule sur un autre, mais aussi de décrire, d’analyser et d’évaluer plusieurs caractéristiques du trafic comme la congestion. Ces modèles se divisent, selon le style de conduite, en deux

1. AIMSUN est un logiciel de simulation de trafic routier développé par la société TSS (Transport Simulation Systems).

classes : la conduite manuelle et la conduite automatisée. Rappelons qu'un trafic mixte désigne la coexistence de ces deux styles de conduite qui correspondent aux modèles « conducteur » et « véhicule automatisé ».

Cette section présente, en premier lieu, un état-de-l'art des modèles « conducteur » ainsi que le modèle retenu pour représenter son comportement de conduite longitudinale dans un contexte de conduite en file. En deuxième lieu, un état-de-l'art des modèles longitudinaux de véhicules automatisés est présenté ainsi que le modèle retenu.

En plus des critères de choix fixés pour choisir les modèles, les hypothèses de travail suivantes ont été adoptées dans cette section :

- la dynamique latérale est négligée,
- la route est droite et plane,
- les forces aérodynamiques négligées,
- le roulement sans glissement.

Ces hypothèses sont posées parce que, en premier lieu, nous souhaitons mettre prioritairement l'accent sur la dynamique de l'interdistance (poursuite d'un véhicule). En deuxième lieu, cette section est consacrée à la modélisation longitudinale du véhicule.

1.2.2 Modèles de « conducteurs »

1.2.2.1 Introduction

La modélisation du conducteur est une tâche très complexe vu le nombre important de paramètres mis en jeu. Un modèle « conducteur » dit « complet » doit tenir compte de plusieurs paramètres liés, d'une part, à son comportement avec le véhicule et, d'autre part, à sa réaction par rapport à l'environnement qui l'entoure.

D'après [Panwai and Dia, 2005], le premier modèle « conducteur » remonte à l'année 1958 avec l'apparition du modèle GHR (Ghazis - Hermann - Rothery). L'idée de ce modèle est simple. Il s'agit d'appliquer un retard sur la commande du véhicule suivi dans un contexte de conduite en file. Le modèle GHR a été étudié et amélioré dans plusieurs travaux à savoir [Al-Jameel, 2009]. Puis, d'autres modèles notamment cognitifs ont été publiés. Les principales caractéristiques de ce type de modèle sont la reproduction de l'état mental, la mémoire et la perception du conducteur. Le modèle COSMODRIVE² est l'un des plus utilisés dans la littérature. Pour plus de détails sur ce type de modèle, le lecteur peut se référer à [Boranard, 2012] et [Song et al., 2000]. Parallèlement, des travaux sur la modélisation de la conduite humaine ont été développés, à savoir ceux de [Kometani and Sasaki, 1974] et [Ge et al., 2008]. Cette pluralité de modèles « conducteur » nous amène à fixer des critères de choix de notre modèle de travail dont ils font l'objet du deuxième paragraphe de cette partie. Le troisième paragraphe présente les modèles « conducteurs » longitudinaux apparaissant comme les plus pertinents pour répondre à notre problématique. Le quatrième paragraphe synthétise et présente le modèle retenu qui sera intégré dans le simulateur de trafic mixte dans le chapitre 3.

1.2.2.2 Contexte d'étude : critères de choix

Les travaux de [Treiber et al., 2006] permettent d'isoler les critères pertinents qui ont guidé notre choix du modèle. D'après eux, un modèle « conducteur » doit contenir au moins un des critères suivants :

2. COgnitive Simulation MOdel of the DRIVER : un projet américain qui a pour but la modélisation cognitive du conducteur.

- **l’anticipation temporelle** : le conducteur prend en compte son temps de réaction dans l’anticipation de la situation du trafic. Dans ce cas, le temps inter-véhiculaire doit être supérieur ou égal à son temps de réaction.
- **l’anticipation spatiale** : le conducteur prend en compte l’état de deux ou plusieurs véhicules en amont en observant leurs situations d’un ou plusieurs véhicules en amont.
- **l’erreur sur l’estimation de l’interdistance et de la vitesse relative** : le conducteur n’estime pas correctement sa vitesse relative ou son interdistance par rapport à un autre véhicule dans la file. Pour cela, le modèle doit contenir un terme d’erreur traduisant cette incertitude. Dans [Kesting, 2008], un processus de Wiener³ a été utilisé pour la modélisation de l’incertitude sur la vitesse relative.

Toutefois, le modèle « conducteur » qui sera retenu, doit répondre aussi à ces deux contraintes :

- **le respect des limites réelles en accélération et décélération d’un véhicule**. Par exemple, dans le cas d’un scénario de freinage d’urgence, la décélération des véhicules suiveurs ne doit pas dépasser les limites réelles en décélération. Dans le cas d’un scénario de démarrage, l’accélération du véhicule ne doit pas dépasser ses limites réelles en accélération. Ce scénario consiste à placer des véhicules en file à l’arrêt avec une certaine interdistance. À un instant donné, ces véhicules commencent à rouler afin d’atteindre une vitesse désirée. Cette situation peut être évoquée à l’attente du feu vert dans un carrefour.
- **le respect des limites de la vitesse de l’onde cinématique** [Ge et al., 2008] (en anglais : Kinematic wave speed). Celle-ci est définie par le quotient de l’interdistance initiale sur le retard du mouvement du véhicule dans un scénario de démarrage.

1.2.2.3 État de l’art des modèles « conducteur »

Cette partie présente les modèles « conducteur » de la littérature apparaissant les plus pertinents. Chaque modèle sera alors comparé avec les autres modèles sur la base des critères fixés dans le paragraphe 1.2.2.2.

Modèle de Gazis, Herman et Rothery (GHR)

Le modèle de Gazis, Herman et Rothery (GHR) est issu des premiers travaux sur la modélisation du conducteur. Sa première formulation a été proposée par le laboratoire de General Motors (GM⁴) en 1958. Son expression est donnée par

$$\ddot{x}_n(t) = m_2 \cdot v_n^{m_1}(t) \cdot \frac{\Delta v_n(t - \tau_n)}{\Delta x_n^{m_3}(t - \tau_n)}, \quad (1.1)$$

où,

- τ_n , le temps de réaction du conducteur n [s],
- $\Delta v_n(t - \tau_n)$, la vitesse relative entre le véhicule n et le $n + 1$ à l’instant $t - \tau_n$ [m.s⁻¹],
- $\Delta x_n(t - \tau_n)$, l’interdistance du véhicule n par rapport à son véhicule meneur $n + 1$ à l’instant $t - \tau_n$ [m],
- m_1 , m_2 et m_3 , des constantes de calibration pour chaque état du véhicule et du trafic.

3. Le processus de Wiener est un processus stochastique à temps continu nommé ainsi en l’honneur de Norbert Wiener.

4. GM (General Motors Corporation ou GM) est un constructeur automobile américain basé à Détroit aux États-Unis

L'inconvénient de ce modèle est que son utilisation demande la calibration des paramètres m_1 , m_2 et m_3 pour chaque situation du véhicule et du trafic. D'où la nécessité de données expérimentales dont nous ne disposons pas. De plus, d'après [Brackstone and McDonald, 2000], les travaux réalisés sur ce modèle présentent des contradictions au niveau des paramètres m_1 , m_2 et m_3 . Le tableau 1.1 résume les différentes valeurs de ces paramètres, proposées dans la littérature. Par exemple, dans le cas où le véhicule est en décélération, la valeur de m_2 prise par [Hoefs, 1997] est largement inférieure à la valeur prise par [Treiterer and Myers, 1974]. En plus, la valeur de m_1 prise par ce dernier dans le cas d'accélération est la même que celle prise par [Hoefs, 1997] dans le cas de décélération. Ces contradictions empêchent l'utilisation de ce modèle dans le cadre du développement de notre simulateur de trafic mixte et, pour cette raison, il n'est pas retenu.

TABLE 1.1 – État de l'art du modèle GHR

Référence	m_1	m_2	m_3	Remarque
[May and Keller, 1967]	1,00	3,00	nc	Paramètres entiers
[May and Keller, 1967]	0,80	2,80	nc	Paramètres non entiers
[Edie, 1960]	1,00	1,00	nc	
[Heyes and Ashworth, 1972]	-0,80	1,20	nc	
[Ceder and May, 1976]	0,60	2,40	nc	
[Treiterer and Myers, 1974]	0,20	1,60	nc	En cas d'accélération
[Treiterer and Myers, 1974]	0,70	2,50	nc	En cas décélération
[Hoefs, 1997]	1,50	0,90	nc	En accélération
[Hoefs, 1997]	0,20	0,90	nc	En cas décélération
[Aron, 1988]	0,65	0,67	2,45	En cas décélération
[Aron, 1988]	0,260	0,50	2,67	En accélération

Modèle de Kometani : Collision Avoidance model

Avec la manipulation des équations newtoniennes du mouvement, le modèle Collision Avoidance a été présenté par [Kometani and Sasaki, 1974]. Son but est de déterminer l'interdistance de sécurité permettant au conducteur d'éviter les collisions lorsque son véhicule meneur freine de façon imprévisible. Cette interdistance minimale est donnée par l'expression

$$\Delta x_n(t - \tau_n) = \alpha v_{n+1}^2(t - \tau_n) + \beta_2 v_n^2(t) + \beta_1 v_n(t) + \beta_0, \quad (1.2)$$

où α et β_2 représentent, respectivement, l'inverse de la capacité maximale de décélération des véhicules $n + 1$ et n . Les constantes de calibration β_0 et β_1 représentent, respectivement, une distance et l'inverse du temps de réaction (la sensibilité du conducteur).

[Gipps, 1981] a utilisé ce modèle dans le simulateur de trafic AIMSUN ([Barceló and Casas, 2002]). L'avantage de ce modèle est la focalisation sur la distance de sécurité qui est un critère très important dans l'étude de la sécurité du trafic. Par contre, son inconvénient réside dans l'absence de la prise en compte du critère de l'anticipation spatiale.

Modèle de Bando : Optimal Velocity Model (OVM)

Le modèle OVM a été proposé par [Bando and Hasebe, 1995]. Avec ce modèle, chaque conducteur dans la file possède une vitesse optimale qui dépend de son interdistance par rapport à son véhicule meneur. Ce modèle est donné par l'expression suivante :

$$\ddot{x}_n = s_e \cdot \{V_n(\Delta x_n) - \dot{x}_n\}, \quad (1.3)$$

où s_e est la sensibilité du conducteur et V_n la fonction qui détermine la vitesse optimale du véhicule n donnée par

$$V_n(\Delta x_n) = \frac{v_n^{max}}{2} \{\tanh(\Delta x_n - d_c) + \tanh(d_c)\}, \quad (1.4)$$

où v_n^{max} est la vitesse maximale du conducteur n et d_c son interdistance critique (longueur du véhicule meneur). Ce modèle ne possède qu'un seul paramètre de calibration qui est la sensibilité du conducteur s_e , ce qui constitue son avantage vis-à-vis du modèle GHR.

Dans la figure 1.2, la courbe de couleur rose représente l'accélération du deuxième véhicule selon le modèle OVM dans une file homogène, pour un scénario de démarrage. Une file est dite homogène si tous les véhicules sont représentés par le même modèle et avec les mêmes paramètres. Selon [Ge et al., 2008], en pratique l'accélération d'un véhicule, dans le cas d'une conduite purement longitudinale, est limitée dans l'intervalle $[-3 \text{ m.s}^{-2}, 4 \text{ m.s}^{-2}]$. D'après la figure 1.2, on remarque que le modèle OVM génère une accélération qui dépasse les limites réelles du véhicule dans un scénario de démarrage. Pour pallier ce problème, une version modifiée est présentée dans le prochain paragraphe.

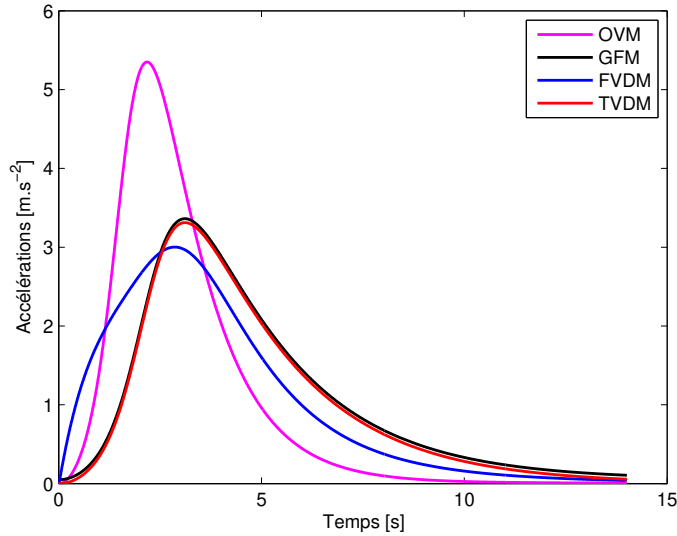


FIGURE 1.2 – Accélérations du premier suiveur suivant les modèles OVM, GFM, FVDM et TVDM

Modèle de Helbing : Generalized Force Model (GFM)

Le modèle GFM a été développé par [Helbing and Tilch, 1998]. Il est décrit par l'expression suivante :

$$\ddot{x}_n = s_e \cdot \{V_n(\Delta x_n) - \dot{x}_n\} + \lambda \cdot \theta(-\Delta v_n) \Delta v_n, \quad (1.5)$$

avec θ la fonction échelon, λ un coefficient de sensibilité et V_n la fonction de la vitesse optimale donnée par

$$V_n(\Delta x_n) = V1 + V2 \tanh[C1(\Delta x_n - l_{n+1}) - C2]. \quad (1.6)$$

Pour établir ce modèle, [Helbing and Tilch, 1998] ont procédé à une étape de calibration en utilisant des données expérimentales de la société Bosch⁵, obtenues en ville. La vitesse maximale autorisée était de 50 km.h⁻¹. Les paramètres obtenus de la fonction V_n sont donnés par le tableau 1.2.

TABLE 1.2 – Paramètres du modèle GFM

Paramètre	valeur	unité
V1	6,75	m.s ⁻¹
V2	7,91	m.s ⁻¹
C1	0,13	m ⁻¹
C2	1,57	-

L'avantage du modèle GFM, vis à vis du modèle OVM, est le respect de la capacité réelle en accélération dans le scénario de démarrage comme le montre la figure 1.2. Aussi, d'après [Helbing and Tilch, 1998], ce modèle respecte également la capacité réelle de décélération dans un scénario de freinage d'urgence.

En appliquant le scénario de démarrage à des véhicules placés en file, le retard du mouvement δt introduit par chaque véhicule est égal à 2,20 s. Par conséquent, la vitesse de l'onde cinématique, K_{ws} , est égal à 3,40 m.s⁻¹ puisque les interdistances initiales des véhicules sont de 7,3 m.

Mais, selon [Jiang et al., 2001], le K_{ws} varie entre 4,70 m.s⁻¹ et 6,40 m.s⁻¹. Ainsi, la valeur de K_{ws} reste en dehors de cet intervalle. Pour cette raison, le modèle Full Velocity Difference Model (FVDM), présenté dans le paragraphe suivant, a été introduit.

Modèle de Jiang : Full Velocity Difference Model (FVDM)

Ce modèle est développé par [Jiang et al., 2001] et son expression est la suivante :

$$\ddot{x}_n = s_e \cdot \{V_n(\Delta x_n) - \dot{x}_n\} + \lambda \Delta v_n, \quad (1.7)$$

où V_n est donnée par l'équation (1.6).

Avec le modèle FVDM, le K_{ws} demeure dans l'intervalle [4,70 m.s⁻¹, 6,40 m.s⁻¹] puisque δt est égale à 1.60 s. Notons que ce retard est plus petit que celui introduit par le modèle GFM.

Cependant, d'après [Ge et al., 2008], dans un scénario de freinage d'urgence, le véhicule dépasse ses limites réelles en décélération. Pour cette raison, ils ont modifié ce modèle pour aboutir à la formulation TVDM décrite ci-après..

Modèle de Ge : Two Velocity Difference Model (TVDM)

5. Bosch est une entreprise allemande fondée par Robert Bosh en 1886. Ses principales activités sont liées à l'industrie de l'automobile, les appareils électroménager et la sécurité des bâtiments.

Le modèle de [Ge et al., 2008] est donné par

$$\dot{x}_n = s_e \cdot \{V_n(\Delta x_n) - \dot{x}_n\} + \lambda \cdot G(\Delta v_n, \Delta v_{n+1}), \quad (1.8)$$

où V_n est donnée par l'équation (1.6) et

$$G(\Delta v_n, \Delta v_{n+1}) = p \Delta v_n + (1 - p) \Delta v_{n+1}. \quad (1.9)$$

Selon Ge [Ge et al., 2008], p est fixé à 0,86.

La figure 1.3 montre les vitesses des véhicules d'une file, obtenues avec le modèle TVDM dans un scénario de démarrage. L'accélération du deuxième véhicule dans la file est représentée avec la courbe de couleur rouge dans la figure 1.2. Cette accélération rentre aussi dans l'intervalle $[-3 \text{ m.s}^{-2}, 4 \text{ m.s}^{-2}]$ fixé précédemment.

Ainsi, le modèle TVDM possède plusieurs avantages :

- il intègre le critère « anticipation spatiale » grâce à la fonction $G(\Delta v_n, \Delta v_{n+1})$ qui dépend de Δv_{n+1} , la vitesse relative du véhicule prédécesseur par rapport à son meneur,
- il intègre le critère « anticipation temporelle » grâce à δt , égal à 1,50 s, plus grand que le temps de réaction du conducteur qui est d'une seconde. Rappelons que le retard δt est calculé à partir de la simulation d'une file de véhicules représentés par le modèle TVDM,
- l'onde cinématique se trouve dans l'intervalle de variation fixé par [Jiang et al., 2001] grâce à la valeur de δt obtenue (1,50 s),
- le respect des limites réelles du véhicule en accélération dans un scénario de démarrage,
- le respect des limites réelles du véhicule en décélération dans un scénario de freinage d'urgence [Ge et al., 2008].

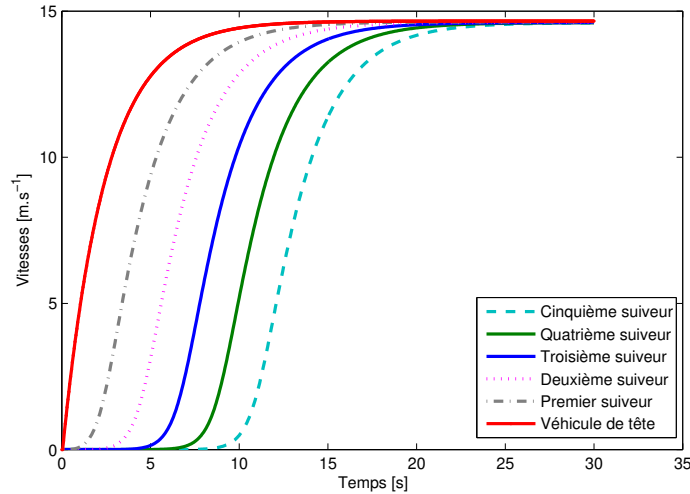


FIGURE 1.3 – Vitesses des véhicules en utilisant le modèle TVDM

Le paragraphe suivant synthétise les modèles présentés dans cette section afin de sélectionner le modèle « conducteur » adéquat pour notre problématique.

1.2.2.4 Synthèse et modèle retenu

Le tableau 1.3 donne les paramètres s_e et λ des modèles OVM, GFM, FVDM et TVDM.

TABLE 1.3 – Paramètres des modèles conducteurs

Modèle	OVM	GFM	FVDM	TVDM
s_e (s^{-1})	0,41	0,41	0,41	0,41
λ (s^{-1})	0,00	0,50	0,50	0,50

TABLE 1.4 – Partie 1 du tableau de comparaison

Modèles	GHR	Kometani	OVM
δt [s]	1,0	1,0	1,6
Anticipation temporelle	oui	oui	implicite
Anticipation spatiale	non	non	non
Erreur sur l'estimation	non	non	non
Respect des limites réelles du véhicule	oui	oui	non
Respect des limites de l'onde cinématique	oui	oui	oui

TABLE 1.5 – Partie 2 du tableau de comparaison

Modèles	GFM	FVDM	TVDM
δt [s]	2,2	1,4	1,5
Anticipation temporelle	implicite	implicite	implicite
Anticipation spatiale	non	non	oui
Erreur sur l'estimation	non	non	non
Respect des limites réelles du véhicule	oui	non	oui
Respect des limites de l'onde cinématique	non	oui	oui

Les tableaux 1.4 (partie 1) et 1.5 (partie 2) comparent les différents modèles « conducteur » cités dans les paragraphes précédents. Dans ces deux tableaux, le mot *implicite* signifie que le temps d'anticipation est déduit à partir de la simulation de chaque modèle à travers le paramètre δt (retard au démarrage du véhicule).

À titre de rappel, ces critères sont l'anticipation spatiale, l'anticipation temporelle, l'erreur sur l'estimation de l'interdistance et de la vitesse relative, le respect des limites réelles du véhicule en accélération et en décélération et le respect des limites réelles de l'onde de choc dans un scénario de démarrage. Hormis le critère de l'erreur sur l'estimation, le modèle TVDM répond à tous les autres critères. Par conséquent, ce modèle est retenu pour représenter la conduite humaine (ou manuelle) et sera intégré dans notre simulateur de trafic mixte.

1.2.2.5 Conclusions

Dans cette sous-section, le modèle Two Velocity Difference Model (TVDM) a été retenu à partir des critères que nous estimons nécessaires et suffisants pour la représentation du comportement du conducteur et dans l'étude de la sécurité du trafic. Toutefois, il est à souligner que ce modèle présente des limites à savoir la déconsidération de l'état psychique du conducteur, son âge et son sexe. Pour plus de détails sur ces derniers aspects, le lecteur peut se référer à [Mehmood and Easa, 2009] et [Bernet, 2012].

1.2.3 Modèles de véhicules automatisés

1.2.3.1 Introduction

L'évolution rapide des technologies couplée à une concurrence accrue entre les constructeurs automobiles permet, aujourd'hui, d'imager la commercialisation de véhicules complètement autonomes vers 2020-2030. Ce qui était encore impensable il y a quelques années. Par exemple, le constructeur allemand BMW⁶ envisage de commercialiser sa nouvelle BMW i3 totalement autonome en freinage et en accélération pour des vitesses inférieures à 40 km.h⁻¹ en 2014 [Voelcker, 2011]. Le constructeur japonais Nissan⁷ prévoit, lui, en 2015 une fonction complètement automatisée de placement du véhicule sur un parking après que le conducteur abandonne son véhicule [Stevens, 2012]. En 2020, les constructeurs BMW, Audi⁸, Nissan et General Motors (GM) imaginent à un véhicule sans conducteur [Yvkoff, 2011].

Aujourd'hui cependant, la législation de la circulation de ce type de véhicule reste restreinte. Jusqu'à présent, ces véhicules sont autorisés à circuler seulement aux États Unis dans le territoire du Nevada depuis 2011, en Floride depuis avril 2012 et en Californie depuis septembre 2012. En attendant la mondialisation de cette autorisation, l'automatisation du freinage et de l'accélération reste une solution technique partielle de l'automatisation totale du véhicule, via le système ACC⁹. Dans un cadre de conduite en file, cette solution construit une automatisation totale du véhicule du moment que le mouvement latéral est négligé.

Avec l'objectif de représenter le comportement longitudinal d'un véhicule automatisé, la diversité des modèles utilisés par les différents constructeurs de l'automobile, et de leurs techniques de synthèse, nous amène à fixer des critères de choix pour notre étude. Ainsi les différents modèles significatifs (ACC) de la littérature sont présentés dans le deuxième paragraphe de cette section. Un état-de-l'art des modèles ACC est présenté dans le troisième paragraphe pour comparaison. Relativement aux critères définis, un modèle ACC est retenu pour la modélisation du

6. Bayerische Motoren Werke (BMW) : un constructeur allemand basé à Munich (en Bavière) en Allemagne.

7. Nissan est un constructeur automobile Japonais basé à Yokohama au Japon

8. Audi est un constructeur automobile allemand, une filiale du Volkswagen AG

9. ACC est un acronyme de Adaptive Cruise Control. Dans d'autres références, cet acronyme peut signifier Automatic or Advanced Cruise Control. Ces systèmes peuvent être aussi nommés Intelligent Cruise Control (ICC) ou Intelligent Adaptive Cruise Control (IACC) systems

comportement longitudinal du véhicule automatisé dans le quatrième paragraphe. Ce modèle sera implémenté dans notre simulateur de trafic mixte présenté dans le chapitre 3.

1.2.3.2 Contexte d'étude : critères de choix

La modélisation du véhicule automatisé reste un sujet difficile à accomplir vu la complexité de la tâche et le nombre de paramètres et d'états mis en jeu. Toutefois, pour un cahier des charges spécifique et bien défini, un modèle peut répondre aux exigences fixées. Dans notre cas, les critères de choix d'un modèle sont :

- la facilité de son implémentation à l'égard de la complexité de programmation et le temps de calcul mis en jeu,
- la disponibilité et l'intuitivité de ses paramètres. En effet, un modèle à paramètres représentatifs de point de vue physique (accélération et décélération, interdistance ou temps en amont), permet de mieux étudier et comprendre les phénomènes et les problèmes dans un trafic.

Ces deux critères construisent la base de notre recherche du modèle ACC adéquat pour l'étude de l'impact des véhicules automatisés sur la sécurité du conducteur dans un trafic mixte.

1.2.3.3 État-de-l'art des modèles de véhicules automatisés

La modélisation du véhicule automatisé est relativement récente. Plusieurs modèles ont été publiés par les constructeurs automobiles, comme celui de [Ioannou and Chen, 1993], ou par les laboratoires de recherche comme le modèle de [Germann and Isermann, 1995].

Cette partie présente les modèles ACC issus de la littérature qui nous apparaissent les plus pertinents pour représenter le comportement longitudinal du véhicule automatisé.

Modèle de Ioannou

[Ioannou and Chen, 1993] ont présenté un modèle ACC actuellement utilisé par le constructeur automobile américain Ford¹⁰. La formulation de ce modèle est basée sur la modélisation de la dynamique du véhicule. Son expression est donnée par

$$a_n = L(v_n, a_n) + \alpha(v_n)u_n \quad (1.10)$$

où

$$\alpha(v_n) = \frac{1}{m_n \tau v_n} \quad (1.11)$$

$$L(v_n, a_n) = -2 \frac{k_{d_n}}{m_n} v_n a_n - \frac{1}{\tau v_n} \left[a_n + \frac{k_{d_n}}{m_n} v_n^2 + \frac{d_{m_n}(v_n)}{m_n} \right] \quad (1.12)$$

avec

- m_n , la masse du véhicule n [kg],
- τ , la constante de temps du moteur [s],
- u_n , entrée du moteur du véhicule n (l'angle de papillon),
- k_{d_n} , le coefficient aérodynamique du véhicule n ,

¹⁰. Ford (officiellement Ford Motor Company) est un constructeur automobile américain basé à Detroit à Michigan. Cette compagnie a été fondée par Henry Ford en 1903.

- $d_{m_n}(v_n)$, le coefficient mécanique du véhicule n . À l'arrêt, le véhicule doit fournir une poussée pour démarrer et surmonter les forces de trainés. Le coefficient mécanique est dû à tous les mécanismes de déplacement dans le véhicule qui ont des pertes par frottement et plus particulièrement les roulements de roues. En effet, ce coefficient est dû à l'action des pneus sur la chaussée. Ce coefficient est nul lorsque le véhicule est à l'arrêt.

La loi de contrôle donnée par la sortie du moteur est mise sous la forme suivante :

$$u_n = \frac{1}{\alpha(v_n)} [c_n - L(v_n, a_n)], \quad (1.13)$$

où

$$c_n = C_p \delta_n(t) + C_u \dot{\delta}_n(t) + K_a a_n(t) \quad (1.14)$$

et

$$\delta_n(t) = x_{n+1}(t) - x_n(t) - (l_n S_{0n} + \lambda_2 v_n(t)) \quad (1.15)$$

$$\dot{\delta}_n(t) = v_{n+1}(t) - v_n(t) - \lambda_2 v_n(t) \quad (1.16)$$

avec S_{0n} l'interdistance initiale, $\delta_n(t)$ l'erreur par rapport à l'interdistance désirée et C_p , C_u , K_v et K_a sont des constantes à identifier.

L'inconvénient de ce modèle est la nécessité d'une étape de calibration et le grand nombre de paramètres.

Modèle de Germann

[Germann and Isermann, 1995] ont présenté un modèle ACC basé sur les réseaux de neurones et la logique floue. La structure de ce modèle est composée de trois couches. La première couche linéarise la dynamique du véhicule. La deuxième couche consiste à synthétiser une loi de commande en accélération avec des techniques classiques. La troisième couche forme un contrôleur flou basé sur la description linguistique des données de confort. La structure globale de ce contrôleur est donnée par la figure 1.4.

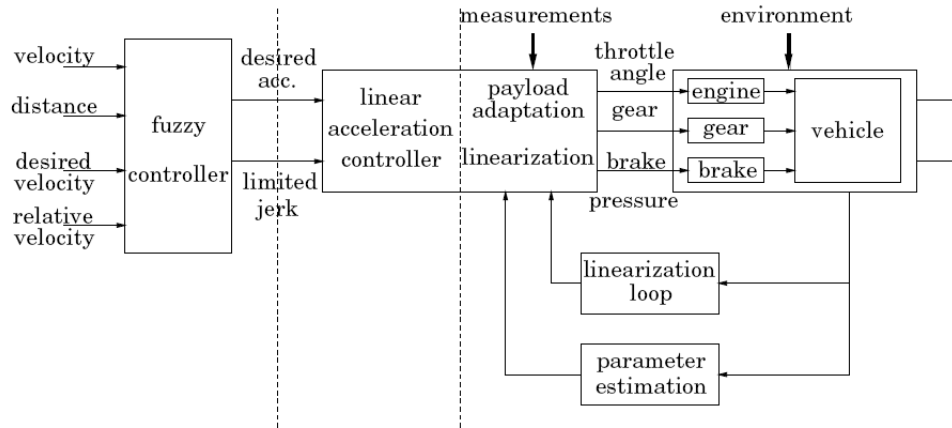


FIGURE 1.4 – Modèle ACC de [Germann and Isermann, 1995]

L'inconvénient majeur de ce modèle est la complexité de l'implémentation dans un simulateur où l'objectif est l'étude de la sécurité dans un trafic mixte.

Modèle de Molina

Plus récemment, [Molina, 2005] a développé un modèle pour la commande longitudinale par analogie avec la théorie de l'élasticité et de la mécanique des contacts.

Sur ce schéma, le véhicule de tête est représenté avec la coordonnée longitudinale x_2 . Le véhicule de référence est situé à une distance s du meneur et repéré par la coordonnée x_1^r . L'accélération du véhicule de référence et celle du meneur sont respectivement dénotées par u et w .

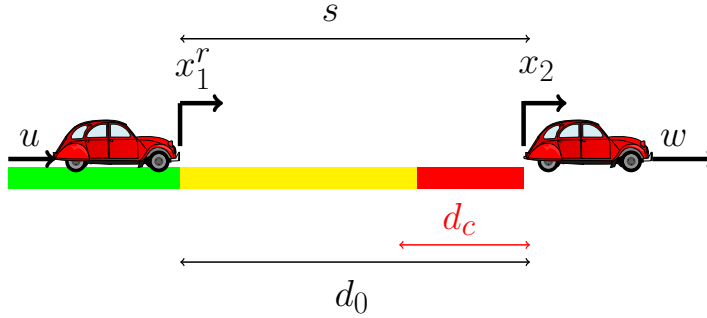


FIGURE 1.5 – Modélisation longitudinale d'un véhicule automatisé selon [Molina, 2005]

La figure 1.5 montre trois zones importantes :

- La zone verte $s > d_0$. L'interdistance s est plus grande que l'interdistance nominale de sécurité d_0 (d_0 est un paramètre de conception). C'est une région de conduite sûre.
- La zone jaune $d_0 \geq s > d_c$ où $d_0 - d_c$ correspond à l'interdistance nécessaire pour éviter une collision dans le cas d'un freinage infini du véhicule meneur.
- La zone rouge $s \leq d_c$ où d_c correspond à l'interdistance minimale imposée.

En définissant la dynamique du véhicule de référence comme :

$$\ddot{x}_1^r = u,$$

la dynamique de l'interdistance $s = x_2 - x_1^r$ peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\ddot{s} = \ddot{x}_2 - u.$$

L'erreur de l'interdistance est défini comme suit :

$$\tilde{d} = d_0 - s.$$

Ainsi, la dynamique de l'erreur prend la forme suivante :

$$\ddot{\tilde{d}} = u - \ddot{x}_2.$$

À ce stade, le problème revient alors à trouver une structure appropriée de la commande u telle que toutes les équations de la dynamique de l'erreur, pour un ensemble donné de conditions initiales (au moment où la zone orange est pénétrée), soient conformes aux contraintes de sécurité suivantes :

- action d'éviter la collision : $s \geq d_c$
- vitesse maximale : $\dot{x}_1^r \leq V_{max}$
- capacité de freinage maximale : $\ddot{x}_1^r \geq -B_{max}$

La commande utilisée par [Molina, 2005] est donnée par :

$$u_2 = -c \left| \tilde{d} \right|^\mu \tilde{d}, \quad \forall \tilde{d} \geq 0$$

La dynamique de l'erreur devient alors,

$$\ddot{\tilde{d}} = -c \left| \tilde{d} \right|^\mu \tilde{d} - \dot{x}_2,$$

où μ exprime la topologie de la surface de contact. La viscosité c est donnée par :

$$c = \frac{27B_{max}^2}{8V_{max}^3}$$

pour

$$d_0 \geq \sqrt{\frac{16}{27} \frac{V_{max}^2}{B_{max}}} + d_c$$

Il est à noter que cette équation permet d'avoir aussi une relation entre la vitesse du véhicule et l'interdistance de sécurité pour une capacité maximale de freinage donnée. Ainsi, avec le choix de ces paramètres, le modèle fournit une interdistance s qui permet d'éviter les collisions (entre suiveur et meneur) en respectant la capacité de freinage maximale selon [Molina, 2005].

Cette caractéristique est à la fois un avantage et un inconvénient de ce modèle. En effet, l'avantage se manifeste dans la prise en compte de la distance de sécurité qui est un paramètre important dans l'évaluation de la sécurité du conducteur dans un trafic. En contre partie, une valeur très grande de d_0 peut engendrer une densité de trafic très faible. Par conséquent, les collisions n'auront plus lieu mais l'évaluation de la sécurité ne sera pas pertinente. En outre, cette analogie avec la théorie de l'élasticité et de la mécanique des contacts peut engendrer des phénomènes non interprétables pour le trafic.

Modèle de Treiber : Intelligent Driver Model (IDM)

Le modèle Intelligent Driver Model (IDM) est un Adaptive Cruise Control (ACC) destiné à ajuster la vitesse désirée et le temps de sécurité en amont fixés par le conducteur (avant le démarrage du véhicule automatisé). Ce modèle ACC est présenté par [Treiber and Helbing, 2002] sous la forme suivante :

$$\dot{v}_n = a_n \cdot \left(1 - \left(\frac{v_n}{v_n^0} \right)^4 - \left(\frac{s^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n} \right)^2 \right), \quad (1.17)$$

avec a_n l'accélération maximale du véhicule n [m.s^{-2}], v_n la vitesse du véhicule n [m.s^{-1}], v_n^0 la vitesse désirée du véhicule n [m.s^{-1}], Δv_n la vitesse relative du véhicule n par rapport à son meneur $n + 1$ [m.s^{-1}], s_n l'interdistance nette [m] définie par

$$s_n = \Delta x_n - l_{n+1}, \quad (1.18)$$

et s_n^* l'interdistance optimale nette du véhicule n donnée par

$$s^*(v_n, \Delta v_n) = s_n^0 + T_n \cdot v_n - \frac{v_n \Delta v_n}{2\sqrt{a_n b_n}}, \quad (1.19)$$

avec, b_n la décélération désirée du véhicule n [m.s^{-2}], s_n^0 l'interdistance minimale à l'arrêt du véhicule n avec son meneur $n + 1$ [m] et T_n le temps de sécurité en amont du véhicule n [s].

Pour un temps T_n fixé le terme $v_n \cdot T_n$ représente l'interdistance entre le véhicule n . Le terme $\frac{v_n \Delta v_n}{2\sqrt{a_n b_n}}$ est nul lorsque le trafic est stationnaire ($\Delta v_n = 0$). Ainsi, ce terme demeure important lorsque le trafic est non stationnaire. Son rôle est la stabilisation de la file à une vitesse désirée si elle peut être atteinte ou à une vitesse inférieure sinon. Toutefois, ce modèle garantit en priorité le temps de sécurité en amont fixé au démarrage.

Le tableau 1.6 présente les paramètres du modèle IDM donnés par [Kesting et al., 2008] après les phases de test et de calibration. En utilisant les écarts types mentionnés dans la même référence de ses paramètres, la figure 1.6 montre les vitesses des véhicules sur une seule voie dans un scénario de démarrage. Dans ce scénario, le véhicule de tête a une vitesse désirée plus faible que celles des suiveurs. On remarque qu'après avoir atteint leurs vitesses désirées, les interdistances deviennent petites et les véhicules suiveurs freinent afin de respecter le temps de sécurité en amont T_n , fixé avant le démarrage. Ainsi, le modèle IDM favorise le critère de la sécurité par rapport au critère de la vitesse désirée.

TABLE 1.6 – Paramètres du modèle IDM

Paramètre	Valeur	Unité
Accélération maximale	4,00	m.s ⁻²
Décélération désirée	-3,00	m.s ⁻²
Temps de sécurité en amont minimum	1,20	s
Interdistance à la congestion	2,00	m

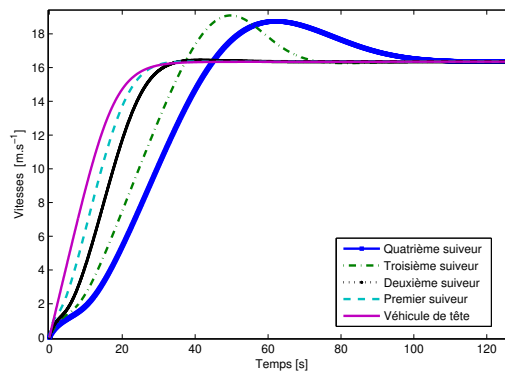


FIGURE 1.6 – Intelligent Driver Model : vitesses des véhicules avec différentes vitesses désirées et temps en amont de sécurité

1.2.3.4 Synthèse du modèle retenu

Le tableau 1.7 compare les quatre modèles ACC présentés précédemment. Selon ce tableau, le modèle IDM semble le plus pertinent pour répondre aux critères fixés. Pour rappel, ces critères sont la facilité de l'implémentation et la disponibilité et l'intuitivité des paramètres. Par conséquent, le modèle IDM est retenu pour représenter les véhicules automatisés dans un trafic mixte.

TABLE 1.7 – Tableau de comparaison des modèles ACC

Modèle	Ioannou	Germann	Moulina	IDM
Facilité de l'implémentation	non	non	oui	oui
Disponibilité et intuitivité des paramètres	non	non	non	oui

1.2.3.5 Conclusions

Dans cette sous-section, le modèle Intelligent Driver Model (IDM) a été retenu puisqu'il répond aux critères fixés (facilité de l'implémentation, disponibilité et intuitivité des paramètres). Toutefois, ce modèle ne prend pas en compte la communication véhicule-véhicule et/ou véhicule-infrastructure, ce qui est un inconvénient à terme. Ce modèle sera intégré dans notre simulateur de trafic mixte.

1.2.4 Conclusions

Dans cette section, un état-de-l'art des modèles microscopiques longitudinaux de « conducteur » et de véhicules automatisés ont été présentés. Le modèle Two Velocity Difference Model (TVDM) a été retenu pour représenter le comportement du conducteur dans un contexte de conduite longitudinale en file. Pour les véhicules automatisés, le modèle microscopique Intelligent Driver Model (IDM) a été retenu pour représenter leurs comportements dans un trafic mixte.

1.3 Modèles microscopiques latéraux

Cette section présente un état-de-l'art des modèles microscopiques représentant le comportement latéral du véhicule en situation de changement de voie. Plus précisément, ces modèles sont destinés à gérer le changement de voie dans un trafic à deux ou plusieurs voies. La figure 1.7 constitue la nomenclature de cette section.

1.3.1 Introduction

La modélisation du trafic à plusieurs voies a commencé avec l'apparition du modèle de [Gipps, 1986]. Les modèles latéraux permettent de décrire le comportement du conducteur ou du véhicule automatisé dans un processus de changement de voie qui, lui même, se divise en trois étapes :

- sur le plan stratégique [Toledo et al., 2005, Kesting, 2008], le conducteur connaît *a priori* le chemin de destination sur lequel envisage le changement de voie.
- sur le plan tactique [Hidas and Wagner, 2005, Kesting, 2008], le conducteur envisage ses accélérations et ses décélérations en coordination avec les véhicules dans la voie cible.
- sur le plan opérationnel [Gipps, 1986, Kesting, 2008], le conducteur détermine si un changement de voie immédiat serait à la fois sûr et souhaité. La sûreté du changement de voie dépend essentiellement des distances D_{av} et D_{ar} qui sont, respectivement, l'interdistance en avant et en arrière du véhicule dans la voie cible (voir la figure 1.7).

[Gipps, 1986], [Cassidy and May, 1991], [Hidas, 2002] et [Kesting, 2008] ont travaillé sur la modélisation de ces trois étapes et le classement du changement de voie. Les classes sont divisées en

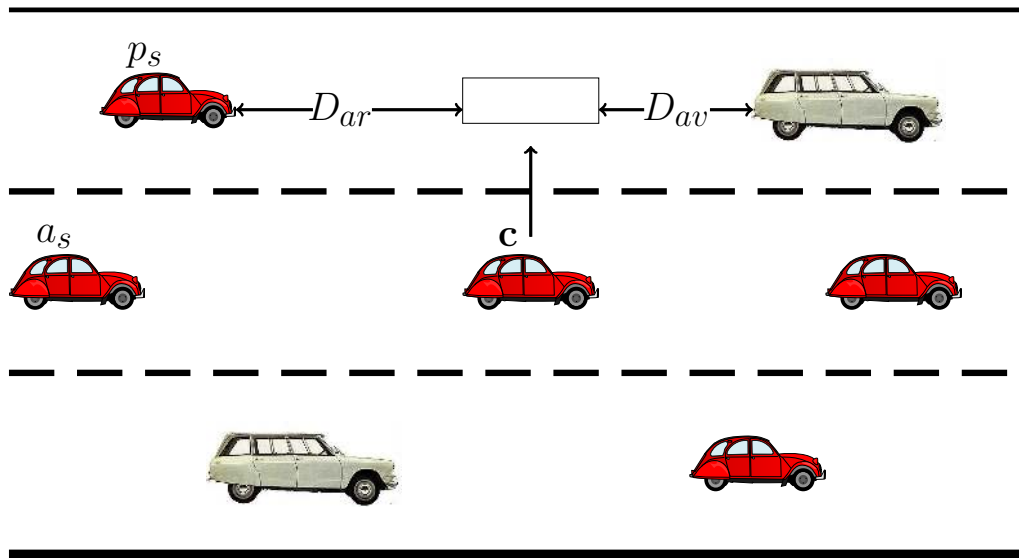


FIGURE 1.7 – Position des véhicules dans une section du trafic

deux : obligatoire et facultative. Les changements de voie obligatoires sont effectués principalement pour des raisons stratégiques comme, par exemple, pour changer de direction à travers une sortie d'autoroute. Alors que le changement de voie facultative permet d'améliorer les conditions de conduite dans la voie cible par rapport à la voie actuelle.

Cette section présente, dans une première étape, un état-de-l'art des modèles de changement de voie. Dans une deuxième étape, un modèle de trafic matriciel est proposé en utilisant le modèle longitudinal IDM afin de permettre une gestion microscopique du trafic.

1.3.2 État-de-l'art des modèles de changement de voie

D'après [Toledo et al., 2000], la plupart des modèles de changement de voie sont basés sur le principe que les conducteurs évaluent la voie occupée et la voie cible. En comparant ces deux dernières sur la base de critères bien définis, le conducteur (ou le véhicule automatisé) choisit sa direction de voie (changer/ne pas changer).

1.3.2.1 Modèle de Gipps

Le modèle de [Gipps, 1986] tient compte de la nécessité, de la volonté (ou la motivation) et de la sécurité, inhérentes au changement de voie. Ainsi, le comportement du conducteur est régi par deux critères fondamentaux : le maintien de la vitesse désirée et le bon choix de la voie pour une éventuelle manoeuvre de virage. Dans le cas où le virage est loin, le conducteur se concentre seulement sur sa vitesse désirée (atteinte ou maintien). Pour un véhicule, lorsqu'il y a plus d'une voie acceptable pour changer, le conflit est résolu de façon déterministe par un système de priorité compte tenu de l'emplacement des obstacles, la présence de véhicules lourds et le gain de vitesse. Le simulateur de trafic CORSIM¹¹ utilise le modèle de [Gipps, 1986] avec quelques modifications.

11. CORSIM : CORridor SIMulation

1.3.2.2 Modèle de Kita

Le modèle de [Kita, 1999] est inspiré de la théorie des jeux. Un modèle logit¹² est utilisé pour estimer le changement de voie à l'entrée de l'autoroute.

Les facteurs mis en jeu sont la longueur de l'espace disponible, la vitesse relative du véhicule courant et le reste de la distance à la fin de la voie d'accélération.

Sur la figure 1.7, seul le véhicule p_s est concerné par le changement de voie du véhicule c d'après le modèle de Kita. Ces deux véhicules interagissent comme deux personnes non coopératives dans un jeu. Ainsi, le véhicule c possède les deux choix suivants :

$$p_1 = \{1 : \text{changer de voie}, 2 : \text{continuer sur la même voie}\}$$

et le véhicule p_s possède les deux choix suivants :

$$p_2 = \{i : \text{laisser passer}, ii : \text{ne pas laisser passer}\}$$

TABLE 1.8 – Matrice de gains pour le véhicule c

	i	ii
1	a_{11}	a_{12}
2	a_{21}	a_{22}

TABLE 1.9 – Matrice de gains pour le véhicule p_s

	i	ii
1	b_{11}	b_{12}
2	b_{21}	b_{22}

Les deux matrices (tables 1.8 et 1.9) représentent respectivement les gains apportés pour le véhicule c et le véhicule p_s . La valeur de a_{12} représente la satisfaction apportée au véhicule c lorsque ce véhicule veut changer de voie mais que le véhicule p_s n'est pas prêt à le laisser passer. Le calcul des coefficients a_{ij} et b_{ij} des matrices de gains des véhicules c et p_s , respectivement, est fondé sur le calcul du critère Time To Collision (TTC¹³). [Kita, 1999] présente un exemple pour l'estimation de ces coefficients à partir du calcul du maximum de vraisemblance.

Ainsi, le problème posé par Kita amène à un calcul de probabilité de changement de voie pour une situation donnée. Les stratégies mixtes des véhicules (ou joueurs dans le cas de Kita), c et p_s , définies respectivement par c^* et p^* . D'après [Aumann, 1989] et [Kita, 1999], le meilleur couple de stratégie mixte est défini par (c^*, p^*) , où c^* et p^* doivent satisfaire les conditions suivantes :

$$E_1(c^*, p^*) \geq E_1(c, p^*) \quad (1.20)$$

$$E_2(c^*, p^*) \geq E_2(c^*, p) \quad (1.21)$$

12. La régression logistique ou modèle logit est un modèle de régression binomiale. Comme pour tous les modèles de régression binomiale, il s'agit de modéliser l'effet d'un vecteur de variables aléatoires sur une variable aléatoire binomiale. La régression logistique est un cas particulier du modèle linéaire généralisé [Kleinbaum, 1994]

13. Le TTC est le temps pendant lequel il y aura une collision entre deux véhicules s'ils continuent à rouler aux mêmes vitesses.

avec le couple (E_1, E_2) qui est la solution à l'équilibre. c^* et p^* représentent, respectivement, la probabilité de changement de voie pour le véhicule c et la probabilité pour que le véhicule p_s laisse passer le véhicule c au moment du changement de voie. Dans le cas où il existe plusieurs points d'équilibre, le gain le plus grand sera pris en compte.

1.3.2.3 Modèle de Hidas

Le modèle de [Hidas, 2005] exige un premier critère de faisabilité qui consiste à respecter la disponibilité d'un minimum d'interdistance entre le prochain véhicule meneur et le prochain véhicule suiveur. Ce modèle prend en compte la situation du trafic : trois cas se présentent :

Trafic libre (Free traffic flow) : Dans ce cas, le véhicule c peut changer de voie si les nouvelles interdistances D_{av} et D_{ar} sont, respectivement, supérieures à $D_{av,min}$ et $D_{ar,min}$ (Fig. 1.7).

Trafic dense et le véhicule p_s est coopératif : Un conducteur non coopératif est celui qui n'est pas prêt à diminuer sa vitesse pour laisser le véhicule c changer de voie. Dans ce cas le véhicule p_s évalue la décélération à appliquer pour laisser le véhicule c changer de voie. En tenant compte des distances $D_{av,min}$, $D_{ar,min}$, si cette décélération est confortable, le changement de voie s'effectue.

Trafic dense et le conducteur p_s n'est pas coopératif : Dans ce cas, le véhicule c évalue la décélération que le véhicule p_s doit appliquer. En tenant compte des deux distances $D_{av,min}$ et $D_{ar,min}$, si cette décélération est confortable le changement aura lieu.

La différence entre ces deux derniers cas réside alors dans la coopération entre le véhicule qui désire changer de voie et le prochain suiveur.

1.3.2.4 Modèle de Kesting

Plus récemment, [Kesting, 2008] a présenté un nouveau modèle de changement de voie dans un trafic à deux ou plusieurs voies. Ce modèle s'appelle MOBIL¹⁴. À la différence des modèles de [Kita, 1999] et de [Hidas, 2005], le modèle MOBIL prend en considération trois véhicules pour la prise de décision du changement de voie : le véhicule courant c , le véhicule suiveur dans la voie actuelle a_s et le véhicule prochain suiveur p_s dans la voie cible (Fig. 1.7). Selon Kesting, la décision du changement de voie doit satisfaire deux conditions : la motivation et la sécurité.

Condition de sécurité

Dans un trafic dense à deux ou plusieurs voies, le risque de collision est très élevé entre le véhicule qui désire changer de voie, soit le véhicule c dans la figure 1.7, et les véhicules dans la voie cible. Dans une situation réelle, le conducteur doit estimer à travers son rétroviseur la distance qui le séparera de son prochain suiveur ($D_{ar,min}$) et de son prochain meneur ($D_{av,min}$) avant de décider de changer de voie.

Toutefois, le changement de voie ne doit pas gêner le prochain suiveur. Dans le cas du modèle de [Kesting, 2008], cette condition de sécurité se traduit par la fixation d'un seuil de décélération pour le prochain suiveur, soit b_{safe} . En d'autres termes, la décélération du prochain véhicule suiveur \tilde{a}_{p_s} dans la voie cible après le changement de voie soit inférieure à la décélération b_{safe}

14. MOBIL : Minimizing Overall Braking Change Induced by Lane change

($b_{\text{safe}} \leq 0$). Soit,

$$\tilde{a}_{p_s} \geq b_{\text{safe}} \quad (1.22)$$

Dans ces faits, la décélération b_{safe} doit être inférieure ou égale à la décélération maximale possible qui est de -3 m.s^{-2} .

Condition de motivation

Une fois la condition de sécurité satisfaite, une condition de motivation s'ajoute dans le processus du changement de voie. Cette condition dépend, d'une part, des caractéristiques du conducteur et, d'autre part, de la caractéristique de l'autoroute¹⁵ (symétrique, non-symétrique). Par exemple, un conducteur frustré aura tendance à garder une vitesse constante sur une seule voie alors qu'un conducteur sportif souhaitera dépasser les véhicules et rouler à une vitesse plus élevée.

Selon le type de l'autoroute, le modèle de [Kesting, 2008] présente une condition de motivation. Dans une autoroute symétrique, comme en France, le changement de voie se fait à travers la voie à gauche du conducteur. Dans les autoroutes symétriques, comme aux États Unis, les voies sont équivalentes et le changement de voie se fait aussi bien par la voie à gauche que par la voie à droite du conducteur.

— Critère de motivation pour les autoroutes symétriques

Pour une autoroute symétrique, la condition de motivation se traduit par l'expression suivante :

$$\tilde{a}_c - a_c + p_f ((\tilde{a}_{p_s} - a_{p_s}) + (\tilde{a}_s - a_s)) > \Delta a_{th} \quad (1.23)$$

avec,

- a_c , l'accélération du véhicule c , qui désire changer de voie,
- \tilde{a}_c , l'accélération du véhicule c s'il change de voie,
- a_{p_s} , l'accélération du nouveau suiveur si le véhicule c ne change pas de voie,
- \tilde{a}_{p_s} , l'accélération du nouveau suiveur si le véhicule c change de voie,
- a_s , l'accélération de l'ancien suiveur si le véhicule c ne change pas de voie,
- \tilde{a}_s , l'accélération de l'ancien suiveur si le véhicule c change de voie,
- p_f , facteur de politesse qui est représentatif de l'altruisme du conducteur du véhicule c ,
- Δa_{th} représente un gain critique d'accélération.

En d'autres termes, le changement de voie aura lieu si le gain/perte d'accélération du véhicule courant est supérieur à un seuil critique. Le tableau 1.10 présente six comportements spécifiques de conducteurs en fonction de p_f et Δa_{th} .

— Critère de motivation pour les autoroutes non symétriques

Dans ce cas, les véhicules ayant des vitesses inférieures ou égales à une vitesse v_{crit} doivent rester sur la voie la plus à droite de l'autoroute. La voie à gauche du conducteur ne doit être utilisée que lorsqu'il veut dépasser un ou plusieurs véhicules. Dans ce cas, le changement de voie se fait selon la législation française. Cette loi est traduite par les deux équations 1.24, pour le changement de la voie de gauche vers la voie de droite, et 1.25, pour le changement de la voie de droite vers la voie de gauche :

$$L \rightarrow R : \tilde{a}_c^{eur} - a_c + p_f (\tilde{a}_s - a_s) > \Delta a_{th} - \Delta a_{bias} \quad (1.24)$$

$$R \rightarrow L : \tilde{a}_c - a_c^{eur} + p_f (\tilde{a}_{p_s} - a_{p_s}) > \Delta a_{th} + \Delta a_{bias} \quad (1.25)$$

15. Une autoroute est une route réservée à la circulation des véhicules motorisés rapides.

TABLE 1.10 – Classification du comportement conducteur selon les paramètres p_f et Δa_{th} du modèle de [Kesting, 2008] selon [Massonnet, 2009]

$p_f = 1, \Delta a_{th} \approx 0$	Egalitaire : le changement de voie s'effectue si la moyenne globale des gains d'accélération est positive
$p_f = 1, \Delta a_{th} \gg 0$	Egalitaire et peu risqué : un grand gain global d'accélération est requis pour changer de voie
$p_f = 1, \Delta a_{th} \ll 0$	Egalitaire mais risqué : le changement s'effectue même si les véhicules doivent en moyenne freiner relativement fort
$p_f \gg 0, \Delta a_{th} \approx 0$	Altruiste : le changement du véhicule c s'effectue surtout si les autres voitures y gagnent
$p_f = 0, \Delta a_{th} \approx 0$	Egoïste : le véhicule c ne se soucie pas de son entourage et veille seulement à son propre intérêt
$p_f \ll 0, \Delta a_{th} \approx 0$	Vicieux : le véhicule c ne change de voie que si son intérêt personnel prime sur celui des autres

avec,

$$a_c^{eur} = \begin{cases} \min(a_c, \tilde{a}_c) & \text{si } v_c > \tilde{v}_{lead} > v_{crit} \\ a_c & \text{sinon} \end{cases} \quad (1.26)$$

où,

- \tilde{a}_c , l'accélération du véhicule c dans la voie de gauche après le changement de voie,
- \tilde{v}_{lead} , la vitesse du véhicule meneur dans la voie de gauche.

1.3.2.5 Conclusions

Cette section a présenté des modèles latéraux qui convergent quant à l'existence de deux critères à savoir celui de la sécurité et celui de la motivation. La différence entre ces modèles se manifeste essentiellement dans le nombre de véhicules pris en compte dans le processus du changement de voie. Le modèle de [Kesting, 2008] considère que le conducteur ou le véhicule automatisé qui désire changer de voie doit prendre en compte les états de trois véhicules : le prochain suiveur, le prochain meneur et l'ancien suiveur. Ainsi, ce modèle prend en compte le nombre maximum de conducteurs voisins par rapport aux autres modèles de changement de voie cités dans cette partie. Par conséquent, il apparait le plus pertinent en termes de sécurité et de réalisme et pour ces raisons, il sera intégré dans notre simulateur de trafic mixte.

Dans la prochaine sous-section, une nouvelle approche de modélisation du trafic est introduite. Cette approche se base sur les modèles microscopiques longitudinaux et latéraux. Le modèle résultant se présente alors sous une forme matricielle dont l'objectif est de visualiser le contact microscopique entre les véhicules ainsi que leurs états comme la position, la vitesse et la voie occupée.

1.3.3 Synthèse du modèle matriciel du trafic

Le modèle matriciel développé se base sur les deux types de modèles microscopiques cités précédemment : modèle longitudinal et modèle latéral. Cette section fait la synthèse d'un modèle de trafic représentatif qui comporte ces deux types de modèles.

1.3.3.1 Introduction

On appelle un système à multiple véhicules (Multiple Vehicle System) un ensemble de véhicules placés dans une même portion du trafic. Si le mouvement de ces véhicules est régi par des modèles longitudinaux de poursuite (comme le modèle IDM), alors il existe une interaction et une relation entre chaque véhicule et son meneur dans la même voie. Ce lien est rompu avec le changement de voie de ce véhicule meneur et se recrée avec le nouveau véhicule meneur. L'objectif dans cette sous-section est la modélisation du contact entre les différents véhicules dans un trafic à deux voies. Cette modélisation repose sur la représentation matricielle des différents états et les relations entre les véhicules.

1.3.3.2 Formulation

Le modèle IDM fait la base de la formulation matricielle de notre modèle de trafic. À titre de rappel, le modèle IDM est un modèle ACC présenté dans le paragraphe §1.2.3.3 page 37 pour un seul véhicule. Il est donné par :

$$\dot{v}_n = a_n \cdot \left(1 - \left(\frac{v_n}{v_n^0} \right)^4 - \left(\frac{s^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n} \right)^2 \right), \quad (1.27)$$

avec

$$s_n = \Delta x_n - l_{n+1}, \quad (1.28)$$

et

$$s^*(v_n, \Delta v_n) = s_n^0 + T_n \cdot v_n - \frac{v_n \Delta v_n}{2\sqrt{a_n b_n}}. \quad (1.29)$$

Sous une autre forme, le modèle IDM, pour le véhicule n , peut s'écrire comme suit :

$$\frac{1}{a_n} \dot{v}_n + v_n^4 \cdot \left(\frac{1}{v_n^0} \right)^4 + s^*(v_n, \Delta v_n)^2 \cdot \left(\frac{1}{s_n} \right)^2 = 1. \quad (1.30)$$

Plus généralement et pour une file de N_1 véhicule(s), le modèle IDM peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\langle \underline{\underline{A}} \rangle^{-1} \langle \underline{\underline{\ddot{x}}} \rangle + \langle \underline{\underline{V}} \rangle^{-1} \underline{\underline{f}}_1 (\langle \underline{\underline{\dot{x}}} \rangle) + \langle \underline{\underline{S}} \rangle \underline{\underline{f}}_2 (\langle \underline{\underline{x}} \rangle^{-1}) = \underline{\underline{1}} \quad (1.31)$$

avec

$$\begin{aligned} \langle \underline{\underline{A}} \rangle^{-1} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{a_1} & & & & \\ & \frac{1}{a_2} & & & \\ & \vdots & \ddots & & \\ & & & \frac{1}{a_{N_1}} & \\ & & & & \frac{1}{(v_{N_1}^0)^4} \end{bmatrix}, \quad \langle \underline{\underline{V}} \rangle^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(v_1^0)^4} & & & & \\ & \frac{1}{(v_2^0)^4} & & & \\ & \vdots & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \frac{1}{(v_{N_1}^0)^4} \end{bmatrix}, \\ \langle \underline{\underline{S}} \rangle &= \begin{bmatrix} (s_1^*)^2 & & & & \\ & (s_2^*)^2 & & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ & & & \ddots & \\ & & & & (s_{N_1}^*)^2 \end{bmatrix}, \\ \underline{\underline{f}}_1 (\langle \underline{\underline{\dot{x}}} \rangle) &= \begin{bmatrix} \dot{x}_1^4 \\ \dot{x}_2^4 \\ \vdots \\ \dot{x}_{N_1}^4 \end{bmatrix}, \quad \underline{\underline{f}}_2 (\langle \underline{\underline{x}} \rangle^{-1}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{s_1^2} \\ \frac{1}{s_2^2} \\ \vdots \\ \frac{1}{s_N^2} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\underline{1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}, \langle \underline{\ddot{x}} \rangle = \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \vdots \\ \ddot{x}_{N_1} \end{bmatrix}$$

$\langle \underline{V} \rangle^{-1}$ est la matrice des vitesses désirées, $\langle \underline{A} \rangle^{-1}$ la matrice des accélérations maximales, $\langle \underline{S} \rangle$ la matrice des interdistances optimales, \underline{f}_1 le vecteur des vitesses et \underline{f}_2 le vecteur des interdistances. Cette représentation matricielle du modèle IDM n'est valable que lorsque les véhicules sont placés dans un ordre croissant par rapport aux indices dans une seule voie : soit le véhicule 1 en tête de file et le véhicule N_1 son dernier.

En raison, de la grande taille que peuvent prendre ces matrices, cette partie traite seulement le cas où $N = 6$ véhicules uniformément répartis sur les deux voies comme le montre la figure 1.8. Soit, $N_1 = 3$ et $N_2 = 3$ le nombre de véhicules dans la voie 1 et 2 respectivement.

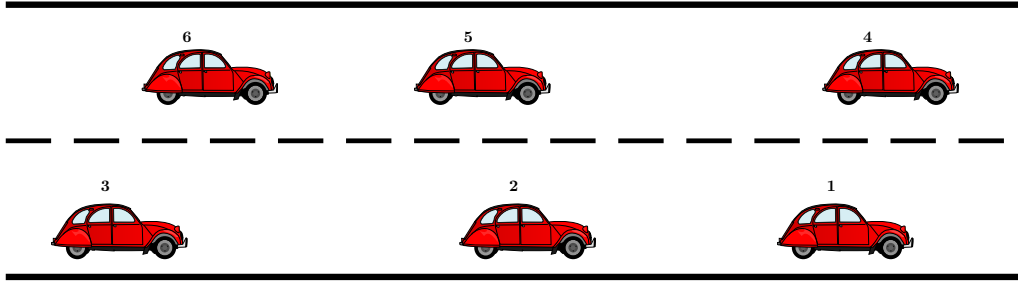


FIGURE 1.8 – Position des véhicules dans une portion d'un trafic

Soit les indices suivants :

- $V_s \in \{1 \dots N\}$, le véhicule suivi,
- $P_f \in \{1, \dots, N_1\}$, la position dans la file,
- $n \in \{1, \dots, N\}$, le numéro du véhicule,
- $voie \in \{1, 2\}$, le numéro de la voie,

Notons que dans le cas où il n'y a pas de véhicule suivi, $V_s = 0$. Ce cas se présente lorsque le véhicule est le meneur de la file.

La suite de ce paragraphe présente des exemples et des cas particuliers de répartition des différents véhicules dans une voie. À travers ces cas particuliers, le modèle matriciel de trafic est présenté à la fin de cette partie. Ce modèle prend en compte toutes les possibilités de la répartition de ces six véhicules dans un trafic à deux voies comme le montre la figure 1.8.

Exemple 1

Dans la figure 1.8, le véhicule 2 occupe la deuxième position dans la file de la voie 1. Alors, $P_f = 2$, $n = 2$ et $voie = 1$.

Soit $u_{voie, P_f, n} \in \{0, 1\}$ un paramètre qui traduit la présence (1) ou l'absence (0) du véhicule n dans la voie numéro $voie$ à une position P_f de la file.

Exemple 2

Dans la figure 1.8, le véhicule 1 est en position 1 dans la file (tête de file), par conséquent, $u_{1,1,1} = 1$ et $u_{1,1,j} = 0 \forall j \in \{2, 3\}$.

Soit k le paramètre qui caractérise le contact entre deux véhicules successifs. Ce paramètre prend comme indices V_s , P_f , n et *voie*. Ainsi, $k_{V_s, n, P_f, voie}$ prend la valeur 1 si et seulement si le véhicule V_s est le véhicule suivi du véhicule n dans la position P_f de la file et dans la voie *voie*.

Exemple 3

Dans la figure 1.8, le véhicule 1 est en position 1 dans la file (tête de file), par conséquent, $k_{0,1,1,1} = 1$ et $k_{0,j,1,1} = 0 \forall j \in \{2, 3\}$.

Les deux prochains paragraphes s'intéressent à la modélisation du trafic dans chaque voie. Le troisième paragraphe présente le nouveau modèle du trafic sans tenir compte du changement de voie. Le quatrième paragraphe introduit la formulation complète du modèle à 6 véhicules avec la possibilité de changement de voie.

Modèle IDM pour la voie 1

Le mouvement de ces véhicules est gouverné par le modèle longitudinal IDM présenté dans la section 1.2.3.3. Pour simplifier la formulation, on considère que le véhicule de tête n'interagit pas avec le dernier de la file dans la voie 1 : dans l'exemple présent, le véhicule 1 ne poursuit pas le véhicule 3. Dans ce cas, l'objectif du véhicule de tête est d'arriver à la fin de la voie.

Soit la matrice $\langle \underline{A} \rangle_1^{-1}$ donnée par

$$\langle \underline{A} \rangle_1^{-1} = \begin{bmatrix} \langle \underline{A}_{11,1} \rangle^{-1} & \langle \underline{A}_{12,1} \rangle^{-1} & \langle \underline{A}_{13,1} \rangle^{-1} \\ \langle \underline{A}_{21,1} \rangle^{-1} & \langle \underline{A}_{22,1} \rangle^{-1} & \langle \underline{A}_{23,1} \rangle^{-1} \\ \langle \underline{A}_{31,1} \rangle^{-1} & \langle \underline{A}_{32,1} \rangle^{-1} & \langle \underline{A}_{33,1} \rangle^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_{1,1,1}}{a_1} & \frac{u_{1,1,2}}{a_2} & \frac{u_{1,1,3}}{a_3} \\ \frac{u_{1,2,1}}{a_1} & \frac{u_{1,2,2}}{a_2} & \frac{u_{1,2,3}}{a_3} \\ \frac{u_{1,3,1}}{a_1} & \frac{u_{1,3,2}}{a_2} & \frac{u_{1,3,3}}{a_3} \end{bmatrix}, \quad (1.32)$$

avec a_n , l'accélération maximale du véhicule n . La ligne i de la matrice $\langle \underline{A} \rangle_1^{-1}$ modélise la position numéro $P_f = i$ dans la file de la voie 1. Soit $\langle \underline{A} \rangle_{v_1}^{-1}$, le premier vecteur ligne donné par

$$\langle \underline{A} \rangle_{v_1}^{-1} = \left[\langle \underline{A}_{11,1} \rangle^{-1} \quad \langle \underline{A}_{12,1} \rangle^{-1} \quad \langle \underline{A}_{13,1} \rangle^{-1} \right] = \left[\frac{u_{1,1,1}}{a_1} \quad \frac{u_{1,1,2}}{a_2} \quad \frac{u_{1,1,3}}{a_3} \right].$$

Les exemples suivants permettent de détailler l'équation (1.32).

Exemples

- Si le véhicule 3 est à la position 1 de la file dans la voie 1 (tête de file de la première voie), alors $u_{1,1,3} = 1$ et $u_{1,1,j} = 0, \forall j \in \{1, 2\}$ et

$$\langle \underline{\underline{A}} \rangle_{v_1}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{a_3} \end{bmatrix}$$

— Si le véhicule 2 est à la position 3 de la file dans la voie 1 (tête de file de la première voie), alors $u_{1,3,2} = 1$ et $u_{1,3,j} = 0, \forall j \in \{1, 3\}$ et

$$\langle \underline{\underline{A}} \rangle_{v_3}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{u_{1,3,1}}{a_1} & \frac{u_{1,3,2}}{a_2} & \frac{u_{1,3,3}}{a_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{a_2} & 0 \end{bmatrix}$$

On pose $\langle \underline{\underline{V}} \rangle_1^{-1}$ la matrice des vitesses désirées donnée par

$$\langle \underline{\underline{V}} \rangle_1^{-1} = \begin{bmatrix} \langle \underline{\underline{V}}_{11,1} \rangle^{-1} & \langle \underline{\underline{V}}_{12,1} \rangle^{-1} & \langle \underline{\underline{V}}_{13,1} \rangle^{-1} \\ \langle \underline{\underline{V}}_{21,1} \rangle^{-1} & \langle \underline{\underline{V}}_{22,1} \rangle^{-1} & \langle \underline{\underline{V}}_{23,1} \rangle^{-1} \\ \langle \underline{\underline{V}}_{31,1} \rangle^{-1} & \langle \underline{\underline{V}}_{32,1} \rangle^{-1} & \langle \underline{\underline{V}}_{33,1} \rangle^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_{1,1,1}}{(v_1^0)^4} & \frac{u_{1,1,2}}{(v_2^0)^4} & \frac{u_{1,1,3}}{(v_3^0)^4} \\ \frac{u_{1,2,1}}{(v_1^0)^4} & \frac{u_{1,2,2}}{(v_2^0)^4} & \frac{u_{1,2,3}}{(v_3^0)^4} \\ \frac{u_{1,3,1}}{(v_1^0)^4} & \frac{u_{1,3,2}}{(v_2^0)^4} & \frac{u_{1,3,3}}{(v_3^0)^4} \end{bmatrix}. \quad (1.33)$$

Soit

$$\langle \underline{\underline{V}} \rangle_{v_1}^{-1} = \begin{bmatrix} \langle \underline{\underline{V}}_{11,1} \rangle^{-1} & \langle \underline{\underline{V}}_{12,1} \rangle^{-1} & \langle \underline{\underline{V}}_{13,1} \rangle^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_{1,1,1}}{(v_1^0)^4} & \frac{u_{1,1,2}}{(v_2^0)^4} & \frac{u_{1,1,3}}{(v_3^0)^4} \end{bmatrix}.$$

Exemple

Si le véhicule 3 est à la position 1 de la file dans la voie 1 (tête de la file de la première voie), alors

$$\langle \underline{\underline{V}} \rangle_{v_1}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{(v_3^0)^4} \end{bmatrix}$$

Comme le modèle IDM est un modèle de poursuite, la commande de chaque véhicule dépend de l'état de son meneur. Dans le cas de la figure 1.8, le véhicule 3 est en relation seulement avec le véhicule 2. La matrice $\langle \underline{\underline{S}} \rangle_1$ généralise ce cas particulier en prenant compte toutes les possibilités de contacts entre les véhicules dans une file dans la première voie. Par exemple, pour le véhicule 1, celui-ci peut être en contact avec l'un des deux autres véhicules (soit le véhicule 2 ou le véhicule 3 s'il change de voie et après il retourne).

Soit $\langle \underline{\underline{S}} \rangle_1$ la matrice de contact entre les véhicules dans la voie 1. Cette matrice prend en compte toutes les possibilités de la répartition des trois véhicules 1, 2 et 3 dans la file. Dans ce paragraphe, l'interdistance nette, s et l'interdistance optimale, s^* , prennent les deux indices V_s et n . Ainsi, la matrice $\langle \underline{\underline{S}} \rangle_1$ est donnée par

$$\langle \underline{\underline{S}} \rangle_1 = \begin{bmatrix} \langle \underline{\underline{S}}_{11,1} \rangle & \langle \underline{\underline{S}}_{12,1} \rangle & \langle \underline{\underline{S}}_{13,1} \rangle \\ \langle \underline{\underline{S}}_{21,1} \rangle & \langle \underline{\underline{S}}_{22,1} \rangle & \langle \underline{\underline{S}}_{23,1} \rangle \\ \langle \underline{\underline{S}}_{31,1} \rangle & \langle \underline{\underline{S}}_{32,1} \rangle & \langle \underline{\underline{S}}_{33,1} \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_{0,1,1,1}(s_{0,1}^*)^2}{s_{0,1}^2} & \frac{k_{0,2,1,1}(s_{0,2}^*)^2}{s_{0,2}^2} & \frac{k_{0,3,1,1}(s_{0,3}^*)^2}{s_{0,3}^2} \\ \frac{k_{1,2,2,1}(s_{1,2}^*)^2}{s_{1,2}^2} + \frac{k_{2,1,2,1}(s_{2,1}^*)^2}{s_{2,1}^2} & \frac{k_{1,3,2,1}(s_{1,3}^*)^2}{s_{1,3}^2} + \frac{k_{3,1,2,1}(s_{3,1}^*)^2}{s_{3,1}^2} & \frac{k_{2,3,2,1}(s_{2,3}^*)^2}{s_{2,3}^2} + \frac{k_{3,2,2,1}(s_{3,2}^*)^2}{s_{3,2}^2} \\ \frac{k_{1,2,3,1}(s_{1,2}^*)^2}{s_{1,2}^2} + \frac{k_{2,1,3,1}(s_{2,1}^*)^2}{s_{2,1}^2} & \frac{k_{1,3,3,1}(s_{1,3}^*)^2}{s_{1,3}^2} + \frac{k_{3,1,3,1}(s_{3,1}^*)^2}{s_{3,1}^2} & \frac{k_{2,3,3,1}(s_{2,3}^*)^2}{s_{2,3}^2} + \frac{k_{3,2,3,1}(s_{3,2}^*)^2}{s_{3,2}^2} \end{bmatrix} \quad (1.34)$$

Exemple

Dans le cas de la figure 1.8, où le véhicule 1 tête de file est suivi par le véhicule 2 puis le véhicule 3, la matrice $\langle \underline{S} \rangle_1$ est donnée par

$$\langle \underline{S} \rangle_1 = \begin{bmatrix} \frac{(s_{0,1}^*)^2}{s_{0,1}^2} & 0 & 0 \\ \frac{(s_{1,2}^*)^2}{s_{1,2}^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(s_{2,3}^*)^2}{s_{2,3}^2} \end{bmatrix} \quad (1.35)$$

Enfin, pour la modélisation d'une file de trois véhicules dans une voie en utilisant le modèle IDM, on peut écrire comme suit :

$$\langle \underline{A} \rangle_1^{-1} \ddot{x}(t) + \langle \underline{V} \rangle_1^{-1} f_1(\dot{x}(t)) + \langle \underline{S} \rangle_1 f_2(x(t)) = \underline{1} \quad (1.36)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{u_{1,1,1}}{a_1} & \frac{u_{1,1,2}}{a_2} & \frac{u_{1,1,3}}{a_3} \\ \frac{u_{1,2,1}}{a_1} & \frac{u_{1,2,2}}{a_2} & \frac{u_{1,2,3}}{a_3} \\ \frac{u_{1,3,1}}{a_1} & \frac{u_{1,3,2}}{a_2} & \frac{u_{1,3,3}}{a_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_{1,1,1}}{(v_1^0)^4} & \frac{u_{1,1,2}}{(v_2^0)^4} & \frac{u_{1,1,3}}{(v_3^0)^4} \\ \frac{u_{1,2,1}}{(v_1^0)^4} & \frac{u_{1,2,2}}{(v_2^0)^4} & \frac{u_{1,2,3}}{(v_3^0)^4} \\ \frac{u_{1,3,1}}{(v_1^0)^4} & \frac{u_{1,3,2}}{(v_2^0)^4} & \frac{u_{1,3,3}}{(v_3^0)^4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1^4 \\ \dot{x}_2^4 \\ \dot{x}_3^4 \end{bmatrix} + \quad (1.37)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{k_{0,1,1,1}(s_{0,1}^*)^2}{s_{0,1}^2} & \frac{k_{0,2,1,1}(s_{0,2}^*)^2}{s_{0,2}^2} & \frac{k_{0,3,1,1}(s_{0,3}^*)^2}{s_{0,3}^2} \\ \frac{k_{1,2,2,1}(s_{1,2}^*)^2}{s_{1,2}^2} + \frac{k_{2,1,2,1}(s_{2,1}^*)^2}{s_{2,1}^2} & \frac{k_{1,3,2,1}(s_{1,3}^*)^2}{s_{1,3}^2} + \frac{k_{3,1,2,1}(s_{3,1}^*)^2}{s_{3,1}^2} & \frac{k_{2,3,2,1}(s_{2,3}^*)^2}{s_{2,3}^2} + \frac{k_{3,2,2,1}(s_{3,2}^*)^2}{s_{3,2}^2} \\ \frac{k_{1,2,3,1}(s_{1,2}^*)^2}{s_{1,2}^2} + \frac{k_{2,1,3,1}(s_{2,1}^*)^2}{s_{2,1}^2} & \frac{k_{1,3,3,1}(s_{1,3}^*)^2}{s_{1,3}^2} + \frac{k_{3,1,3,1}(s_{3,1}^*)^2}{s_{3,1}^2} & \frac{k_{2,3,3,1}(s_{2,3}^*)^2}{s_{2,3}^2} + \frac{k_{3,2,3,1}(s_{3,2}^*)^2}{s_{3,2}^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Modèle IDM pour la voie 2

La démarche de modélisation de la file de 3 véhicules dans la voie 2 est identique à celle opérée pour la voie 1. Les numéros de véhicules sont changés de 1, 2, 3 vers 4, 5, 6 respectivement. Ainsi, le numéro de voie passe de 1 à 2.

La matrice $\langle \underline{A} \rangle_2^{-1}$ est donnée par :

$$\langle \underline{A} \rangle_2^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11,2} & A_{12,2} & A_{13,2} \\ A_{21,2} & A_{22,2} & A_{23,2} \\ A_{31,2} & A_{32,2} & A_{33,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_{2,1,4}}{a_4} & \frac{u_{2,1,5}}{a_5} & \frac{u_{2,1,6}}{a_6} \\ \frac{u_{2,2,4}}{a_4} & \frac{u_{2,2,5}}{a_5} & \frac{u_{2,2,6}}{a_6} \\ \frac{u_{2,3,4}}{a_4} & \frac{u_{2,3,5}}{a_5} & \frac{u_{2,3,6}}{a_6} \end{bmatrix} \quad (1.38)$$

La matrice $\langle \underline{V} \rangle_2^{-1}$ est donnée par

$$\langle \underline{V} \rangle_2^{-1} = \begin{bmatrix} V_{11,2} & V_{12,2} & V_{13,2} \\ V_{21,2} & V_{22,2} & V_{23,2} \\ V_{31,2} & V_{32,2} & V_{33,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_{2,1,4}}{(v_4^0)^4} & \frac{u_{2,1,5}}{(v_5^0)^4} & \frac{u_{2,1,6}}{(v_6^0)^4} \\ \frac{u_{2,2,4}}{(v_4^0)^4} & \frac{u_{2,2,5}}{(v_5^0)^4} & \frac{u_{2,2,6}}{(v_6^0)^4} \\ \frac{u_{2,3,4}}{(v_4^0)^4} & \frac{u_{2,3,5}}{(v_5^0)^4} & \frac{u_{2,3,6}}{(v_6^0)^4} \end{bmatrix} \quad (1.39)$$

La matrice $\langle \underline{S} \rangle_2$ est donnée par

$$\langle \underline{S} \rangle_2 = \begin{bmatrix} S_{11,2} & S_{12,2} & S_{13,2} \\ S_{21,2} & S_{22,2} & S_{23,2} \\ S_{31,2} & S_{32,2} & S_{33,2} \end{bmatrix} = \quad (1.40)$$

$$\left[\begin{array}{ccc} \frac{k_{0,4,1,2}(s_{0,4}^*)^2}{s_{0,4}^2} & \frac{k_{0,5,1,2}(s_{0,5}^*)^2}{s_{0,5}^2} & \frac{k_{0,6,1,2}(s_{0,6}^*)^2}{s_{0,6}^2} \\ \frac{k_{4,5,2,2}(s_{4,5}^*)^2}{s_{4,5}^2} + \frac{k_{5,4,2,2}(s_{5,4}^*)^2}{s_{5,4}^2} & \frac{k_{4,6,2,2}(s_{4,6}^*)^2}{s_{4,6}^2} + \frac{k_{6,4,2,2}(s_{6,4}^*)^2}{s_{6,4}^2} & \frac{k_{5,6,2,2}(s_{5,6}^*)^2}{s_{5,6}^2} + \frac{k_{6,5,2,2}(s_{6,5}^*)^2}{s_{6,5}^2} \\ \frac{k_{4,5,3,2}(s_{4,5}^*)^2}{s_{4,5}^2} + \frac{k_{5,4,3,2}(s_{5,4}^*)^2}{s_{5,4}^2} & \frac{k_{4,6,3,2}(s_{4,6}^*)^2}{s_{4,6}^2} + \frac{k_{6,4,3,2}(s_{6,4}^*)^2}{s_{6,4}^2} & \frac{k_{5,6,3,2}(s_{5,6}^*)^2}{s_{5,6}^2} + \frac{k_{6,5,3,2}(s_{6,5}^*)^2}{s_{6,5}^2} \end{array} \right]$$

En remplaçant les indices de véhicule de 1, 2, 3 vers 4, 5, 6 respectivement dans l'équation (1.37), le modèle IDM dans la deuxième voie peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\langle \underline{\underline{A}} \rangle_2^{-1} \ddot{x}(t) + \langle \underline{\underline{V}} \rangle_2^{-1} \underline{f}_1(\dot{x}(t)) + \langle \underline{\underline{S}} \rangle_2 \underline{f}_2(x(t)) = \underline{1} \quad (1.41)$$

$$\left[\begin{array}{ccc} \frac{u_{2,1,4}}{a_4} & \frac{u_{2,1,5}}{a_5} & \frac{u_{2,1,6}}{a_6} \\ \frac{u_{2,2,4}}{a_4} & \frac{u_{2,2,5}}{a_5} & \frac{u_{2,2,6}}{a_6} \\ \frac{u_{2,3,4}}{a_4} & \frac{u_{2,3,5}}{a_5} & \frac{u_{2,3,6}}{a_6} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \ddot{x}_4^4 \\ \ddot{x}_5^4 \\ \ddot{x}_6^4 \end{bmatrix} + \left[\begin{array}{ccc} \frac{u_{2,1,4}}{(v_4^0)^4} & \frac{u_{2,1,5}}{(v_5^0)^4} & \frac{u_{2,1,6}}{(v_6^0)^4} \\ \frac{u_{2,2,4}}{(v_4^0)^4} & \frac{u_{2,2,5}}{(v_5^0)^4} & \frac{u_{2,2,6}}{(v_6^0)^4} \\ \frac{u_{2,3,4}}{(v_4^0)^4} & \frac{u_{2,3,5}}{(v_5^0)^4} & \frac{u_{2,3,6}}{(v_6^0)^4} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \dot{x}_4^4 \\ \dot{x}_5^4 \\ \dot{x}_6^4 \end{bmatrix} + \quad (1.42)$$

$$\left[\begin{array}{ccc} \frac{k_{0,4,1,2}(s_{0,4}^*)^2}{s_{0,4}^2} & \frac{k_{0,5,1,2}(s_{0,5}^*)^2}{s_{0,5}^2} & \frac{k_{0,6,1,2}(s_{0,6}^*)^2}{s_{0,6}^2} \\ \frac{k_{4,5,2,2}(s_{4,5}^*)^2}{s_{4,5}^2} + \frac{k_{5,4,2,2}(s_{5,4}^*)^2}{s_{5,4}^2} & \frac{k_{4,6,2,2}(s_{4,6}^*)^2}{s_{4,6}^2} + \frac{k_{6,4,2,2}(s_{6,4}^*)^2}{s_{6,4}^2} & \frac{k_{5,6,2,2}(s_{5,6}^*)^2}{s_{5,6}^2} + \frac{k_{6,5,2,2}(s_{6,5}^*)^2}{s_{6,5}^2} \\ \frac{k_{4,5,3,2}(s_{4,5}^*)^2}{s_{4,5}^2} + \frac{k_{5,4,3,2}(s_{5,4}^*)^2}{s_{5,4}^2} & \frac{k_{4,6,3,2}(s_{4,6}^*)^2}{s_{4,6}^2} + \frac{k_{6,4,3,2}(s_{6,4}^*)^2}{s_{6,4}^2} & \frac{k_{5,6,3,2}(s_{5,6}^*)^2}{s_{5,6}^2} + \frac{k_{6,5,3,2}(s_{6,5}^*)^2}{s_{6,5}^2} \end{array} \right] = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Modélisation du trafic dans les voies 1 et 2 sans tenir compte le changement de voie

Après la modélisation de chaque voie séparément, le modèle IDM peut s'écrire pour un trafic à deux voies, sans prendre en compte le changement de voie, sous la forme suivante :

$$\left[\begin{array}{c|c} \langle \underline{\underline{A}} \rangle_1^{-1} & 0 \\ \hline 0 & \langle \underline{\underline{A}} \rangle_2^{-1} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \vdots \\ \ddot{x}_6 \end{bmatrix} + \left[\begin{array}{c|c} \langle \underline{\underline{V}} \rangle_1^{-1} & 0 \\ \hline 0 & \langle \underline{\underline{V}} \rangle_2^{-1} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \dot{x}_1^4 \\ \vdots \\ \dot{x}_6^4 \end{bmatrix} + \left[\begin{array}{c|c} \langle \underline{\underline{S}} \rangle_1 & 0 \\ \hline 0 & \langle \underline{\underline{S}} \rangle_2 \end{array} \right] = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1.43)$$

$$\left[\begin{array}{ccc} \frac{u_{1,1,1}}{a_1} & \frac{u_{1,1,2}}{a_2} & \frac{u_{1,1,3}}{a_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{u_{1,2,1}}{a_1} & \frac{u_{1,2,2}}{a_2} & \frac{u_{1,2,3}}{a_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{u_{1,3,1}}{a_1} & \frac{u_{1,3,2}}{a_2} & \frac{u_{1,3,3}}{a_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{u_{2,1,4}}{a_4} & \frac{u_{2,1,5}}{a_5} & \frac{u_{2,1,6}}{a_6} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{u_{2,2,4}}{a_4} & \frac{u_{2,2,5}}{a_5} & \frac{u_{2,2,6}}{a_6} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{u_{2,3,4}}{a_4} & \frac{u_{2,3,5}}{a_5} & \frac{u_{2,3,6}}{a_6} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{x}_4 \\ \ddot{x}_5 \\ \ddot{x}_6 \end{bmatrix} + \quad (1.44)$$

$$\left[\begin{array}{ccc} \frac{u_{1,1,1}}{(v_1^0)^4} & \frac{u_{1,1,2}}{(v_2^0)^4} & \frac{u_{1,1,3}}{(v_3^0)^4} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{u_{1,2,1}}{(v_1^0)^4} & \frac{u_{1,2,2}}{(v_2^0)^4} & \frac{u_{1,2,3}}{(v_3^0)^4} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{u_{1,3,1}}{(v_1^0)^4} & \frac{u_{1,3,2}}{(v_2^0)^4} & \frac{u_{1,3,3}}{(v_3^0)^4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{u_{2,1,4}}{(v_4^0)^4} & \frac{u_{2,1,5}}{(v_5^0)^4} & \frac{u_{2,1,6}}{(v_6^0)^4} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{u_{2,2,4}}{(v_4^0)^4} & \frac{u_{2,2,5}}{(v_5^0)^4} & \frac{u_{2,2,6}}{(v_6^0)^4} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{u_{2,3,4}}{(v_4^0)^4} & \frac{u_{2,3,5}}{(v_5^0)^4} & \frac{u_{2,3,6}}{(v_6^0)^4} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \dot{x}_1^4 \\ \dot{x}_2^4 \\ \dot{x}_3^4 \\ \dot{x}_4^4 \\ \dot{x}_5^4 \\ \dot{x}_6^4 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\hat{k}_{0,4,1,1}(s_{0,4}^*)^2}{s_{0,4}^2} \\ \sum_{i=1}^{N_1} \left(\frac{\hat{k}_{4,i,2,1}(s_{4,i}^*)^2}{s_{4,i}^2} + \frac{\hat{k}_{i,4,2,1}(s_{i,4}^*)^2}{s_{i,4}^2} \right) \\ \sum_{i=1}^{N_1} \left(\frac{\hat{k}_{4,i,3,1}(s_{4,i}^*)^2}{s_{4,i}^2} + \frac{\hat{k}_{i,4,3,1}(s_{i,4}^*)^2}{s_{i,4}^2} \right) \\ \frac{k_{0,4,1,2}(s_{0,4}^*)^2}{s_{0,4}^2} \\ \frac{k_{4,5,2,2}(s_{4,5}^*)^2}{s_{4,5}^2} + \frac{k_{5,4,2,2}(s_{5,4}^*)^2}{s_{5,4}^2} \\ \frac{k_{4,5,3,2}(s_{4,5}^*)^2}{s_{4,5}^2} + \frac{k_{5,4,3,2}(s_{5,4}^*)^2}{s_{5,4}^2} \end{bmatrix} \\
 & \begin{bmatrix} \frac{\hat{k}_{0,5,1,1}(s_{0,5}^*)^2}{s_{0,5}^2} \\ \sum_{i=1}^{N_1} \left(\frac{\hat{k}_{5,i,2,1}(s_{5,i}^*)^2}{s_{5,i}^2} + \frac{\hat{k}_{i,5,2,1}(s_{i,5}^*)^2}{s_{i,5}^2} \right) \\ \sum_{i=1}^{N_1} \left(\frac{\hat{k}_{5,i,3,1}(s_{5,i}^*)^2}{s_{5,i}^2} + \frac{\hat{k}_{i,5,3,1}(s_{i,5}^*)^2}{s_{i,5}^2} \right) \\ \frac{k_{0,5,1,2}(s_{0,5}^*)^2}{s_{0,5}^2} \\ \frac{k_{4,6,2,2}(s_{4,6}^*)^2}{s_{4,6}^2} + \frac{k_{6,4,2,2}(s_{6,4}^*)^2}{s_{6,4}^2} \\ \frac{k_{4,6,3,2}(s_{4,6}^*)^2}{s_{4,6}^2} + \frac{k_{6,4,3,2}(s_{6,4}^*)^2}{s_{6,4}^2} \end{bmatrix} \\
 & \begin{bmatrix} \frac{\hat{k}_{0,6,1,1}(s_{0,6}^*)^2}{s_{0,6}^2} \\ \sum_{i=1}^{N_1} \left(\frac{\hat{k}_{6,i,2,1}(s_{6,i}^*)^2}{s_{6,i}^2} + \frac{\hat{k}_{i,6,2,1}(s_{i,6}^*)^2}{s_{i,6}^2} \right) \\ \sum_{i=1}^{N_1} \left(\frac{\hat{k}_{6,i,3,1}(s_{6,i}^*)^2}{s_{6,i}^2} + \frac{\hat{k}_{i,6,3,1}(s_{i,6}^*)^2}{s_{i,6}^2} \right) \\ \frac{k_{0,6,1,2}(s_{0,6}^*)^2}{s_{0,6}^2} \\ \frac{k_{5,6,2,2}(s_{5,6}^*)^2}{s_{5,6}^2} + \frac{k_{6,5,2,2}(s_{6,5}^*)^2}{s_{6,5}^2} \\ \frac{k_{5,6,3,2}(s_{5,6}^*)^2}{s_{5,6}^2} + \frac{k_{6,5,3,2}(s_{6,5}^*)^2}{s_{6,5}^2} \end{bmatrix} \\
 & = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

avec $\langle \hat{\underline{A}} \rangle_{1 \rightarrow 2}^{-1}$, $\langle \hat{\underline{A}} \rangle_{1 \rightarrow 2}^{-1}$ et $\langle \hat{\underline{S}} \rangle_{1 \rightarrow 2}$ sont, respectivement, les matrices des accélérations, des vitesses désirées et de contact des véhicules de la voie 1 s'ils changent vers la voie 2, $\langle \hat{\underline{A}} \rangle_{2 \rightarrow 1}^{-1}$, $\langle \hat{\underline{A}} \rangle_{2 \rightarrow 1}^{-1}$ et $\langle \hat{\underline{S}} \rangle_{2 \rightarrow 1}$ sont, respectivement, les matrices des accélérations, des vitesses désirées et de contact des véhicules de la voie 2 s'ils changent vers la voie 1.

Exemples de fonctions de contact

On dit qu'un véhicule n est en contact avec un véhicule $n + 1$ si ce dernier est son meneur. Ce paragraphe présente deux exemples de fonctions pour modéliser le contact entre ces deux véhicules.

Pour rappel, le changement de voie passe par deux étapes : décision et action. Dans ce paragraphe, on suppose que la décision pour changer de la voie 1 vers la voie 2 est prise par le véhicule 2 à un instant t_1 et que l'action du changement de voie commence dans le même instant. Le véhicule 2 va se placer entre les véhicules 4 et 5 dans la voie 2 (voir figure 1.8).

L'action de changement de voie peut alors se modéliser selon deux approches. La première consiste à faire un saut d'une voie à une autre. Dans la deuxième approche, le changement de voie se fait suivant une trajectoire entre les deux voies. Dans la première approche les fonctions k et \hat{k} sont binaires, alors que dans la deuxième approche elles sont continues dans le temps. Ce paragraphe présente deux exemples de la fonction $k_{V_s, n, P_f, voie}$ pour la deuxième approche.

Soit la fonction ACTION qui prend la valeur 1 si le véhicule commence son changement de voie et 0 sinon. Cette fonction prend les indices suivants :

- n , le numéro du véhicule,
- $voie_c$, la voie courante,
- $voie_d$, la voie de destination (ou cible),

soit ACTION $_{n, voie_c, voie_d}$.

La relation entre $\hat{k}_{\hat{V}_s, n, \hat{P}_f, \hat{voie}}$ et $k_{V_s, n, P_f, voie}$ peut avoir les formes suivantes :

$$\hat{k}_{4,2,2,2} = \text{ACTION}(t_1)_{2,1,2} \times (1 - k_{1,2,2,1}) \quad (1.46)$$

avec t_1 le temps de changement de voie et $\hat{k}_{4,2,2,2}$ le contact estimé entre les véhicules 2 et 4. Puisque le véhicule commence son changement de la voie 1, alors ACTION $(t_1)_{2,1,2} = 1$.

Le contact entre le véhicule 2 et le véhicule 1 dans la voie 1, $k_{1,2,2,1}$ peut varier dans le temps suivant les deux lois suivantes :

$$k_{1,2,2,1} = \exp(-t + t_1), \quad (1.47)$$

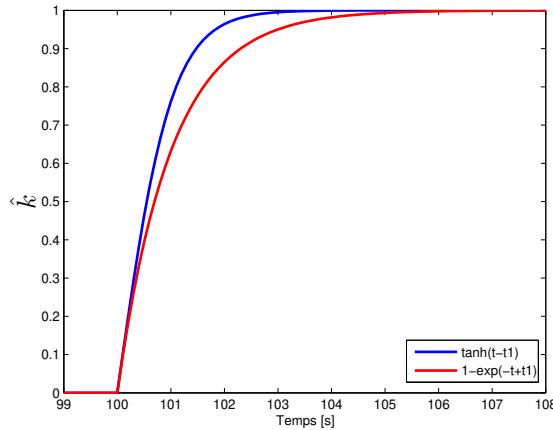
et

$$k_{1,2,2,1} = 1 - \tanh(t - t_1), \quad (1.48)$$

La figure 1.9 présente la variation de $\hat{k}_{4,2,2,2}$ en fonction du temps. Dans l'exemple (1.47), la durée du changement de voie est égale à $\tau_1 = 5$ s. Avec l'exemple (1.48) cette durée est égale à $\tau_2 = 5$ s. Notons que τ_2 est une caractéristique du véhicule et du conducteur. Par exemple, un conducteur sportif avec un véhicule puissant change de voie plus rapidement.

1.3.3.3 Conclusions

Cette sous-section a présenté un modèle matriciel d'un trafic dans une portion à deux voies avec la possibilité de changements de voies. Cette représentation a permis de modéliser le contact

FIGURE 1.9 – $\hat{k}(t)$ lors d'un changement de voie

entre les véhicules dans un trafic à deux voies. En plus, ce modèle de trafic permet de prendre en compte toutes les répartitions possibles à partir d'un ensemble initial de véhicules. À travers ce modèle, la gestion macroscopique du trafic est possible selon la commande du paramètre de contact $k_{V_s, n, P_i, voie}$. En effet, une file peut être divisée en deux ou plusieurs files si on fixe le paramètre k à zéro.

1.3.4 Conclusions

Cette section a été répartie en deux. Dans sa première partie, le modèle de [Kesting, 2008], MOBIL, a été choisi pour la gestion du changement de voie dans notre simulateur de trafic mixte. Dans la deuxième partie, un nouveau modèle matriciel représentatif du trafic à deux voies a été élaboré. Ce modèle prend en considération toutes les possibilités de la répartition des véhicules dans le trafic.

1.4 Modèle macroscopique pour le trafic

La modélisation macroscopique du trafic permet de caractériser son comportement global par le biais de trois paramètres en l'occurrence la vitesse, la capacité (ou débit) et la densité. Ces paramètres sont définis comme suit :

- le débit $Q(x, t)$, est le nombre de véhicules qui passent par un point x pendant un intervalle de temps. Son unité est le nombre de véhicule par unité de temps (e.g. veh.h⁻¹) ;
- la densité (ou la concentration) $D(x, t)$, le nombre de véhicule sur une section $[x, x + \Delta x]$ du réseau à un instant t . Son unité est le nombre de véhicule par unité de longueur (e.g : veh.km⁻¹ ou veh.m⁻¹) ;
- la vitesse moyenne $V(x, t)$, la vitesse moyenne des véhicules sur une section $[x, x + \Delta x]$ à un instant t . Elle est exprimée en unité de longueur par unité de temps (e.g. m.s⁻¹ ou km.h⁻¹).

L'application des modèles macroscopiques couvre la simulation du trafic pour la gestion des infrastructures et de la dynamique du trafic ainsi que l'évaluation des politiques de ces gestions

a posteriori.

1.4.1 Introduction et contexte d'études

La modélisation macroscopique du trafic s'appuie fondamentalement sur l'analogie avec la mécanique des fluides. Cette dernière permet de synthétiser une première relation de base entre les trois variables à savoir la densité $D(x, t)$, la capacité $Q(x, t)$ et la vitesse $V(x, t)$. Cette relation se présente comme suit :

$$Q(x, t) = D(x, t) \times V(x, t). \quad (1.49)$$

Une deuxième équation qui découle de cette analogie est celle de la conservation. Cette équation à dérivé partielle est donnée par :

$$\frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} + \frac{\partial D(x, t)}{\partial t} = 0 \quad (1.50)$$

La troisième équation est connu par celle du diagramme fondamental. Elle introduit une relation entre la densité $D(x, t)$ et la vitesse $V(x, t)$ du trafic. Elle est donnée par :

$$V(x, t) = V_e(D(x, t)), \quad (1.51)$$

avec V_e la vitesse du trafic à l'équilibre.

Ainsi, chaque modèle macroscopique de trafic est basé essentiellement sur le système composé par les équations (1.49), (1.50) et (1.51), soit

$$\begin{cases} Q(x, t) = D(x, t) \times V(x, t) \\ \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} + \frac{\partial D(x, t)}{\partial t} = 0 \\ V(x, t) = V_e(D(x, t)) \end{cases} \quad (1.52)$$

[Lighthill and Whitham, 1955] ainsi que [Richards, 1956] ont introduit simultanément le premier modèle macroscopique du trafic. Ce modèle permet de condenser les équations du système (1.52) en une seule équation aux dérivées partielles hyperbolique donné sous la forme suivante :

$$\frac{\partial D(x, t)}{\partial t} + Q'_e(D(x, t)) \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} = 0 \quad (1.53)$$

où $Q_e(D(x, t)) = D(x, t) \times V_e(D(x, t))$.

La forme de la fonction de la vitesse à l'équilibre V_e est obtenue grâce au diagramme fondamental. Ce modèle rentre dans la classe des modèles de premier ordre du trafic. Ce type de modèle considère que les états du trafic sont des états d'équilibre et que ce modèle évolue d'un état d'équilibre à un autre. Dans ce cas son accélération est nulle.

L'équation (1.53) peut être résolu de deux façons. La première est analytique, qui donne une solution exacte et la deuxième façon est numérique qui donne une solution approché.

Une deuxième classe de modèles permet de décrire les états transitoires du trafic. Ces modèles sont appelés de second ordre puisqu'ils tiennent en compte l'accélération du flux de véhicules. Le premier modèle de trafic de second ordre a été proposé par [Payne, 1971].

Dans cette partie, nous traitons le cas de modèles de premier ordre et particulièrement les diagrammes fondamentales du trafic à travers la relation vitesse - densité. Dans la littérature, deux types de modèles vitesse-densité peuvent être distingués : les modèles stochastiques et les

modèles déterministes.

La structure stochastique de la relation vitesse-densité a fait l'objet de plusieurs travaux à savoir ceux développés par [Soyster and Wilson, 1973], [Kharoufeh and Gautam, 2004] et [Wang et al., 2011]. Cependant, il est difficile de décrire le comportement stochastique d'un trafic puisque l'influence du bruit est très importante sur la mesure de la vitesse ainsi que la densité. Par conséquent, il est difficile de synthétiser un modèle stochastique vitesse-densité malgré sa véritable représentativité.

Les modèles déterministes vitesse-densité sont basés sur les lois physiques pour décrire le comportement macroscopique du trafic. Les diagrammes de [Greenshields, 1934], de [Pipes, 1967] ou de [Drew, 1968] sont parmi les premiers travaux sur cette classe de modèles.

Le prochain paragraphe présente un bref état-de-l'art des modèles vitesse-densité déterministes dans l'ordre chronologique. Ensuite, une nouvelle méthode de synthèse de modèle vitesse-densité a été introduite dans le troisième paragraphe. Enfin, un nouveau modèle macroscopique vitesse-densité a été synthétisé dans le quatrième paragraphe.

1.4.2 État-de-l'art des modèles vitesse-densité

Cette sous-section présente, dans l'ordre chronologique, les modèles vitesse - densité issus de la littérature, les plus représentatifs. Notons que les diagramme fondamentaux présentés dans cette section sont relatifs à une file de véhicules. Avec cette approche, nous allons retrouver les avantages et les inconvénients de chaque modèle macroscopique décrits dans la littérature.

1.4.2.1 Modèle de Greenshields

À notre connaissance, le premier modèle déterministe vitesse-densité a été proposé par [Greenshields, 1934]. Ce modèle est donné par l'expression

$$V(D) = V_{\max} \left(1 - \frac{D}{D_{\max}} \right), \quad (1.54)$$

où D est la densité du trafic, D_{\max} la densité maximale et V la vitesse du trafic. La densité maximale du trafic est calculée lorsque ce dernier est à l'état de congestion.

Ce modèle affine a été identifié par la méthode de régression linéaire à l'aide de sept observations expérimentales. Ces dernières sont collectées sur une voie dans une route urbaine à deux voies. La majorité de ces points sont pris à une vitesse inférieure à 50 km.h^{-1} [Hall et al., 1992].

L'équation du diagramme fondamental de [Greenshields, 1934] s'écrit sous la forme suivante :

$$Q(D) = D \cdot V_{\max} \left(1 - \frac{D}{D_{\max}} \right), \quad (1.55)$$

[Wang et al., 2009] ont montré qu'avec plus de sept observations, ce modèle est incapable de prédire la vitesse et la densité. En effet, si la relation vitesse - densité est non linéaire, le modèle de [Greenshields, 1934] engendre des erreurs assez importantes.

La figure 1.10 représente le diagramme de [Greenshields, 1934] relatif à une densité de file comprise entre 0 et 1. Dans cet exemple, on remarque l'existence de deux principales parties à savoir celle qui correspond à un trafic congestionnée (densités élevées) et celle qui correspond à un trafic fluide (densités faibles). La limite entre les deux parties coïncide avec un état critique caractérisé par un débit Q_c de trafic maximale à une densité égale à la moitié de la densité maximale, notée D_c . D'après [Bourrel, 2003], l'analyse de données expérimentales du trafic montre que la valeur de D_c est généralement compris entre $0.2 \times D_{\max}$ et $0.3 \times D_{\max}$. Ce qui représente un autre

inconvenient du modèle de [Greenshields, 1934] et, pour cette raison, d'autres modèles ont été développés.

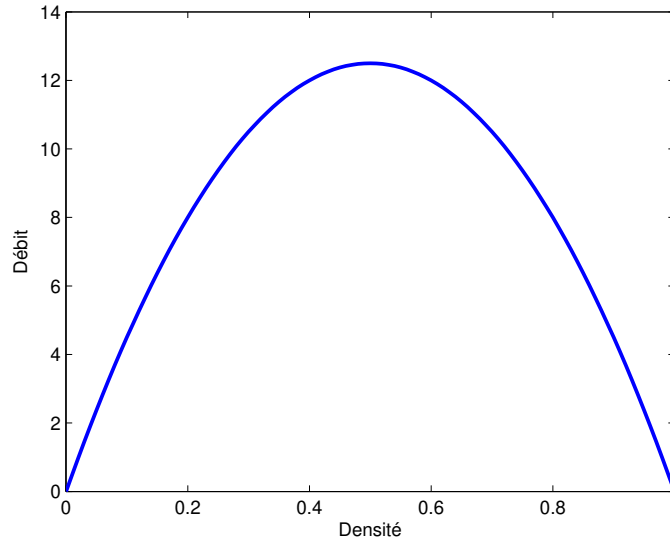


FIGURE 1.10 – Diagramme fondamental de [Greenshields, 1934] ($V_{\max} = 50 \text{ km.h}^{-1}$)

1.4.2.2 Modèle de Greenberg

En faisant l'analogie avec la théorie des fluides, [Greenberg, 1959] a développé une relation logarithmique vitesse-densité donnée par

$$V(D) = V_{\max} \log \left(\frac{D_{\max}}{D} \right). \quad (1.56)$$

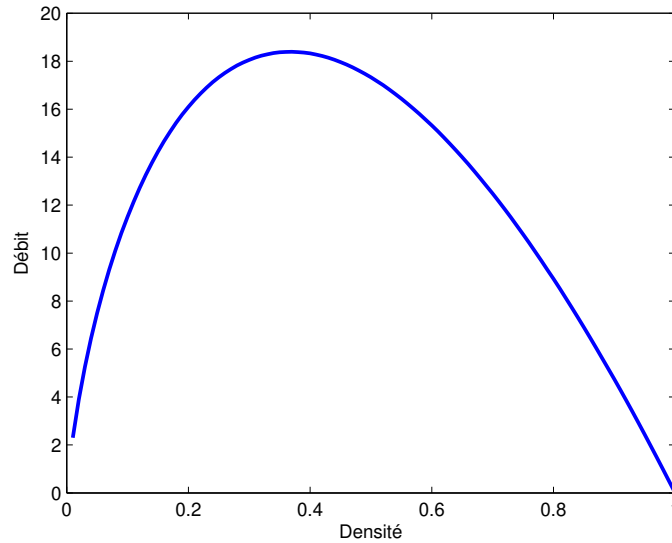
La figure 1.11 représente le diagramme fondamental de [Greenberg, 1959]. D'après cette figure, la densité critique D_c du trafic est égale à 0,3680. Cette valeur est inférieure à celle introduite par [Greenshields, 1934], ce que constitue une amélioration de son modèle. Toutefois elle reste supérieure à la valeur $0,3 \times D_{\max}$ fixée par [Bourrel, 2003] à travers son étude expérimentale.

Le principal inconvénient de ce modèle est son incapacité à prédire la vitesse pour de faibles densités. En effet, la vitesse tend vers l'infini lorsque la densité tend vers zéro d'après l'équation (1.56).

1.4.2.3 Modèle de Underwood

[Underwood, 1961] a développé un modèle exponentiel pour pallier les inconvénients des modèles de [Greenberg, 1959] et de [Greenshields, 1934] dans le cas où le trafic est libre (faible densité et vitesse élevée). Ce modèle est donné par

$$V(D) = V_{\max} \exp \left(-\frac{D}{D_{\max}} \right). \quad (1.57)$$

FIGURE 1.11 – Diagramme fondamental de [Greenberg, 1959] ($V_{\max} = 50 \text{ km.h}^{-1}$)

Le principal inconvénient de ce modèle est que la vitesse devient nulle seulement lorsque la densité D tend vers l'infini et non $D = D_{\max}$. Par conséquent, ce modèle ne peut pas être utilisé pour prédire la vitesse à haute densité.

1.4.2.4 Modèle de Newell

[Newell, 1961] a développé un modèle vitesse-densité donné par l'expression suivante :

$$V(D) = V_{\max} \left(1 - \exp \left(-\frac{\lambda}{V_{\max}} \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{D_{\max}} \right) \right) \right), \quad (1.58)$$

où λ est la pente de la courbe interdistance/vitesse à l'origine.

Ici, quand $D = D_{\max}$, alors $V = 0 \text{ km.h}^{-1}$. Lorsque $D = 0 \text{ Veh.km}^{-1}$ alors $V = V_{\max}$. Par conséquent, les conditions aux limites sont vérifiées par ce modèle.

1.4.2.5 Modèle de Drake

[Drake et al., 1967] ont amélioré le modèle de [Greenberg, 1959] par l'étude de différents modèles macroscopiques de trafic. Ils proposent la nouvelle relation vitesse-densité donnée par l'expression suivante :

$$V(D) = V_{\max} \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^2 \right). \quad (1.59)$$

Selon [Ardekani et al., 2011], ce modèle présente une meilleure interpolation des données que les modèles de Greenshields, Greenberg et Underwood pour un trafic non congestionné (libre). Par contre, dans le cas où le trafic est congestionné, le modèle de Drake présente une erreur importante dans l'interpolation des données.

1.4.2.6 Modèle de Pipes

[Pipes, 1967] a généralisé le modèle de Greenshield par le biais d'une nouvelle relation vitesse-densité donnée par

$$V(D) = V_{\max} \left(1 - \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^r \right)^m. \quad (1.60)$$

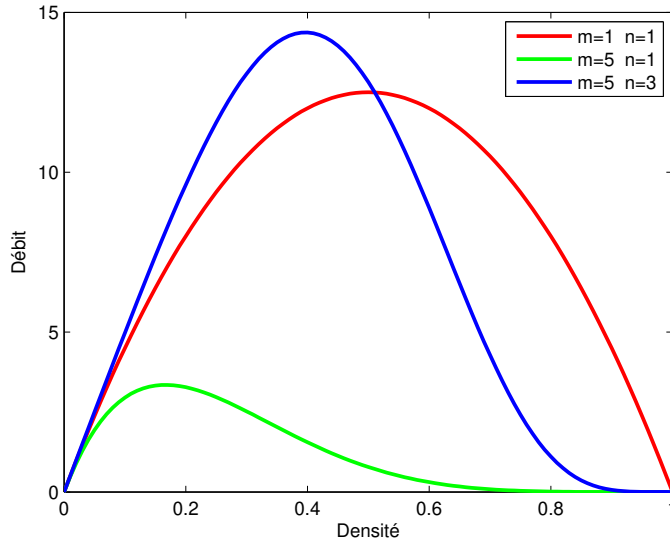


FIGURE 1.12 – Diagramme fondamental de [Pipes, 1967] ($V_{\max} = 50 \text{ km.h}^{-1}$)

D'après l'équation (1.60), en faisant varier les paramètres r et m , une famille de modèles peut être synthétisée. Par exemple, le modèle de Greenshields est obtenu en fixant $r = 1$ et $m = 1$. La figure 1.12 représente le diagramme fondamental de Pipes pour différentes valeurs de r et m . D'après cette figure, une augmentation de la valeur de r augmente le débit maximum et change aussi la valeur de la densité critique. La courbe en rouge représente le diagramme fondamental de Greenshields.

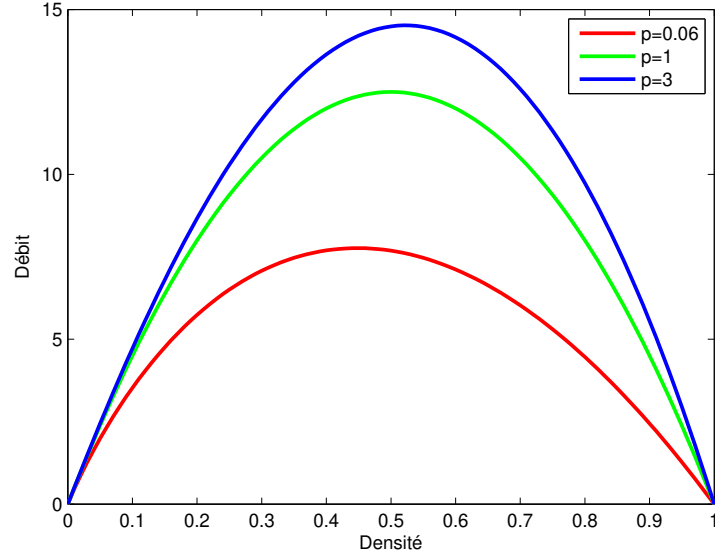
1.4.2.7 Modèle de Drew

[Drew, 1968] a proposé un nouveau modèle donné par l'expression suivante :

$$V(D) = V_{\max} \left(1 - \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^{\frac{p+1}{2}} \right). \quad (1.61)$$

La figure 1.13 représente le diagramme fondamental de Drew pour différentes valeurs de p . Pour $p = 1$, on trouve le diagramme de Greenshields. D'après cette figure, la variation de la valeur de p ne change que la valeur maximale du débit alors que la densité critique D_c est toujours supérieur à $0,3 \times D_{\max}$ malgré les différents choix de la valeur de p .

Selon [Ardekani et al., 2011], lorsque le trafic est libre, ce modèle présente une sous-estimation de la vitesse. Alors que dans le cas où le trafic est congestionné, la vitesse est sur-estimée.

FIGURE 1.13 – Diagramme fondamental de [Drew, 1968] ($V_{\max} = 50 \text{ km.h}^{-1}$)

1.4.2.8 Modèle de Del Castillo

[Del Castillo and Benitez, 1995] ont développé un nouveau modèle vitesse-densité donné par l'expression suivante :

$$V(D) = V_{\max} \left(1 - \exp \left(\frac{|C_j|}{V_{\max}} \left(1 - \frac{D_{\max}}{D} \right) \right) \right), \quad (1.62)$$

où C_j est la vitesse de l'onde cinématique donnée par

$$C_j = D_{\max} \frac{dV(D)}{dD} \Big|_{D=D_{\max}}. \quad (1.63)$$

Selon [MacNicholas and Michael, 2008], l'inconvénient de ce modèle est la grande plage de vitesse de l'onde cinématique qui rend difficile son estimation.

Si $D_{\max} = 1$ et $|C_j| = \lambda$, on obtient le modèle de [Newell, 1961].

1.4.2.9 Modèle de Aerde

[Aerde, 1995] a développé un nouveau modèle vitesse-densité basé sur un modèle de poursuite. En estimant la densité à partir de la vitesse et des données du trafic, ce modèle est donné par l'expression suivante :

$$D(V) = \frac{1}{c_1 + \frac{c_2}{V_{\max} - V(t)} + c_3 V(t)}, \quad (1.64)$$

où c_1 , c_2 et c_3 sont des constantes de calibration.

1.4.2.10 Modèle de Mac Nicholas

[MacNicholas and Michael, 2008] ont développé le modèle suivant :

$$V(D) = V_{\max} \left(\frac{D_{\max}^q - D^q}{D_{\max}^q + mD^q} \right), \quad (1.65)$$

où m et q sont des constantes réelles. En variant ces constantes, une famille de modèles peut être développée. Par exemple, le modèle de Drew est obtenu si $D_{\max} = 1$, $m = 0$ et $q = \frac{p+1}{2}$.

1.4.2.11 Synthèse

Le tableau 1.11 synthétise les références et les modèles cités dans cette sous-section. V_{\max} est la vitesse maximale, D_{\max} la densité maximale, λ est la pente de la courbe interdistance-vitesse à $V = 0 \text{ km.h}^{-1}$, c_1 , c_2 , c_3 , m , p , q et r des constantes et C_j est la vitesse de l'onde cinématique.

TABLE 1.11 – Synthèse des modèles

Références	Modèles
[Greenshields, 1934]	$V(D) = V_{\max} \left(1 - \frac{D}{D_{\max}} \right)$
[Greenberg, 1959]	$V(D) = V_{\max} \log \left(\frac{D_{\max}}{D} \right)$
[Underwood, 1961]	$V(D) = V_{\max} \exp \left(-\frac{D}{D_{\max}} \right)$
[Newell, 1961]	$V(D) = V_{\max} \left(1 - \exp \left(-\frac{\lambda}{V_{\max}} \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{D_{\max}} \right) \right) \right)$
[Drake et al., 1967]	$V(D) = V_{\max} \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^2 \right)$
[Pipes, 1967]	$V(D) = V_{\max} \left(1 - \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^r \right)^m$
[Drew, 1968]	$V(D) = V_{\max} \left(1 - \left(\frac{D}{D_{\max}} \right)^{\frac{p+1}{2}} \right)$
[Del Castillo and Benitez, 1995]	$V(D) = V_{\max} \left(1 - \exp \left(\frac{ C_j }{V_{\max}} \left(1 - \frac{D_{\max}}{D} \right) \right) \right)$
[Aerde, 1995]	$D(V) = \frac{1}{c_1 + \frac{c_2}{V_{\max} - V(t)} + c_3 V(t)}$
[MacNicholas and Michael, 2008]	$V(D) = V_{\max} \left(\frac{D_{\max}^q - D^q}{D_{\max}^q + mD^q} \right)$

La prochaine section est destinée à générer les données macroscopiques à partir du modèle microscopique IDM.

1.4.3 Du microscopique au macroscopique

L'objectif de cette sous-section consiste à étudier la sensibilité des paramètres macroscopiques par rapport aux paramètres microscopiques. En se basant sur la simulation microscopique du trafic, l'évolution temporelle de la densité et de la vitesse de la file est réalisée. Le modèle Intelligent Driver Model (IDM) est utilisé pour modéliser le mouvement longitudinal du véhicule. À partir de la simulation, les positions, les vitesses et les accélérations de chaque véhicule dans la file, sont enregistrés. À partir de ces données, les paramètres macroscopiques à savoir la densité et la vitesse de la file sont calculés.

Dans cette sous-section, le premier paragraphe présente les hypothèses adoptées dans la simulation. Le deuxième paragraphe présente la démarche de nos travaux. Le troisième paragraphe présente les résultats de la simulation. Le dernier paragraphe présente la conclusion de cette sous-section.

1.4.3.1 Hypothèses de simulation

- Afin de réduire la complexité du problème, les hypothèses suivantes sont prises en compte :
- Trafic à une seule voie. En effet, la relation entre la vitesse et la densité peut être vue sur deux voies comme sur une seule (lorsque la vitesse augmente la densité diminue et vice versa).
 - Seul le mouvement longitudinal est pris en compte. Cette hypothèse est une conséquence de la première hypothèse.
 - Trafic homogène : le même modèle microscopique longitudinal IDM avec les mêmes paramètres est utilisé pour les différents véhicules de la simulation.

Nous estimons que les hypothèses présentées sont suffisantes pour générer des données macroscopiques représentatives d'un trafic réel. En effet, les valeurs des paramètres du modèle IDM sont issues d'une étape de calibration faite par [Kesting, 2008] à travers des données expérimentales d'un trafic réel. De plus, les situations de congestion (densité maximale et vitesse minimale) et de trafic libre (densité minimale et vitesse maximale) peuvent se présenter dans un trafic à deux voies comme celui à une seule voie.

1.4.3.2 Démarches de simulation

Dans ce paragraphe, deux objectifs sont fixés. Le premier consiste à étudier la sensibilité de la vitesse et de la densité par rapport aux paramètres microscopiques. Ces paramètres sont l'accélération maximale a_n , la décélération désirée b_n et le temps de sécurité en amont T_n .

Soit la file de N véhicule(s) représentée par la figure 1.14. Cette file homogène évolue sur une seule voie dans le trafic.

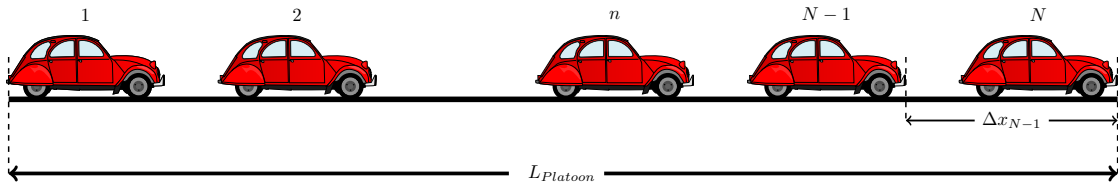


FIGURE 1.14 – Positions des véhicules dans la file

Modèle ACC

Le mouvement de ces véhicules est gouverné par le modèle Intelligent Driver Model (IDM) présenté à la page 37. À titre de rappel, les équations de ce modèle sont données par :

$$\dot{v}_n = a_n \cdot \left(1 - \left(\frac{v_n}{v_n^0} \right)^4 - \left(\frac{s^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n} \right)^2 \right), \quad (1.66)$$

avec, a_n l'accélération maximale du véhicule n [m.s^{-2}], v_n la vitesse du véhicule n [m.s^{-1}], v_n^0 la vitesse désirée du véhicule n [m.s^{-1}], Δv_n la vitesse relative du véhicule n par rapport à son meneur $n + 1$ [m.s^{-1}], s_n l'interdistance nette [m] définit par

$$s_n = \Delta x_n - \ell_{n+1}. \quad (1.67)$$

L'interdistance optimale du véhicule n , s_n^* , est donnée par

$$s^*(v_n, \Delta v_n) = s_n^0 + T_n v_n - \frac{v_n \Delta v_n}{2\sqrt{a_n b_n}}, \quad (1.68)$$

où b_n est la décélération désirée du véhicule n [m.s^{-2}], s_n^0 l'interdistance à l'arrêt du véhicule n [m] et T_n le temps de sécurité en amont du véhicule n [s].

Les entrées de ce modèle sont la vitesse désirée v_n^0 et le temps de sécurité en amont T_n . Rappelons que le choix du modèle IDM dans nos simulations a été basé sur le critère de l'intuitivité des paramètres ainsi que leurs disponibilités dans la littérature. Les paramètres relatifs au modèle IDM, utilisés dans nos simulations, sont donnés par le tableau 1.12.

Les paramètres de simulation sont donnés par le tableau 1.13. Notons que l'interdistance à l'arrêt est la même que l'interdistance à la congestion. Dans le cadre de nos simulations, le paramètre s_n^0 est fixé à zéro afin d'avoir une densité maximale égale à l'unité.

À chaque pas de simulation, la densité de la file ainsi que sa vitesse sont calculées comme suit :

TABLE 1.12 – Paramètres de simulation du modèle IDM [Kesting, 2008]

Paramètre	Valeur	Unité
Vitesse désirée v_n^0	50,00	km.h^{-1}
Interdistance à l'arrêt s_n^0	0	m
Accélération maximale a_n	3,00	m.s^{-2}
Décélération désirée b_n	3,00	m.s^{-2}
Temps de sécurité en amont T_n	1,50	s

TABLE 1.13 – Paramètres de simulation

Paramètre	Valeur	Unité
Nombre de véhicule	20,00	véhicule
Temps de simulation	1000	s
Pas de simulation	0,01	s
Interdistance initiale	0	m
Accélération initiale	0	m.s^{-2}
Vitesse initiale	0	km.h^{-1}
Longueur du véhicule	5	m

Calcul de la densité et de la vitesse

Dans la section 1.4.2.11, on remarque que la densité est toujours normalisée par la densité à la congestion D_{\max} . Dans cette partie, une approche de normalisation est proposée. Elle consiste à calculer la densité relative à la file de véhicules limitée par le véhicule de tête et le dernier véhicule. Ainsi, la densité normalisée s'exprime sous la forme suivante :

$$d(t) = \frac{\ell \cdot N}{L_{\text{platoon}}(t)}, \quad (1.69)$$

où ℓ est la longueur moyenne du véhicule, N le nombre de véhicule dans la file et L_{platoon} la longueur de la file.

Ici, la densité est comprise entre 0 et 1. On a donc, $d = \frac{D}{D_{\max}}$, avec $D_{\max} = 1$. Pour cette raison, la densité d sera notée D dans la suite de ce document.

La vitesse de la file, v , est la vitesse moyenne des véhicules dans la file. Elle est donnée par

$$v(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n(t), \quad (1.70)$$

où v_n est la vitesse du véhicule n .

Pour étudier la sensibilité des paramètres macroscopiques par rapport aux paramètres microscopiques, la démarche de simulation décrite ci-dessus est répétée pour chaque valeur de l'accélération maximale du véhicule a_n , la décélération désirée b_n et le temps de sécurité en amont T_n . On fait alors varier un seul paramètre et on fixe les deux autres. Les intervalles de ces paramètres sont donnés par [Kesting, 2008] comme suit :

- $a_n \in [2 \text{ m.s}^{-2} ; 7 \text{ m.s}^{-2}]$,
- $b_n \in [2 \text{ m.s}^{-2} ; 5 \text{ m.s}^{-2}]$,
- $T_n \in [1,5 \text{ s} ; 4 \text{ s}]$.

Les données vitesse-temps et densité-temps sont interpolées à partir des moindres carrés non linéaires.

1.4.3.3 Résultats de simulation et discussion

La figure 1.15 présente la densité en fonction du temps (courbe 1) et la vitesse en fonction du temps (courbe 2) durant 1000 secondes de simulation. Les paramètres du modèle IDM utilisés pour générer les données de ces deux courbes sont donnés par le tableau 1.12. À partir de ces deux courbes, on remarque que la vitesse et la densité sont deux fonctions non linéaires par rapport au temps. Ces données sont corrolés avec les résultats trouvés de la littérature. De plus, on remarque que lorsque la vitesse de la file diminue sa densité augmente et vice versa.

Sensibilité de la densité par rapport aux paramètres a_n , b_n , et T_n

Dans ce paragraphe, on note que la file est homogène : tous les véhicules sont représentés par le même modèle et les mêmes paramètres.

Comme le montre la figure 1.16, l'accélération maximale du véhicule et la décélération désirée n'ont pas d'impact sur la densité de la file. En effet, lorsque la file devient stable, on a $\Delta v_n = 0, \forall n \in \{1..N\}$. Par conséquent, le terme $\frac{v_n \Delta v_n}{2\sqrt{a_n b_n}} = 0$. À cet égard, la décélération

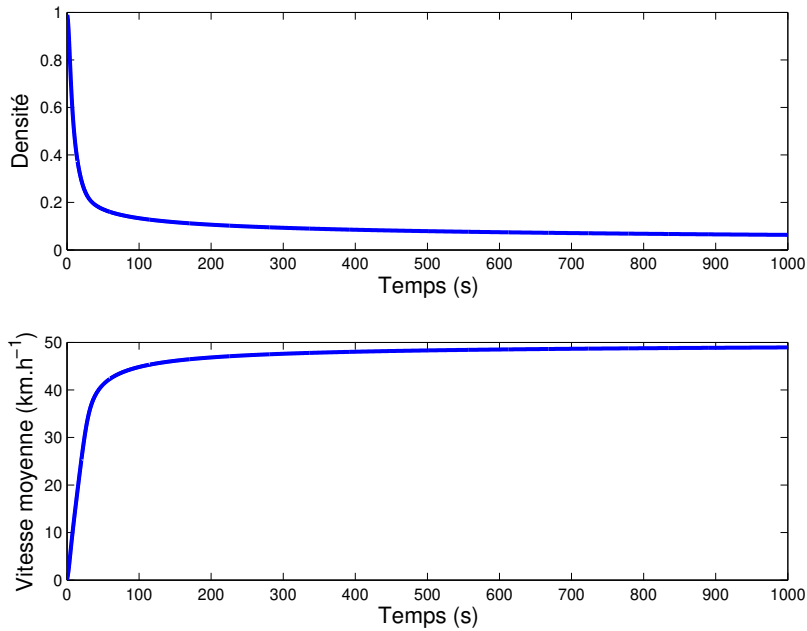


FIGURE 1.15 – Vitesse et densité en fonction du temps

désirée b_n n'a pas d'impact sur la densité.

Par contre, le temps de sécurité en amont a un impact sur la densité. Lorsque T_n augmente, la densité de la file diminue. Les véhicules sont censés avoir plus d'interdistance lorsque T_n est grand, et par conséquent la densité de la file diminue.

Sensibilité de la vitesse par rapport aux paramètres a_n , b_n , et T_n

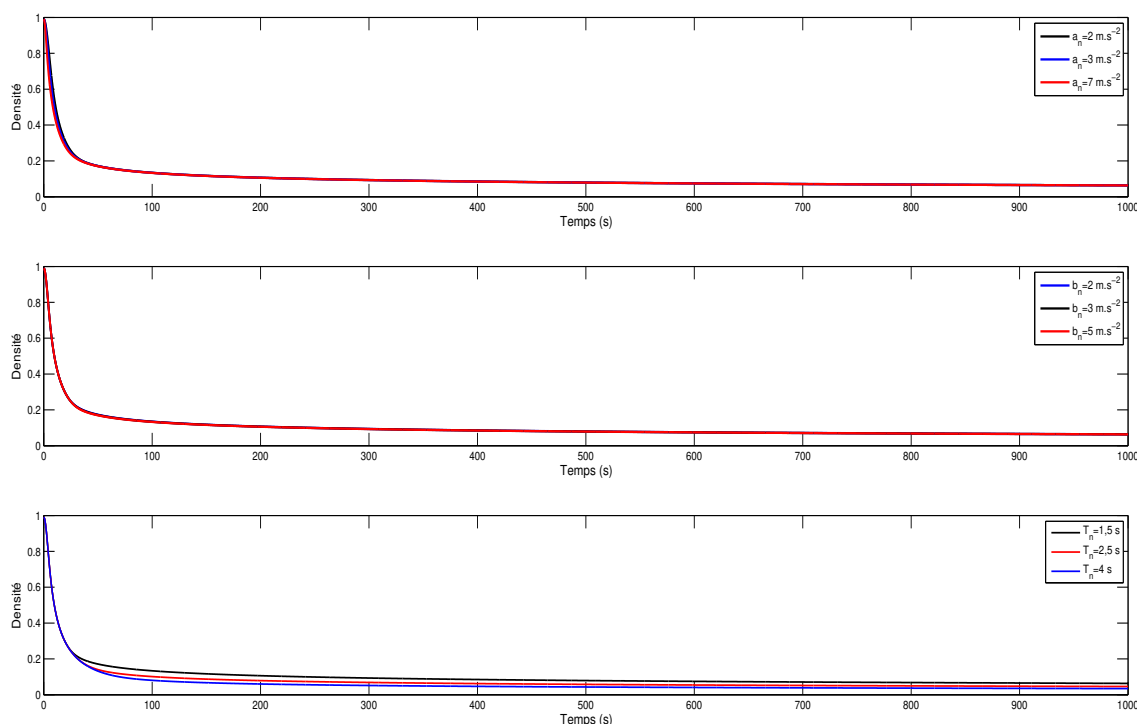
Comme le montre la figure 1.17, l'accélération maximale et la décélération désirée n'ont pas d'impact sur la vitesse de la file. En effet, lorsque la file devient stable, on a $\Delta v_n = 0, \forall n \in \{1..N\}$. Par suite, le terme $\frac{v_n \Delta v_n}{2\sqrt{a_n b_n}} = 0$. Par conséquent, la décélération désirée b_n n'a pas d'impact sur la vitesse de la file.

Le temps de sécurité en amont T_n du véhicule n a un impact sur la vitesse de la file : lorsque T_n diminue, la vitesse de la file augmente. En effet, les véhicules accélèrent pour atteindre la vitesse désirée tout en gardant le temps de sécurité en amont fixé avant le démarrage.

Courbe vitesse-densité

La figure 1.18 présente les données de la vitesse et de la densité obtenues à travers la simulation du modèle IDM. Sur cette figure, la vitesse de la file augmente lorsque la densité diminue. Quand la vitesse du trafic diminue, la densité augmente et la file arrive à l'état de sa saturation. Ainsi, ces résultats, existants dans la littérature, sont retrouvés à partir des paramètres de simulation fixés.

La prochaine section présente une nouvelle méthode de synthèse d'un modèle vitesse-densité qui présente un minimum d'erreur dans l'interpolation des données issues de la simulation pré-

FIGURE 1.16 – Densité de la file pour différentes valeurs de a_n , b_n et T_n

sentées dans la figure 1.18.

1.4.3.4 Conclusions

Dans ce paragraphe, une étude de la sensibilité des paramètres microscopiques par rapport aux paramètres macroscopiques a été réalisée. Les résultats montrent que seul le temps de sécurité en amont T_n a un impact sur la densité et la vitesse du trafic. À partir des figures 1.17 et 1.16, le paramètre microscopique T_n peut être identifié par une interpolation entre ces courbes. Cette interpolation se fait soit sur la densité soit sur la vitesse de la file.

Les modèles macroscopiques vitesse-densité de la littérature ont montrés des limites au niveau de la prédiction de la densité dans certaines situation du trafic (libre ou congestionné). Pour cette raison, un nouveau modèle vitesse-densité est developpé.

1.4.4 Méthode de synthèse du modèle vitesse-densité

La nouvelle méthode consiste à étudier la variation au cours du temps de chacun des paramètres macroscopiques (vitesse, densité) séparément.

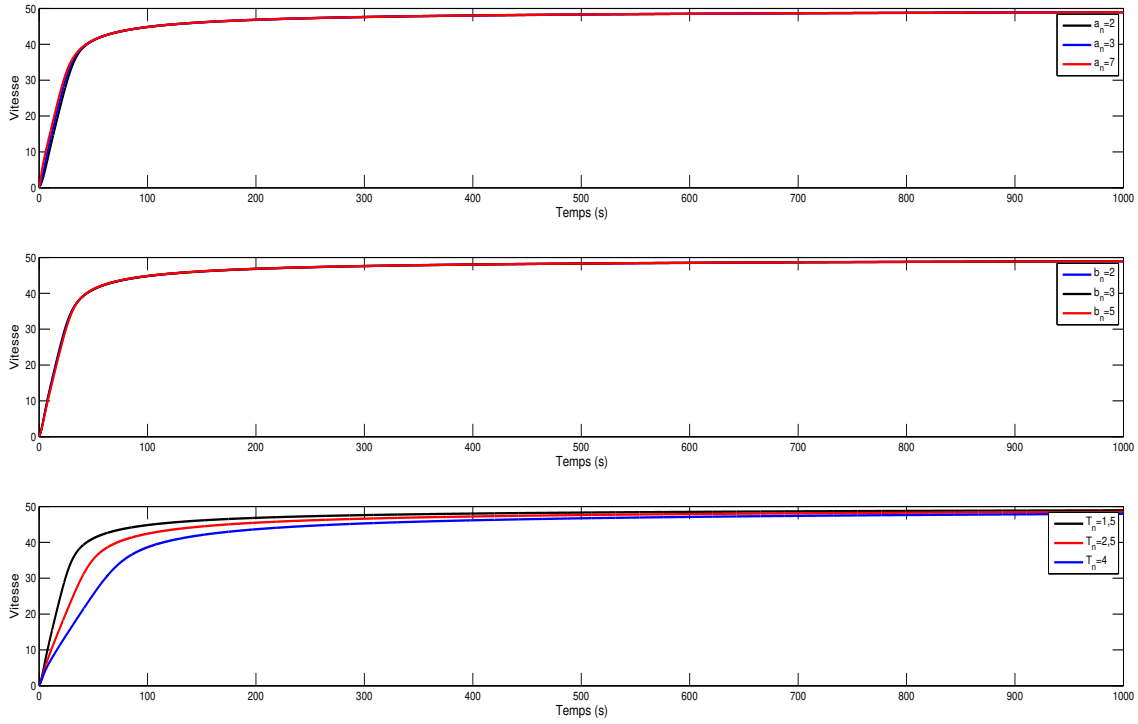


FIGURE 1.17 – Vitesse de la file pour différentes valeurs de a_n , b_n et T_n

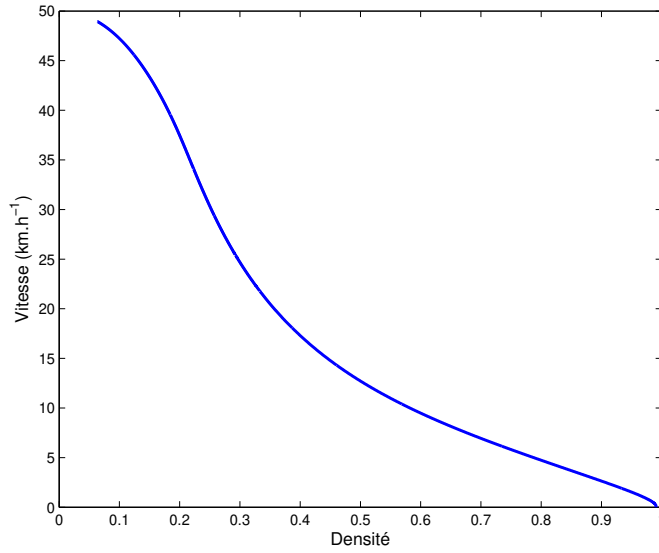


FIGURE 1.18 – Données vitesse-densité obtenues à partir de la simulation du modèle IDM

1.4.4.1 Démarches

L'objectif de ce paragraphe est l'identification des données macroscopiques, à savoir la densité et la vitesse, données par la figure 1.15. Pour mener cette étude, une famille de fonctions candidates a été choisie. Pour une valeur de γ donnée, cette famille de fonctions candidates est présentée sous la forme suivante :

$$H_\gamma = \{F/\exists(F_1, F_2, \tau_f) \in \mathbb{R}^3; F(t) = F_1 \exp\left(-\frac{t^\gamma}{\tau_f}\right) + F_2\} \quad (1.71)$$

Pour des raisons qui seront expliquées plus tard la valeur de γ est fixée pour toutes les fonctions candidates.

Soit $D \in H_\gamma$, la fonction candidate relative aux données de la densité. Son expression est donnée par

$$D(t) = D_1 \exp\left(-\frac{t^\gamma}{\tau_d}\right) + D_2, \quad (1.72)$$

où D_1 , τ_d et D_2 sont des constantes.

Soit $v \in H_\gamma$, la fonction candidate relative aux données de la vitesse. Son expression est donnée par

$$v(t) = V_1 \exp\left(-\frac{t^\gamma}{\tau_v}\right) + V_2, \quad (1.73)$$

où V_1 , τ_v et V_2 sont des constantes.

Pour avoir une expression analytique entre la vitesse et la densité, indépendante du temps, à partir des équations (1.72) et (1.73), γ est fixe pour toutes les fonctions appartenant à la famille H_γ .

Les données de la vitesse et de la densité de la figure 1.15 sont utilisées pour identifier, au sens des moindres carrés non linéaires, les fonctions v et D respectivement. À partir de la simulation, la valeur empirique de $\gamma = 0,8$, et les paramètres des deux fonctions D et v , sont donnés dans le tableau 1.14.

TABLE 1.14 – Paramètres des fonctions D et v pour $\gamma = 0,8$

Paramètre	Valeur	Unité
D_1	0,0835	-
τ_d	0,1205	s
D_2	0,9578	-
V_1	-54,5833	km.h ⁻¹
τ_v	0,0813	s
V_2	48,2047	km.h ⁻¹

La figure 1.19 montre le résultat de l'identification des fonctions de la densité D et de la vitesse v .

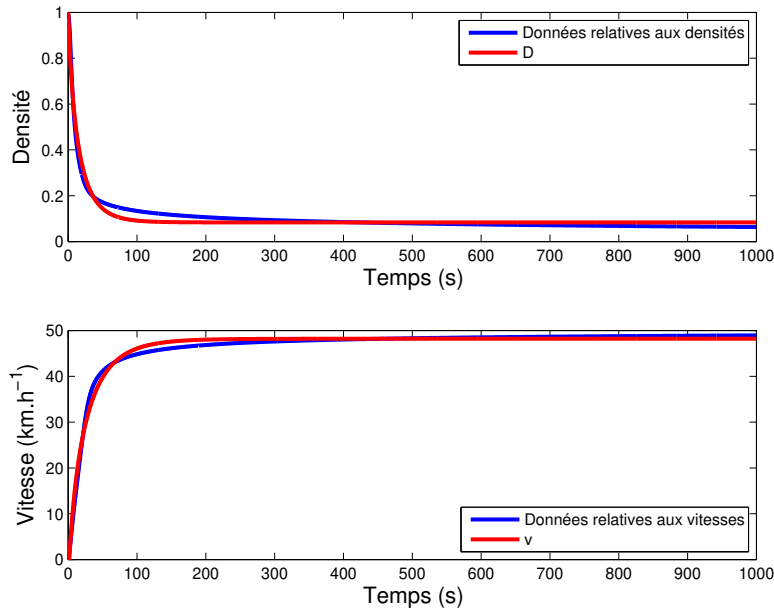


FIGURE 1.19 – Identification des fonctions D et v à partir des données macroscopiques issues de la simulation

La figure 1.20 présente l'erreur absolue entre, d'une part, les données de la densité issues de la simulation du modèle IDM et, d'autre part, les fonction D et entre les données de la vitesse et la fonction v . Les erreurs maximale et minimale sont données par le tableau 1.15. Ces erreurs sont faibles par rapport aux erreurs introduites par les modèles issus de la littérature.

TABLE 1.15 – Erreur sur la densité et sur la vitesse

Paramètre	Moyenne	Max	Min
Erreur sur la densité	0,0157	0,0786	0,00
Erreur sur la vitesse	0,6402	6,3786	0,00

1.4.4.2 Conclusions

Cette section a présenté une nouvelle méthode pour la modélisation de la densité et la vitesse. Cette méthode, différente de celles utilisées dans la littérature, consiste à identifier séparément chacune des fonctions relatives aux données de la densité et de la vitesse.

Les deux conclusions du paragraphe 1.4.3.3, concernant la sensibilité des paramètres macroscopiques par rapport aux paramètres microscopiques, peuvent maintenant être vérifiées analytiquement comme suit :

Tout d'abord, lorsque la file devient stable, on a $\Delta v_n = 0, \forall n \in \{1..N\}$. Par conséquent $\frac{v_n \Delta v_n}{2\sqrt{a_n b_n}} = 0$.

Le modèle IDM s'écrit sous la forme suivante :

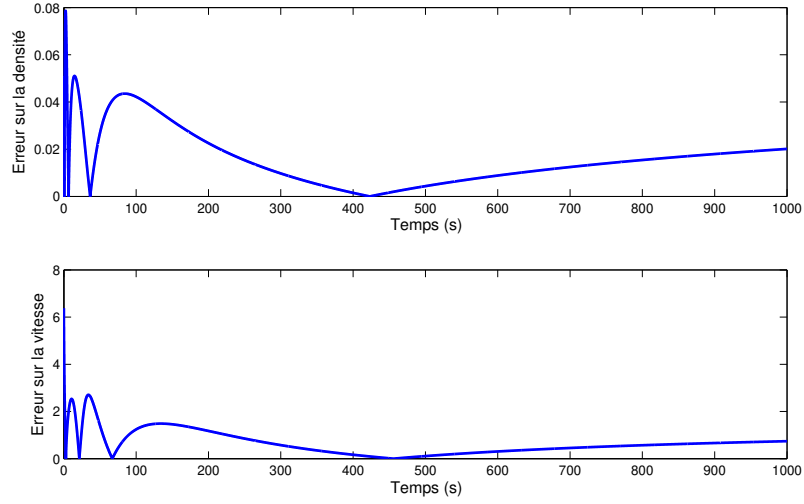


FIGURE 1.20 – Erreur absolue de la vitesse et la densité

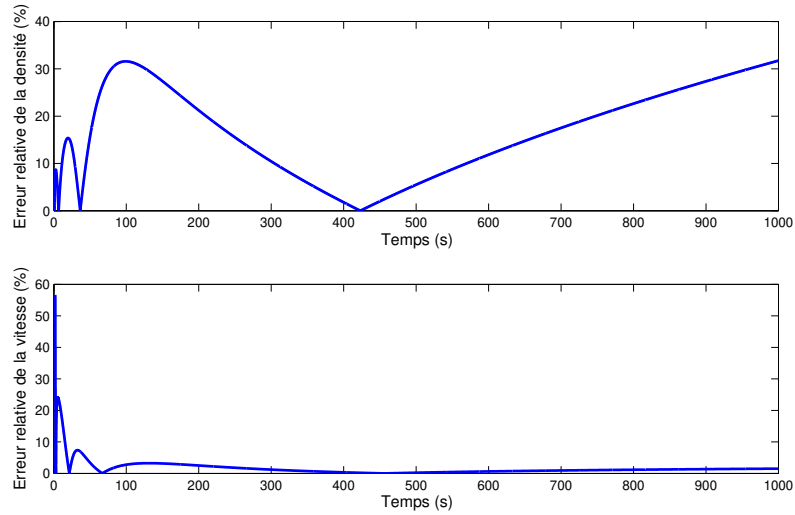


FIGURE 1.21 – Erreur relative de la vitesse et de la densité

$$\dot{v}_n = a_n \cdot \left(1 - \left(\frac{v_n}{v_n^0} \right)^4 - \left(\frac{s^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n} \right)^2 \right)$$

et

$$s^*(v_n, \Delta v_n) = s_n^0 + T_n v_n - \frac{v_n \Delta v_n}{2\sqrt{a_n b_n}}.$$

La solution de ce modèle est donnée par

$$v(t) = V_1 \exp\left(-\frac{t^\gamma}{\tau_v}\right) + V_2.$$

Quand le trafic devient stable, on a $\dot{v}_n = 0$ et $\exp(-\frac{t^\gamma}{\tau_v}) \rightarrow 0$. Donc

$$\left(\frac{T_n}{s_n}\right)^2 \cdot (v_n^0)^4 \cdot V_2^2 + V_2^4 = (v_n^0)^4. \quad (1.74)$$

Comme le montre l'équation (1.74), V_2 dépend de l'interdistance et du temps de sécurité en amont T_n . Par ailleurs, a_n et b_n n'ont pas d'impact sur la vitesse.

La prochaine section consiste à synthétiser l'expression analytique de la relation vitesse-densité en se basant sur les deux modèles de la densité et de la vitesse.

1.4.5 Synthèse du modèle générique vitesse-densité

À partir du modèle de la densité défini par l'équation (1.72) et du modèle de la vitesse défini par l'équation (1.73), un modèle générique vitesse-densité est développé.

1.4.5.1 Synthèse du modèle

Les équations (1.72) et (1.73) sont données par

$$D(t) = D_1 \exp\left(-\frac{t^\gamma}{\tau_d}\right) + D_2, \quad (1.75)$$

$$v(t) = V_1 \exp\left(-\frac{t^\gamma}{\tau_v}\right) + V_2, \quad (1.76)$$

À partir des équations (1.75) et (1.76), on a

$$\begin{cases} t^\gamma = \tau_d \ln\left(\frac{D-D_2}{D_1}\right) \\ t^\gamma = \tau_v \ln\left(\frac{V-V_2}{V_1}\right) \end{cases} \quad (1.77)$$

L'expression analytique de la relation vitesse-densité peut être écrite sous la forme suivante

$$v(D(t)) = V_1 \left(\frac{D(t) - D_2}{D_1}\right)^{\frac{\tau_d}{\tau_v}} + V_2. \quad (1.78)$$

Soit la fonction V définie comme suit :

$$V : D \rightarrow V_1 \left(\frac{D - D_2}{D_1}\right)^{\frac{\tau_d}{\tau_v}} + V_2. \quad (1.79)$$

Par abus de notation, on peut écrire $v(D(t)) = V(D)$. En effet, dans notre cas, la densité et la vitesse varient chacune au cours du temps séparément. À un instant donné, à chaque valeur de vitesse correspond une valeur de la densité. D'où cette notation.

Le modèle vitesse-densité peut alors s'écrire sous la forme suivante :

$$V(D) = V_1 \left(\frac{D - D_2}{D_1}\right)^{\frac{\tau_d}{\tau_v}} + V_2. \quad (1.80)$$

Pour calibrer ce modèle, nous allons calculer les conditions aux limites dans le prochain paragraphe.

1.4.5.2 Modèle vitesse-densité généralisé

En appliquant les conditions aux limites

$$\begin{cases} D = 1 & \Rightarrow V = 0 \\ D = 0 & \Rightarrow V = V_{\max} \end{cases} \quad (1.81)$$

à l'équation (1.80), on a

$$\begin{cases} V_1 \left(\frac{1-D_2}{D_1} \right)^{\frac{\tau_d}{\tau_v}} + V_2 = 0 \\ V_1 \left(\frac{-D_2}{D_1} \right)^{\frac{\tau_d}{\tau_v}} + V_2 = V_{\max}. \end{cases} \quad (1.82)$$

Soit

$$\begin{cases} \alpha = \left(\frac{-D_2}{D_1} \right)^{\frac{\tau_d}{\tau_v}} \\ \beta = \left(\frac{1-D_2}{D_1} \right)^{\frac{\tau_d}{\tau_v}}. \end{cases} \quad (1.83)$$

Le système défini par (1.82) peut être écrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \alpha V_1 + V_2 = V_{\max} \\ \beta V_1 + V_2 = 0. \end{cases} \quad (1.84)$$

Alors,

$$\begin{cases} V_1 = \frac{V_{\max}}{\alpha - \beta} \\ V_2 = \frac{-\beta V_{\max}}{\alpha - \beta}. \end{cases} \quad (1.85)$$

Par suite, le modèle vitesse-densité peut être exprimé comme suit :

$$V(D(t)) = \frac{V_{\max}}{\left(\frac{-D_2}{D_1} \right)^{\frac{\tau_d}{\tau_v}} - \left(1 - \frac{D_2}{D_1} \right)^{\frac{\tau_d}{\tau_v}}} \left[\left(D(t) - \frac{D_2}{D_1} \right)^{\frac{\tau_d}{\tau_v}} - \left(1 - \frac{D_2}{D_1} \right)^{\frac{\tau_d}{\tau_v}} \right] \quad (1.86)$$

où τ_d , τ_v , D_1 , D_2 sont des constantes.

À partir de ce modèle calibré, des modèles issus de la littérature définis dans la section 1.4, peuvent être déduits.

1.4.5.3 Sous-modèles

À partir du modèle vitesse-densité défini par l'équation (1.86), certains modèles existant dans la littérature peuvent être déduits en fixant quelques paramètres.

Si $D_2 = D_1$,

$$V(D) = V_{\max} (1 - D)^{\frac{\tau_d}{\tau_v}} \quad (1.87)$$

représente le modèle de [Pipes, 1967] donné par l'équation (1.60) avec $r = 1$ et $m = \frac{\tau_d}{\tau_v}$. L'avantage de notre modèle est l'attribution du sens physique au paramètre m du modèle de Pipes présenté dans la page 60. En effet, dans ce dernier les paramètres m et r sont des constantes à identifier. Par conséquent, elles n'ont pas un sens physique. Avec notre modèle, nous avons vu que le paramètre m représente le rapport entre les deux constantes de temps de la vitesse et de la densité.

Si $D_2 = D_1$ et $\tau_d = \tau_v$,

$$V(D) = V_{\max}(1 - D), \quad (1.88)$$

Les conditions, données par les équations (1.72) et (1.73), peuvent être écrites sous la forme

$$D(t) = D_1 \exp\left(-\frac{t^\gamma}{\tau_d}\right) + D_1, \quad (1.89)$$

$$V(t) = V_1 \exp\left(-\frac{t^\gamma}{\tau_v}\right) + V_2. \quad (1.90)$$

alors

$$V(D) = V_1 \left(\frac{D}{D_1} - 1 \right) + V_2. \quad (1.91)$$

Par suite, la relation entre la vitesse et la densité est affine. Dans le cas du modèle de [Greenshields, 1934], on a $V_{\max} = V_2 - V_1 = \frac{V_1}{D_1}$.

Si $D_2 = 0$, $\frac{\tau_d}{\tau_v} = \frac{p+1}{2}$ et $p \geq -1$,

$$V(D) = V_{\max} \left(1 - D^{\frac{p+1}{2}} \right), \quad (1.92)$$

qui représente le modèle de [Drew, 1968] donné par l'équation (1.61).

Comme τ_v et τ_d sont deux constantes de temps, alors $\frac{\tau_d}{\tau_v} \geq 0$. Le choix de $\frac{\tau_d}{\tau_v} = \frac{p+1}{2}$ permet d'avoir $p+1 \geq 0$ et par conséquent $p \geq -1$. Dans cette partie, la densité est exprimée sous la forme suivante :

$$D(t) = D_1 e^{-\frac{t^\gamma}{\tau_d}} + D_2, \quad (1.93)$$

Ceci implique que lorsque $t \rightarrow \infty$, $D_1 e^{-\frac{t^\gamma}{\tau_d}} \ll D_2$. Si $D_2 \rightarrow 0$, seules les faibles densités peuvent être prédites. Par suite, la vitesse peut être prédite seulement lorsque le trafic est libre et cet état correspond à des vitesses élevées. Par conséquent, le modèle ne peut pas prédire les faibles vitesses.

1.4.5.4 Conclusions

Le nouveau modèle vitesse-densité possède les avantages suivants :

- La vitesse et la densité à l'état stable peuvent être connues dès les premières secondes de simulation à l'aide de la méthode d'interpolation. Ces valeurs sont les suivantes : V_2 pour la vitesse et D_2 pour la densité dans les équations (1.75) et (1.76).
- Le modèle vitesse-densité présenté par l'équation (1.86) est générique : quelques modèles existants dans la littérature peuvent être dérivés de ce modèle.
- Comme les modèles dérivés sont calibrés pour des situations spécifiques du trafic (libre ou congestionné), le nouveau modèle vitesse-densité, défini par l'équation (1.86), peut être calibré hors ligne et être utilisé pour la prédiction de la vitesse et la densité dans les différentes situations du trafic.

1.4.6 Conclusions

Dans cette section, un état-de-l'art des modèles macroscopiques vitesse-densité a été présenté. Pour identifier les paramètres microscopiques à partir des données macroscopiques, une étape de simulation microscopique du trafic a été élaborée pour générer les données microscopiques comme

la position, la vitesse et l'accélération de chaque véhicule. En se basant sur ces paramètres et en variant les paramètres microscopiques du modèle ACC, les données macroscopiques relatives à la vitesse et la densité du trafic ont été synthétisées pour chaque valeur de paramètre microscopique. En faisant le chemin inverse et par la méthode d'interpolation, le paramètre microscopique, le temps de sécurité en amont T_n moyen, peut être identifiés à partir des données macroscopiques.

1.5 Conclusions

Ce chapitre a été réparti en trois sections.

La première section a présenté les modèles microscopiques longitudinaux du trafic. Parmi ces modèles on trouve deux types : le modèle conducteur et le modèle de véhicule automatisé. Un état-de-l'art de ces deux types de modèles a été élaboré en fixant des critères de comparaison et de choix du modèle de chaque type. Les critères de choix du modèle conducteur sont l'anticipation spatiale et temporelle, l'erreur sur l'estimation de l'interdistance et de la vitesse relative, le respect des limites réelles du véhicule en accélération et en décélération, et le respect des limites réelles de l'onde cinématique dans un scénario de démarrage. En se basant sur ces derniers, le modèle Two Velocity Difference Model (TVDM) a été retenu pour représenter le comportement du conducteur. Alors que le modèle Intelligent Driver Model (IDM) est choisi pour modéliser le mouvement longitudinal du véhicule automatisé sur la base des critères de la complexité de l'implémentation, de l'intuitivité et de la disponibilité de ses paramètres.

Dans la deuxième section, un état-de-l'art des modèles microscopiques latéraux a été présenté. Le modèle latéral « MOBIL » a été retenue pour gérer le processus de changement de voie dans le trafic. Puis, un nouveau modèle microscopique matriciel de trafic a été introduit. Ce modèle se base sur la loi du modèle IDM présenté dans la première section du chapitre. L'objectif de cette modélisation est l'étude du contact entre les véhicules dans le trafic à plusieurs voies. Dans ce document, un exemple de six véhicules répartis uniformément sur deux voies a été traité.

Dans la troisième section, un état-de-l'art des modèles macroscopiques vitesse-densité a été présenté en premier lieu. En deuxième lieu, une étape de simulation microscopique du trafic a été élaborée pour générer les données macroscopiques (densité et vitesse). En fixant deux paramètres microscopiques et en variant le troisième, des courbes de données macroscopiques sont obtenues pour chaque valeur de paramètres microscopiques. Ces derniers sont l'accélération maximale du véhicule, la décélération désirée et le temps de sécurité en amont. Les résultats montrent que seul le temps de sécurité en amont a un impact sur la densité et la vitesse du trafic. À travers les courbes obtenues, ce paramètre microscopique peut être identifié à partir des données macroscopiques. En troisième lieu, une nouvelle méthode de synthèse du modèle vitesse-densité a été mise en oeuvre. Cette méthode consiste à identifier séparément la densité et la vitesse du trafic. Le nouveau modèle vitesse-densité présente trois avantages importants dont son critère générique puisqu'il y a des modèles macroscopiques issus de la littérature qui peuvent être dérivés de ce modèle en lui fixant quelques paramètres.

Chapitre 2

Scénarios et critères pour l'évaluation d'un ADAS

Sommaire

2.1	Introduction	76
2.2	Impact de l'ADAS sur la sécurité dans un trafic mixte	78
2.2.1	Introduction	78
2.2.2	Scénarios d'évaluation	79
2.2.3	Indicateurs d'évaluation de la sécurité dans un trafic	80
2.2.4	Conclusions	98
2.3	Modèles de consommation et d'émission des polluants pour le trafic mixte	99
2.3.1	Introduction	99
2.3.2	Facteurs et paramètres influents sur la consommation et les émissions de polluants d'un véhicule	100
2.3.3	État de l'art des modèles de consommation	108
2.3.4	État de l'art des modèles d'émission des polluants	114
2.3.5	Conclusions	117
2.4	Conclusions	117

2.1 Introduction

La politique dans le domaine des transports est essentiellement centrée sur deux axes : la sécurité des usagers de la route et la réduction de la consommation en carburant et des émissions de polluants du véhicule. Les raisons sont principalement liées à la part encore importante du nombre de morts durant ces dernières décennies en considérant l'augmentation du nombre de véhicules commercialisés ainsi que la hausse des prix du pétrole pour l'aspect consommation. Pour cela, de nombreux travaux de recherche, mettant l'accent sur ces deux axes, ont été publiés (e.g. [Bester, 1981],[Evans, 1991], [Luu et al., 2010]).

Selon [UTAC, 2013], au cours de ces dernières années, l'amélioration du rendement énergétique des moteurs, l'évolution de l'aérodynamique et l'utilisation de matériaux plus légers, ont permis de gagner de 15 % à 20 % en consommation de carburant. Parallèlement, l'intégration de nouveaux systèmes de sécurité et d'équipements de confort, ont alourdi les véhicules (e.g. la climatisation). Pour compenser ces suppléments de masse, des motorisations plus puissantes, donc

plus gourmandes en carburant, ont été adoptées. C'est ainsi que le bénéfice des progrès a été grandement limité. Cette problématique a initié d'autres programmes de recherche visant à améliorer plus la sécurité en ayant un minimum de consommation d'énergie. Ces stratégies peuvent se classer en deux types. La première consiste à l'amélioration de l'infrastructure routière. Par exemple, les échangeurs permettent de réduire le temps d'attente des véhicules par rapport à l'utilisation des feux tricolores. Mais l'inconvénient de cette approche est son coût élevé. La deuxième stratégie est l'amélioration de l'utilisation de l'espace en augmentant la fluidité du trafic par des méthodes d'automatisation du trafic en situation de congestion. C'est ainsi que le besoin du véhicule complètement ou partiellement automatisé apparaît. Toutefois, ces types de véhicules doivent répondre aux exigences fixées par la politique du transport et qui sont, en premier lieu, la sécurité et, en deuxième lieu, la réduction de consommation en carburant et d'émission de polluants. Dans ce contexte, les gouvernements ont mis en place des organismes qui travaillent sur ces deux axes. Par exemple, aux États Unis, l'agence de protection de l'environnement (Environmental Protection Agency (EPA)) est destinée à l'évaluation de l'impact de la consommation en carburant et les émissions des véhicules sur l'environnement. Alors que, le National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) est responsable de l'amélioration de la sécurité dans le trafic.

En France, l'Union Technique de l'Automobile, du motorcycle et du Cycle (UTAC) étudie les mécanismes qui permettent d'isoler les causes importantes de la surconsommation d'énergie des véhicules et l'excès de l'émission des gaz à effet de serre. L'UTAC est un service technique notifié auprès de la commission européenne et de l'Organisation des Nations Unis (ONU¹⁶). Elle participe aussi à l'élaboration des réglementations applicables aux véhicules et à leurs équipements dans les domaines suivants :

- la sécurité active, appelée aussi sécurité préventive ou primaire. Elle est appelée sécurité primaire parce qu'elle intervient avant l'accident.
La sécurité active est liée à l'environnement du véhicule ainsi qu'à ses éléments. À titre d'exemple, le système ABS¹⁷ empêche le blocage des roues lors d'un freinage intensif et le système ESP¹⁸ permet au véhicule de corriger sa trajectoire. Ces derniers interviennent pour contrecarrer un éventuel accident.
- la sécurité passive, appelée aussi sécurité palliative ou secondaire. Elle est appelée sécurité secondaire parce qu'elle intervient après l'accident.
La sécurité passive est liée aux équipements du véhicule qui peuvent diminuer la gravité de l'accident. Par exemple, la ceinture, le casque de moto et l'Airbag qui permettent de diminuer le choc que le conducteur va subir au moment de l'accident.
- l'environnement comme les émissions de polluants. L'UTAC intervient aussi dans l'amélioration de la consommation dans le but de minimiser les émissions de polluants.

L'évaluation de l'impact des solutions proposées par ces organismes, comme l'automatisation du trafic, nécessite des modèles de calcul de la consommation en carburant, des émissions de

16. ONU : United Nation Organization est un organisme international fondé en 1945. Elle regroupe presque tous les états de la planète. Son objectif est la coopération entre les pays dans le droit international, la sécurité internationale, le développement économique, le progrès social, les droits de l'Homme et la réalisation à terme de la paix mondiale [Wikipedia, 2013]

17. Le système ABS, connu sous son nom allemand « AntiBlockierSystem », est un système d'assistance au freinage empêchant les roues de se bloquer pendant les périodes de freinage intense. On peut trouver d'autres appellations de ce système en France comme système anti-blocage des roues, système de freinage anti-blocage ou freins anti-blocage

18. L'ESP est l'abréviation de Electronic Stability Program ou en français Électro-Stabilisateur Programmé qui permet au véhicule de corriger sa trajectoire dans le cas d'un dérapage. Il a été inventé par la société allemande Bosch et utilisé par les deux constructeurs allemands Mercedes-Benz et BMW pour la première fois

polluants et des indicateurs de sécurité. Ces modèles et ces indicateurs seront intégrés dans les véhicules pour alerter en cas de situation de conduite dangereuse et d'indiquer le taux de consommation et d'émission. En particulier, les indicateurs de sécurité doivent être pertinents et adaptés à l'état du trafic qui est mixte dans notre cas. La plupart des indicateurs existants dans la littérature sont destinés à évaluer la sécurité d'un trafic homogène. Pour cette raison, la deuxième section de ce chapitre présente les critères et les indicateurs de sécurité nécessaires pour l'évaluation de l'impact d'un système d'aide à la conduite sur la sécurité dans un trafic mixte. La troisième section se concentre sur la consommation et présente les facteurs et les paramètres influents au travers d'un état-de-l'art des modèles de consommation et d'émission de polluant. La quatrième section conclue ce chapitre.

2.2 Impact de l'ADAS sur la sécurité dans un trafic mixte

2.2.1 Introduction

Par définition, la sécurité routière, ou la prévention au risque, est l'ensemble des mesures nécessaires visant à éviter les collisions ou diminuer leurs conséquences. Ces mesures peuvent être préventives et/ou imposées par la loi. Les mesures préventives se font, par exemple, à travers des panneaux routiers ou les publicités dans les médias. Les mesures imposées sont celles décrites dans le code de la route comme la limitation de la vitesse. Ces mesures restent insuffisantes pour diminuer le risque puisque le nombre de morts et les dégâts humains restent élevés. Toutefois, les facteurs liés à l'être humain sont multiples et la recherche des solutions techniques pour ce problème est devenue primordiale. Une de ces solutions est l'intégration de systèmes d'aide à la conduite (en anglais : Advanced Driver Assistance System (ADAS)) dans les nouveaux véhicules. Ces systèmes se basent sur des indicateurs de risque qui diffèrent d'un système à un autre et comportent des limites qui seront expliquées plus tard.

Le risque R d'un évènement est défini par le produit de la gravité G de l'évènement redouté par sa probabilité d'occurrence P , soit

$$R = G \times P. \quad (2.1)$$

Ainsi, la mesure du risque passe par celle de sa gravité et de la probabilité d'apparition de l'évènement.

L'évaluation du risque peut être abordée selon deux approches, en l'occurrence :

1. **une approche conservative**

Les partisans de cette approche se fondent sur des scénarios particuliers qui reflètent la pire situation pouvant se présenter dans un trafic. Le scénario « mur de brique » présenté par [Mourllion, 2006] en est un exemple.

L'analyse du risque selon cette approche permet de fixer la probabilité d'occurrence P de l'évènement à 1 et d'évaluer uniquement sa gravité. Par conséquent, l'évaluation du risque est réalisée par le biais de la mesure de la gravité. De tels scénarios, dits « strictes », induisent des indicateurs de risques intégrés dans un système d'aide à la conduite ou de prévention de risque qui peuvent perturber le conducteur en lui donnant une vue pessimiste de la situation.

2. **une approche moins conservative**

Avec cette approche, le risque est conditionné par la probabilité d'occurrence de l'évènement. Cette dernière peut être fournie par les responsables du trafic à partir des données

statistiques des collisions dans un endroit spécifique (e.g. carrefour très fréquenté) et pendant un temps bien déterminé (e.g. heure de pointe, la nuit). L'évaluation du risque selon cette approche est soumise à des conditions sur l'environnement du véhicule. À l'aide des moyens informatiques comme la communication entre les véhicules et/ou le véhicule et l'infrastructure, le conducteur sera informé de son environnement.

Dans notre cas, cette approche ne sera pas adoptée vu le manque des données sur la probabilité d'occurrence des événements considérés dans ce projet.

Dans un environnement de simulation, la fiabilité de mesure de ces deux paramètres G et P, nécessite la génération de scénarios réalistes et extrêmes. En se basant sur ces derniers, les critères et les variables liés aux indicateurs de sécurité sont synthétisés.

Cette section présente, en premier lieu, des scénarios d'évaluation du risque. Ceux-ci se basent sur un état-de-l'art des indicateurs de sécurité qui est présenté dans un second temps. À ce stade, de nouveaux indicateurs de sécurité pour un trafic mixte sont développés. Finalement, la dernière sous-section conclue cette partie.

2.2.2 Scénarios d'évaluation

Le freinage d'urgence et le scénario « mur de brique » sont les plus répandus dans les études de la sécurité du trafic. Cette sous-section présente les scénarios d'évaluation de la sécurité dans un trafic routier. Ces scénarios ont été intégrés dans le simulateur microscopique de trafic mixte développé par le laboratoire MIPS.

2.2.2.1 Freinage d'urgence

Ce scénario est le plus utilisé dans la littérature puisqu'il traduit un cas très répandu. Le freinage peut être total ou bien partiel.

Freinage total d'urgence : Le freinage total d'urgence consiste à freiner avec une décélération maximale jusqu'à l'arrêt.

Ce genre de scénario est utilisé dans plusieurs cas comme le test d'un modèle de véhicule automatisé ([Unger and Sandner, 2011] et [Carbaugh et al., 1998]) ou le test d'un modèle de conducteur.

Actuellement, les constructeurs automobiles intègrent un système de freinage d'urgence permettant d'éviter ou de diminuer la sévérité d'une éventuelle collision dans un trafic. Les travaux de [Kaempchen et al., 2009] visent à améliorer les systèmes de freinage d'urgence autonome (Autonomous Emergency Braking (AEB)). Ce système rentre dans les fonctions actives de la sécurité du véhicule qui vise à réduire la gravité d'une collision. Un AEB effectue un freinage complet dans le cas où la collision devient inévitable. Comme ce système peut ne pas esquiver la collision, il peut réduire l'énergie de son impact et est donc considéré comme un système d'atténuation de collisions.

Freinage partiel d'urgence : Dans ce scénario, le véhicule de tête commence à rouler à une certaine vitesse. Après la stabilisation de la file, ce véhicule freine et passe à une autre vitesse inférieure à la première et non nulle.

2.2.2.2 Freeze

Ce scénario consiste à faire évoluer le trafic jusqu'à l'état d'équilibre (c'est-à-dire en régime établi : accélérations nulles des véhicules). À un instant donné, le véhicule de tête de la file gèle sa position. Il s'arrête alors instantanément (distance de freinage nulle). Ce scénario se trouve

plus extrême que celui du freinage d'urgence, ce qui permet une évaluation plus sévère de la sécurité dans un contexte de simulation.

2.2.2.3 Mur de brique

Ce scénario consiste à placer un mur de brique au milieu de la route. La différence entre le scénario du mur de brique et le scénario freeze est double :

- Dans le cas du mur de brique, la perturbation est extérieure. Alors que dans le scénario freeze, la perturbation de la file est intérieure.
- Le mur est supposé posséder une masse infinie (c'est-à-dire très grande devant celle d'un véhicule). Par conséquent, la sévérité d'une éventuelle collision s'en trouvera modifiée.

2.2.2.4 Véhicule en sens inverse

Dans ce scénario, les véhicules sont placés en file sur la route. À l'instant $t=0$ s, les véhicules commencent à rouler. Le dernier véhicule roule en sens inverse. Le circuit étant fermé, les autres véhicules vont être nécessairement amenés à le croiser. Ceci constitue une perturbation qui évolue dans le temps.

Dans ce cas, le nombre de collisions et leurs sévérités peuvent être des indicateurs de risque. De plus, à partir de ce scénario, le modèle de changement de voie peut être testé en terme de sécurité. En effet, le véhicule doit être capable de changer de voie si le véhicule venant en sens inverse roule sur la même voie.

2.2.2.5 Goulot d'étranglement

Dans ce scénario, le circuit est composé principalement de trois voies. Sur une section de longueur préétablie, la chaussée est réduite à deux voies.

L'objectif de ce scénario est d'évaluer la sécurité en termes de nombre de collisions et de leurs sévérités en fonction de la vitesse et de la densité de véhicules sur une portion qui entoure la longueur de la fermeture de la voie.

2.2.2.6 Commutation des modes de conduite : automatisé ou manuel

Les véhicules dans le trafic peuvent commuter à tout instant d'un mode à l'autre. En fonction du taux de véhicules automatisés et du taux de véhicules qui commutent, la sécurité dans le trafic sera évaluée.

2.2.2.7 Profil de vitesse

Avec un mode manuel, le véhicule considéré peut suivre un profil de vitesse préétabli. Cherchant à voir les réponses fréquentielles d'une file de véhicules, la plupart des études ont été menées avec des profils de vitesses sinusoïdaux à différentes fréquences. Selon le type de conduite, la poursuite de ce véhicule peut être différente.

2.2.3 Indicateurs d'évaluation de la sécurité dans un trafic

2.2.3.1 Introduction

La définition des indicateurs de sécurité dans un trafic est relative à la nature du scénario d'évaluation. En effet, ces scénarios peuvent se diviser en deux classes par rapport à un système

décrit par les véhicules dans le trafic. La première classe consiste à créer une perturbation extérieure, comme le scénario du mur de briques, ou intérieure, comme le scénario du véhicule en sens inverse. Ces perturbations peuvent engendrer des collisions avec des gravités différentes. La deuxième classe contient les cas où il n'y a pas de perturbation (pas de collisions). Ici, l'évaluation de la sécurité se fait par rapport au pourcentage des véhicules automatisés présents dans le trafic.

2.2.3.2 État-de-l'art des indicateurs d'évaluation de la sécurité dans un trafic

Ce paragraphe présente les indicateurs de sécurité relatifs aux scénarios avec collisions en premier lieu et sans collision en deuxième lieu.

— Indicateurs de sécurité relatifs aux scénarios avec collisions

Dans un scénario avec collisions, le nombre de collisions et leurs sévérités constituent deux indicateurs importants pour l'évaluation du risque dans un trafic.

La sévérité d'une collision constitue un élément important pour la mesure des dégâts humains. En effet, on peut avoir une collision inévitable alors que sa sévérité est très faible. Pour cela, [Peter et al., 2011] suggèrent l'étude séparée de la sévérité et du nombre de collisions.

Dans notre contexte et à défaut de données statistiques précises sur les accidents, nous accordons plus de poids à l'aspect de la sévérité des collisions.

1. Nombre de collisions

Le nombre de collisions constituera un premier critère d'évaluation de la sécurité dans le cas d'un scénario avec collisions. En s'appuyant sur cet indicateur, il est possible de définir un indice de sécurité normalisé comme suit :

$$S_{\text{Coll}} = 100 \frac{N - Nb_{\text{Coll}}}{N}, \quad (2.2)$$

où N est le nombre de véhicule dans le trafic et Nb_{Coll} le nombre de collisions.

2. Sévérité de choc

L'estimation de la sévérité d'une collision est une exigence fondamentale de l'analyse des accidents. [Manner and Wunsch-Ziegler, 2013] ont étudié la gravité des accidents dans les autoroutes allemandes en utilisant les données des années allant de 2009 à 2011. Avec un modèle logit multinomial, ils identifient statistiquement les facteurs pertinents des accidents afin de les classer. Quatre classes sont alors définies : mortel, blessures graves, blessures légères et dégâts matériels.

D'après [Burdzik et al., 2012], les paramètres fréquemment utilisés pour la mesure de la sévérité d'une collision se présentent comme suit :

(a) la variation de la vitesse du véhicule.

Selon [Vangi, 2009], depuis les années soixante, de nombreuses méthodes ont été développées pour estimer la variation de la vitesse à partir de la perte d'énergie

produite par le véhicule au moment de l'impact. On peut noter les méthodes suivantes :

- (b) **la vitesse d'énergie équivalente** (connue en anglais par Energy Equivalent Speed (EES)).

Selon [Kwasnoski, 2003], la vitesse d'énergie équivalente (EES) a été définie par Burg, Martin et Zeidler en 1980 et a été suggérée pour une utilisation courante. Par définition, l'EES est une mesure de la vitesse qui sera transformée en énergie de déformation lors de la collision [Tomasch, 2004].

Il existe deux types de choc : élastique et inélastique. Un choc parfaitement élastique conserve la quantité de mouvement et l'énergie cinétique. Alors qu'un choc parfaitement inélastique conserve seulement la quantité de mouvement. Selon [Page, 2013], un choc réel est toujours inélastique. Dans ce cas, avec le choc qui est considéré parfait, les deux véhicules restent liés après la collision et ont par conséquent la même vitesse. Ainsi, la quantité de mouvement totale est conservée, alors que l'énergie cinétique dissipée sera sous une forme de chaleur, de déformation mécanique et de bruit. Bien que la collision soit un processus aléatoire, le National Transportation Safety Board¹⁹ (NTSB) a présenté une méthode analytique pour le calcul de la valeur de l'EES. Elle est déterminée par l'équation suivante :

$$EES_n = EES_n^1 + EES_n^2 \cdot C_n^{\max}, \quad (2.3)$$

avec EES_n^1 la vitesse, qui dépend de la masse du véhicule n [km.h⁻¹], à laquelle aucune déformation n'est prévue, EES_n^2 la pente de la courbe de la vitesse par rapport à la déformation et C_{\max} la déformation maximale du véhicule [cm]. Cette expression, donnée par le NTHS, a été étendue dans plusieurs travaux. Par exemple, [Nystrom and Kost, 1992] ont présenté une autre expression analytique pour l'évaluation de l'EES [km.h⁻¹] donnée par

$$EES_n = 5 + [0,964 - 0,0000351 \cdot m_n] \cdot C_n^{\max}, \quad (2.4)$$

avec, m_n la masse du véhicule n [kg].

[Craig, 1993] a partagé le calcul de l'EES selon la longueur du véhicule et sa masse. En effet, pour des longueurs de véhicules inférieures à 4,6 m et des masses inférieures à 1360 kg, l'expression de l'EES [km.h⁻¹] est donnée par :

$$EES_n = \begin{cases} 6,4 + 0,3 \cdot C_n^{\max} & \text{si } C_n^{\max} \leq 30,5, \\ -9,7 + 0,82 \cdot C_n^{\max} & \text{si } C_n^{\max} > 30,5. \end{cases} \quad (2.5)$$

Pour des véhicules avec des longueurs supérieures à 4,6 m, l'EES [km.h⁻¹] est donnée par :

$$EES_n = \begin{cases} 6,4 + 0,34 \cdot C_n^{\max} & \text{si } C_n^{\max} \leq 46, \\ -11,3 + 0,75 \cdot C_n^{\max} & \text{si } C_n^{\max} > 46, \end{cases} \quad (2.6)$$

avec C_n^{\max} la déformation maximale du véhicule n [cm].

19. Le NTSB est un organisme fédéral indépendant de formuler des recommandations en matière de sécurité visant à prévenir de futurs accidents.

(c) **la vitesse de l'impact équivalent**, (ou en anglais Equivalent Barrier Speed (EBS)).

Il s'agit de la vitesse à laquelle un véhicule aurait percuté un bloc solide immobile, entraînant des dégâts équivalents au cas d'un objet mobile.

Dans les travaux de [Mourllion, 2006], une relation entre les masses, les vitesses et l'EES a été développée. En considérant un système de deux véhicules ($n, n + 1$), le principe de la conservation de la quantité de mouvement s'écrit sous la forme suivante :

$$m_n v_n + m_{n+1} v_{n+1} = m_a v_a, \quad (2.7)$$

où l'indice « a » désigne le système composé par les deux véhicules accidentés considérés comme un agglomérat.

En supposant qu'il n'y ait pas de perte de matière au moment du choc, on a

$$m_a = m_n + m_{n+1}. \quad (2.8)$$

Dans ce cas de figure, la vitesse de l'agglomérat peut être exprimée à partir de l'équation (2.7) sous la forme suivante :

$$v_a = \frac{m_n v_n + m_{n+1} v_{n+1}}{m_n + m_{n+1}}. \quad (2.9)$$

À partir de l'équation (2.9), la variation de la vitesse que subit le véhicule Veh_{*n*+1}, qui est aussi l'EES, est exprimée sous la forme suivante :

$$\text{EES}_n = v_n - v_a = (v_n - v_{n+1}) \frac{m_{n+1}}{m_{n+1} + m_n}. \quad (2.10)$$

Il est équivalent de dire que le véhicule n percute un mur avec la vitesse EES_{*n*}, et dans ce cas l'EES_{*n*} donnée par l'équation (2.10) s'appelle l'EBS, ou que le véhicule n percute le véhicule prédécesseur dans la file ayant une vitesse v_{n+1} et une masse m_{n+1} .

L'hypothèse de l'agglomérat formé par les deux véhicules accidentés est forte. Toutefois, l'objectif de cette thèse est l'évaluation de la sécurité d'un trafic à basse vitesse. Étant donné qu'avant la collision, le véhicule successeur est en état de décélération et les deux véhicules roulent à basse vitesse ($\leq 50 \text{ km.h}^{-1}$), on peut considérer que l'hypothèse de la formation de l'agglomérat reste valable dans ce cas. En même temps, dans le chapitre suivant, l'évaluation de la sécurité se fera selon deux approches. La première approche considère la formation de l'agglomérat au moment de la collision et la deuxième suppose que le véhicule successeur n sort de la route juste après la collision et que l'autre véhicule percuté continue de rouler.

À travers l'étude de l'EES ou l'EBS, la sévérité de la collision peut être quantifiée à l'aide des données statistiques de personnes tuées ou gravement blessées. En effet, les données du Laboratoire d'Accidentologie et de Biomécanique du GIE PSA-Renault, présentées dans le tableau 2.1, synthétisent le pourcentage de personnes gravement blésées ou tuées en fonction de la valeur de l'EES. Ces données sont interpolées (Fig.

TABLE 2.1 – Sévérité d'un choc en fonction de l'EES

EES [km.h ⁻¹]	<25	35	45	55	65	75	85	85>
Pourcentage de personnes tuées et gravement blessées	0	2	10	30	55	80	95	100

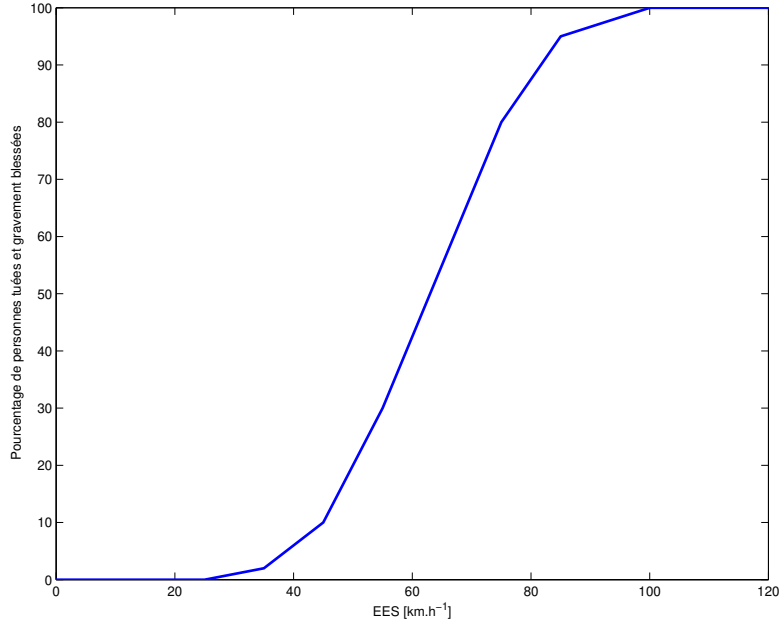


FIGURE 2.1 – Sévérité du choc en fonction de l'EES

2.1) et utilisées par [Mangeas, 2003] et [Mourllion, 2006] pour l'évaluation de la sévérité d'une collision.

En se basant sur l'EES, [Derbel et al., 2012c] ont présenté l'indicateur de sécurité relatif à la sévérité, S_{ees} , comme suit

$$S_{ees}^i = 100 \left(1 - \frac{\overline{ees}_i}{\overline{ees}_{max}} \right), \quad (2.11)$$

où \overline{ees}_i est la valeur moyenne des EES obtenues pour chaque pourcentage de véhicules automatisés dans le trafic et \overline{ees}_{max} est la valeur maximale des moyennes des EES obtenues pour chaque pourcentage de véhicules automatisés dans le trafic.

Pour un pourcentage i de véhicules automatisés, \overline{ees} peut être défini comme suit :

$$\overline{ees}_i = \frac{1}{N_{SIM_i}} \sum_{k=1}^{N_{SIM_i}} \frac{1}{Nb_{Coll_k}} \sum_{j=1}^{Nb_{Coll_k}} ees_{(k,j)}. \quad (2.12)$$

où N_{SIM_i} est le nombre de simulation pour un pourcentage fixe i de véhicules automatisés, Nb_{Coll_k} le nombre de collisions pour une simulation k , $ees_{(k,j)}$ l'EES du véhicule

accidenté j dans la simulation k . \overline{ees}_{max} est donnée par

$$\langle ees \rangle_{max} = \max_i \overline{ees}_i \quad (2.13)$$

Cet indicateur permet l'évaluation de la sécurité globale du trafic mixte en terme de sévérité des collisions et relativement à un trafic totalement non automatisé (véhicules régis par l'action du conducteur).

— Indicateurs de sécurité relatifs aux scénarios sans collision

Dans le cas d'un scénario sans collision, les indicateurs cités précédemment (nombre de collision et leur sévérité) ne seront plus valables. Dans ce cas, la mesure et l'évaluation de la sécurité dans le trafic passe par d'autres indicateurs pertinents.

Dans la littérature, le Time To Collision (TTC) apparaît le plus utilisé dans ce cas. Par définition, le Time To Collision (TTC) est le temps qui reste entre deux véhicules jusqu'à ce qu'une collision ait lieu si la vitesse et la trajectoire du prédécesseur et de son successeur sont maintenues. Plusieurs autres indicateurs fondés sur le principe du TTC sont ensuite développés et adaptés pour des analyses de la sécurité dans le trafic.

Ce paragraphe présente un état-de-l'art des indicateurs relatifs aux scénarios sans collision et introduit de nouveaux indicateurs plus pertinents pour l'évaluation de la sécurité dans un trafic mixte.

1. Time To Collision (TTC), Inverse Time To Collision (ITTC) et Modified Time to Collision (MTTC)

L'indicateur TTC a été présenté la première fois par [Hayward, 1972] sous la forme suivante :

$$TTC_n = \frac{s_n}{\Delta v_n}, \quad (2.14)$$

avec, s_n l'interdistance nette entre les véhicules n et $n + 1$ et Δv_n la vitesse relative du véhicule n par rapport au véhicule $n + 1$.

Cet indicateur a été introduit dans plusieurs systèmes d'aide à la conduite récents. Toutefois, il faut noter que la mesure du TTC n'est valable que lorsque la vitesse du véhicule suiveur est plus grande que celui de son prédécesseur. En pratique, selon [VanDerHorst, 1990] et [Vogel, 2003], la mesure du TTC consiste à enregistrer l'interdistance et la vitesse des véhicules au passage d'une section de la route.

La gravité d'une situation de conduite, à travers le TTC, est mesurée par le biais de l'interdistance et la vitesse relative (équation (2.14)). Nous allons voir dans la suite de cette partie une application du TTC pour la mesure de la gravité de la situation de conduite. Il est cependant à noter que cette mesure reste non représentative de la situation réelle du véhicule. Par exemple, les TTCs de 1,5 s sont considérés comme ayant un même niveau de gravité indépendamment du fait que la vitesse utilisée dans le calcul est de 10 km.h⁻¹ ou 100 km.h⁻¹. Pour pallier cet inconvénient, des paramètres, comme la capacité nécessaire de freinage, peuvent être utiles.

Ainsi, le TTC a été développées années suivantes afin de palier ce problème. Les indicateurs Inverse of Time To Collision (ITTC) et Modified Time To Collision (MTTC) sont les indicateurs les plus utilisés dérivant de celui du TTC.

L'indicateur Inverse of Time To Collision (ITTC) a été présenté pour la première fois par [Chin et al., 1991]. Son expression est donnée par :

$$\text{ITTC}_n = \frac{\Delta v_n}{s_n} \quad (2.15)$$

Le ITTC est utilisé pour le développement des systèmes de prévention du risque pour les conducteurs. [Raymond et al., 2005] ont développé un Forward Collision Warning (FCW) qui permet d'alerter le conducteur pour éviter une collision. Ainsi deux paramètres sont pris en compte dans ce système. Le premier paramètre est le temps de réaction au freinage du conducteur, qui se réfère au temps entre le début de l'alerte de collision et le moment où le conducteur déclenche l'interrupteur de frein. Le deuxième paramètre est la décélération du conducteur.

De plus, le ITTC peut être utilisé pour la mesure de la probabilité de collision d'un véhicule avec son prédécesseur. En effet, soit P_n , la probabilité de collision du véhicule n , on peut écrire alors

$$P_n = \begin{cases} 1 & \text{si } \text{TTC}_n \leq 1 \\ \frac{1}{\text{TTC}_n} & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.16)$$

Dans la suite, nous allons montrer une application de l'ITTC comme une probabilité de collision entre le véhicule et son prédécesseur afin d'évaluer le risque dans un contexte de conduite en file.

Le deuxième indicateur de sécurité dérivé du TTC s'appelle Modified Time To Collision. L'idée de synthèse de cet indicateur vient de la définition du Time To Collision. En effet, le TTC est basé sur l'hypothèse que les deux véhicules qui se suivent gardent les mêmes vitesses. C'est-à-dire que la collision a lieu dans le cas où la vitesse du suiveur est supérieure à celle de son prédécesseur. Dans ce cas, les accélérations des véhicules entrent en compte dans l'évaluation du risque du véhicule suiveur. Cela constitue un avantage de l'indicateur MTTC.

Le tableau 2.2 répertorie les cas où il y aura ou pas une collision entre ces deux véhicules. Dans ce tableau, la lettre C signifie que la collision est inévitable, la lettre P signifie que la collision est possible, la lettre I signifie que la collision est impossible.

TABLE 2.2 – Description de la possibilité de collision entre deux voitures

V	$v_n > v_{n+1}$			$v_n < v_{n+1}$		
	$a_{n+1} > 0$	$a_{n+1} < 0$	$a_{n+1} = 0$	$a_{n+1} > 0$	$a_{n+1} < 0$	$a_{n+1} = 0$
$a_n > 0$	P	C	C	P	C	P
$a_n < 0$	P	P	P	I	P	I
$a_n = 0$	P	C	C	I	C	I

D'après le tableau 2.2, l'occurrence de la collision dépend de l'interdistance, la vitesse relative et les accélérations des deux véhicules. Ainsi la collision entre deux véhicules sera inévitable dans le cas où

$$a_n \geq a_{n+1}. \quad (2.17)$$

En intégrant l'équation 2.17, on a

$$\frac{1}{2}\Delta a_n t^2 + \Delta v_n t + \Delta x_n \leq 0.$$

Donc

$$\text{MTTC} = \frac{-\Delta v_n \pm \sqrt{\Delta v_n^2 - 2\Delta a_n \Delta x_n}}{\Delta a_n}$$

— Si $\Delta a_n = 0$ et $\Delta v_n < 0$, on a

$$\text{TTC}_n = \frac{\Delta x_n}{-\Delta v_n}.$$

— Sinon $\Delta a_n \neq 0$, on a

$$t_1 = \frac{-\Delta v_n + \sqrt{\Delta v_n^2 - 2\Delta a_n \Delta x_n}}{\Delta a_n},$$

$$t_2 = \frac{-\Delta v_n - \sqrt{\Delta v_n^2 - 2\Delta a_n \Delta x_n}}{\Delta a_n}.$$

— Si $t_1 > 0$ et $t_2 > 0$ alors $\text{TTC}_n = \min(t_1, t_2)$.

— Si $t_1 * t_2 \leq 0$ alors $\text{TTC}_n = \max(t_1, t_2)$.

— Si $t_1 < 0$ et $t_2 < 0 \Leftrightarrow \Delta v_n < \sqrt{\Delta v_n^2 - 2\Delta a_n \Delta x_n}$.

Si $\Delta v_n^2 - 2\Delta a_n \Delta x_n \geq 0$ alors $\Delta v_n^2 \geq 2\Delta a_n \Delta x_n$.

Or $\Delta a_n \leq 0$ alors $\Delta x_n \leq 0 \Rightarrow$ la collision est faite dans le passé.

Comme l'indicateur ITTC, le MTTC peut être utilisé dans le calcul de la probabilité de collision entre deux véhicules dans un contexte de conduite en file.

L'inconvénient de cet indicateur demeure dans le choix de la valeur critique au-dessous de laquelle la situation du successeur est à risque.

2. Time Exposed Time to collision (TET)

Le Time Exposed Time to Collision (TET) a été présenté pour la première fois par [Minderhoud and Bovy, 2001]. Il consiste à calculer la durée de temps pendant laquelle le TTC du véhicule est inférieur à un TTC critique noté TTC^* . Pour un véhicule n , le Time Exposed Time to Collision (TET) est calculé à travers l'expression suivante :

$$\text{TET}_n = \int_0^T \xi_n(t) dt, \quad (2.18)$$

où T est le temps de simulation [s] et $\xi_n(t)$ une variable de commutation donnée par

$$\xi_n = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq \text{TTC}_n(t) \leq \text{TTC}^* \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases} \quad (2.19)$$

Le Time Exposed Time to Collision moyen $\overline{\text{TET}}$ par véhicule est donné par :

$$\overline{\text{TET}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{TET}_n, \quad (2.20)$$

où N est le nombre de véhicules dans le trafic.

Le calcul de l'indicateur TET exige la collecte de la position et de la vitesse de tous les véhicules entrant et sortant d'une section donnée de la route sur une période de temps.

De tel indicateur basé sur une valeur critique du TTC pose le problème de choix de cette valeur. En effet, une petite valeur peut engendrer un grand nombre d'alerte de collision. Alors qu'une grande valeur peut indiquer une fausse situation dangereuse. Pour cela, un seuil approprié doit être fixé pour alerter le conducteur d'une situation critique. Par exemple, dans un carrefour, [Ammoun, 2007] a présenté une évaluation du risque par rapport aux différentes valeurs de TTC. En effet, la valeur de $TTC = 2$ s correspond au temps de réaction (une seconde) et d'action (une seconde) d'un conducteur. À partir de cette valeur, le risque décroît en fonction du TTC. Au-delà d'une valeur de $TTC = 5$ s, la situation est considérée sécuritaire comme le montre la figure 2.2.

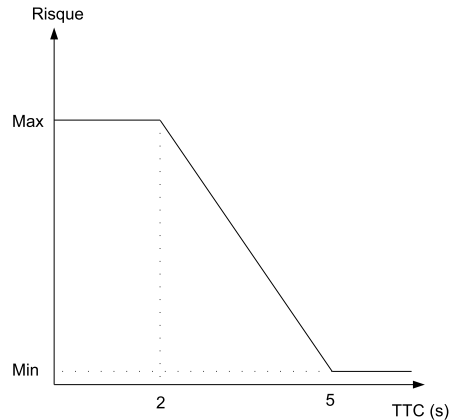


FIGURE 2.2 – Risque en fonction du TTC

Également, les travaux de [Hogema and Janssen, 1996] et [Minderhoud and Bovy, 2001] se basent sur une valeur fixe de TTC à travers laquelle la situation est considérée comme sécuritaire ou à risque. [Hogema and Janssen, 1996] proposent un TTC de 2,6 s pour les véhicules chargés et de 3,6 s pour les véhicules non chargés. Les travaux de [Hirst and Graham, 1997] mentionnent qu'un TTC de 4 s pourrait être utilisé pour distinguer entre les cas où les conducteurs se trouvent involontairement dans une situation dangereuse et les cas où les conducteurs restent en contrôle. Dans cette référence, l'étude menée par ces deux chercheurs décrit une expérience de conception d'un système d'alerte de collision. Les résultats montrent qu'une valeur de TTC critique de 4 s ou 5 s donne beaucoup de fausses alertes. Ils montrent alors qu'une valeur de 3 s engendre le minimum d'alertes bien que dans certains cas des situations critiques soient encore observées.

[Minderhoud and Bovy, 2001] utilisent l'indicateur TET avec des valeurs de TTC* égalent à 1 s, 2 s et 3 s.

Cette diversité dans le choix des valeurs critiques du TTC réduit la pertinence de l'indicateur TET. Puisque les caractéristiques dynamiques et statiques diffèrent d'un véhicule à un autre et les temps de réaction des conducteurs sont distinctes, il est

plus judicieux que ce seuil dépendent aussi de la vitesse, la décélération maximale et/ou le coefficient de glissement des pneus du véhicule. C'est pour ces raisons qu'une modification sera apportée pour cet indicateur et un nouveau critère de mesure de la sécurité dans le trafic sera présenté dans le prochain paragraphe.

3. DWell Time (DWT)

L'indicateur de sécurité Dwell Time est défini par la période de temps pendant laquelle l'interdistance du véhicule est inférieure à une interdistance critique. Cette distance dépend du style de conduite du véhicule. En effet, l'interdistance critique pour un conducteur (représenté par le modèle TVDM) est différente de celle du véhicule automatisé (représenté par le modèle IDM). Pour pallier les inconvénients du TET, l'interdistance critique du conducteur sera dépendante de sa vitesse et de la capacité de décélération de son véhicule. Ainsi, cette interdistance critique, soit la distance de freinage, est définie par [Derbel et al., 2012b] comme

$$\Delta x_{n-crit} = \Delta x_{n-crit}^{dr} = \frac{v_n^2}{2\gamma_n}, \quad (2.21)$$

où γ_n est la capacité maximale de décélération du véhicule n commandé manuellement. Pour les véhicules automatisés, le modèle IDM permet de régler le temps de sécurité en amont à travers son paramètre T_n . Ce dernier est fixé avant le démarrage du véhicule automatisé. Après le démarrage, le véhicule asservit sa vitesse dans le but d'avoir le temps de sécurité T_n fixé en amont. Par conséquent, l'interdistance critique pour le véhicule automatisé est déterminée à travers son paramètre T_n . L'expression de cette interdistance est donnée par

$$\Delta x_{n-crit} = \Delta x_{n-crit}^{av} = v_n T_n. \quad (2.22)$$

Pour chaque véhicule dans le trafic, le DWT est défini par l'expression suivante :

$$\text{DWT}_n = \int_0^T \xi_n(t) dt, \quad (2.23)$$

avec ξ_n un paramètre de commutation donné par

$$\xi_n = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq \Delta x_n(t) \leq \Delta x_{n-crit}(v_n) \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases} \quad (2.24)$$

où $\Delta x_{n-crit}(v_n)$ est l'interdistance minimale que le conducteur ou le véhicule automatisé doit avoir avec son prédécesseur.

Pour une population de N véhicules, l'indicateur de sécurité relatif à DWT est défini par

$$S_{\text{DWT}} = 100 \cdot \left(1 - \frac{1}{NT} \sum_{n=1}^N \text{DWT}_n \right). \quad (2.25)$$

L'équation 2.25 présente l'indicateur d'évaluation de la sécurité moyenne par véhicule dans une file pendant toute la période de simulation.

Ainsi, le DWT pallie l'inconvénient du TET, qui est le choix de la valeur critique du

TTC, et s'adapte aux exigences du trafic mixte. Mais cet indicateur connaît des lacunes dans le choix des paramètres de l'interdistance critique du conducteur Δx_{n-crit}^{dr} . En effet, cette dernière dépend seulement des propres paramètres du véhicule régi par l'action du conducteur. Ainsi, il est plus judicieux de prendre en compte, pour un conducteur, ses propres caractéristiques comme son temps de réaction et les paramètres de son véhicule et ceux de son prédécesseur. Par le biais de l'indicateur PICUD, présenté dans le prochain paragraphe, l'indicateur Modified DWell Time (MDWT) sera introduit dans la suite de ce document afin de pallier les inconvénients du DWT.

4. Potential Index for Collision with Urgent Deceleration (PICUD)

Le PICUD est un indicateur fondé sur la différence des positions entre deux véhicules dont le premier freine avec une décélération maximale et le second freine après un temps de réaction (estimé à une seconde). La collision entre ces deux véhicules se produit dans le cas où la distance d'arrêt d'un véhicule est supérieure à la distance d'arrêt de son prédécesseur. Cet indicateur a été utilisé dans plusieurs travaux comme [Aron et al., 2003] et [Bin et al., 2003] dans le domaine de la sécurité routière à partir de l'année 2003.

Considérons deux véhicules dans un trafic à une seule voie, soit le véhicule leader $n+1$ et son suiveur n . La distance de freinage du véhicule $n+1$ est égale à sa distance d'arrêt, soit

$$D_{n+1}^{\text{arrêt}} = D_{n+1}^{\text{freinage}}. \quad (2.26)$$

Le suiveur (véhicule n) freine après un temps de réaction, la distance d'arrêt est donnée par

$$D_n^{\text{arrêt}} = D_n^{\text{réaction}} + D_n^{\text{freinage}}, \quad (2.27)$$

avec $D_n^{\text{réaction}}$ du véhicule n , la distance parcourue par le véhicule suiveur pendant l'écoulement du temps de réaction. Cette distance est donnée par l'expression suivante :

$$D_n^{\text{réaction}} = \tau_n v_n, \quad (2.28)$$

avec τ_n le temps de réaction du conducteur n .

En intégrant deux fois la décélération maximale γ_n du véhicule n , sa distance de freinage est égale à

$$D_n^{\text{freinage}} = \frac{v_n^2}{2\gamma_n}. \quad (2.29)$$

Par suite, la distance d'arrêt du suiveur est égale à

$$D_n^{\text{arrêt}} = \tau_n v_n + \frac{v_n^2}{2\gamma_n}. \quad (2.30)$$

Ainsi le PICUD peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\text{PICUD}_n = D_{n+1}^{\text{arrêt}} + x_{n+1} - \ell_{n+1} - (x_n + D_n^{\text{arrêt}} + \tau_n v_n), \quad (2.31)$$

avec $D_n^{\text{arrêt}}$ la distance d'arrêt du véhicule n .

À partir de la figure 2.3, le PICUD peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\text{PICUD}_n = \frac{v_{n+1}^2}{2\gamma_{n+1}} - \frac{v_n^2}{2\gamma_n} + s_n - \tau_n v_n, \quad (2.32)$$

où τ_n est le temps de réaction du conducteur n , γ_n sa décélération maximale et s_n son interdistance nette.

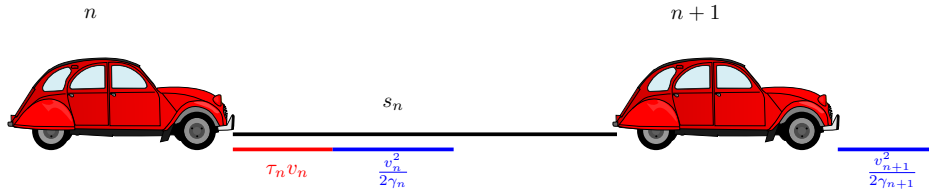


FIGURE 2.3 – Position du problème pour le PICUD

Ainsi, un PICUD négatif signifie que le véhicule n n'est pas suffisamment éloigné de son prédécesseur le véhicule $n + 1$ pour pouvoir éviter la collision avec lui dans le cas d'un freinage brusque et inattendu. Pour un PICUD positif, le véhicule n n'est pas dans une situation à risque d'accident.

L'avantage de cet indicateur est que le niveau de risque d'un conducteur dépend non seulement de ses propres paramètres, mais aussi des paramètres du véhicule prédécesseur qui peuvent être estimés selon le modèle du véhicule. Cet avantage nous a ramené à intégrer le PICUD dans l'expression de l'indicateur DWT.

5. Modified DWell Time (MDWT)

Pour pallier l'inconvénient du choix des paramètres de la distance critique relatifs au conducteur, nous avons remplacé le critère de sécurité du conducteur en utilisant le PICUD. Ainsi, l'expression du MDWT est donnée par

$$\text{MDWT}_n = \int_0^T \xi_n(t) dt, \quad (2.33)$$

Dans le cas où le véhicule est régi par l'action du conducteur, son paramètre de commutation est donné par

$$\xi_n = \begin{cases} 1 & \text{si } \text{PICUD}_n(t) \leq 0, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (2.34)$$

Pour un véhicule automatisé, l'interdistance critique reste celle donnée dans le cas du DWT. En effet, le véhicule automatisé est représenté par le modèle IDM qui, lui même, possède sa condition de sécurité à travers son paramètre T_n , le temps en amont de sécurité. Par suite

$$\Delta x_{n-crit} = \Delta x_{n-crit}^{av} = v_n T_n. \quad (2.35)$$

et le paramètre de commutation d'un véhicule automatisé n est exprimé par

$$\xi_n = \begin{cases} 1 & \text{si } \Delta x_n(t) \leq T_n v_n, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (2.36)$$

Puisque la modification est faite uniquement par rapport à la détermination de la distance critique du conducteur, l'indicateur de sécurité relatif au critère de MDWT est alors le même que celui du DWT, soit :

$$S_{\text{MDWT}} = S_{\text{DWT}}. \quad (2.37)$$

Dans la suite de ce paragraphe, d'autres indicateurs de sécurité seront présentés.

6. Time Integrated Time to collision (TIT)

Pour exprimer le niveau de risque d'un véhicule, [Minderhoud and Bovy, 2001] ont présenté le Time Integrated Time to collision (TIT). Ce dernier utilise le profil du TTC du véhicule et calcule la surface entre celui là et la valeur critique du TTC. Durant la période de simulation T , le TIT pour un véhicule est calculé à travers l'expression suivante :

$$\text{TIT}_n = \int_0^T \text{TTC}^* - \text{TTC}_n(t) dt \quad \forall 0 \leq \text{TTC}_n(t) \leq \text{TTC}^* \quad (2.38)$$

Pour N véhicules dans le trafic, le $\overline{\text{TIT}}$ moyen par véhicule en [$\text{s}^2/\text{véhicule}$] est donné par

$$\overline{\text{TIT}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \int_0^T \text{TTC}^* - \text{TTC}_n(t) dt \quad \forall 0 \leq \text{TTC}_n(t) \leq \text{TTC}^* \quad (2.39)$$

L'indicateur de sécurité relatif au TIT est donné par [Minderhoud and Bovy, 2001] comme

$$S_{\overline{\text{TIT}}} = 100 \cdot \frac{\overline{\text{TIT}}}{T \cdot \text{TTC}^*} \quad (2.40)$$

L'indicateur TIT est plus complexe à déterminer que le TET et le MDWT et son interprétation est plus difficile. En outre, le seuil adopté dans les études diffère largement, touchant l'évaluation de la sécurité substantiellement. Bien que le TIT soit théoriquement un indicateur préférable, les indicateurs TET, DWT et MDWT sont préférables pour une utilisation dans des études comparatives en simulation [Minderhoud and Bovy, 2001].

7. Crash Index (CI)

Le Crash Index (CI) a été introduit par [Ozbay et al., 2008]. Son expression est donnée par

$$\text{CI}_n = \frac{(v_n + a_n \text{MTTC}_n)^2 - (v_{n+1} + a_{n+1} \text{MTTC}_{n+1})^2}{2} \cdot \frac{1}{\text{MTTC}_n} \quad (2.41)$$

Si la masse du véhicule était multiplié par le numérateur de ces deux équations, la première partie de la formule peut être expliquée par l'énergie cinétique transférée lors de la collision. Cette masse n'est pas incluse dans la formule puisque sa variation d'un véhicule à un autre de même type n'est pas très grande.

La deuxième partie de la formule (l'inverse du MTTC) est utilisée pour déterminer la probabilité de collision. Lorsque le MTTC est grand, la possibilité de collision est petite et vice versa.

L'expression du Crash Index rejoint l'expression de la définition du risque donnée par l'équation (2.1) dans la page 78. Ainsi, nous pouvons caractériser cet indicateur de « complet » puisqu'il regroupe en même temps la probabilité de la collision à travers le MTTC et la sévérité.

8. Criticality Index (CrI)

[Chan, 2006] présente l'indicateur Criticality Index (CrI) pour l'évaluation du risque d'un véhicule dans un carrefour. Cet indicateur utilise le TTC pour mesurer la probabilité de collision et le carré de la vitesse du véhicule pour la mesure de la sévérité de la collision.

$$\text{CrI}_n = \frac{v_n^2}{\text{TTC}_n} = v_n^2 \cdot \text{ITTC}_n \quad (2.42)$$

Si le CrI est multiplié par la masse du véhicule, on aura, dans une partie, l'expression du double de l'énergie cinétique du véhicule transférée lors de la collision.

Comme le CI, l'expression du CrI comporte deux parties. La première partie est le double de l'énergie cinétique transférée lors de la collision si elle était multipliée par la masse du véhicule. La deuxième partie (ITTC) représente la probabilité de collision du véhicule. En conclusion, le CrI est un indicateur de risque « complet ».

9. Crash Index Density (CID)

Le Crash Index Density (CID) est défini par [Ozbay et al., 2008] comme suit

$$\text{CID} = \frac{\sum CI_{ijk} \cdot \ell_j}{T \cdot N \cdot L}, \quad (2.43)$$

où CI_{ijk} est, par définition, le Crash Index (CI) du véhicule i traversant la section j de la route à l'instant k , T la durée d'analyse, N le nombre de véhicule traversant la section de la route à analyser, ℓ_j la longueur de la section de la route analysée [m] et L la longueur de la route analysée [m].

10. Individual Braking Time Risk (IBTR)

L'indicateur Individual Braking Time Risk (IBTR) est un indicateur de risque individuel d'un véhicule dans une file. Cet indicateur a été introduit par [Aron et al., 2003]. Il consiste à faire le rapport entre la durée de freinage d'un véhicule et son temps en amont. Si ce rapport est supérieur à 1, il y aura une collision entre ces deux véhicules

!h

TABLE 2.3 – Risque selon l'indicateur IBTR

Niveau de risque	Vitesse [m.s ⁻¹]	T [s]	Décélération [m.s ⁻²]
0	30	>4	3,82 (pluie)
0	25	>2	6,25
1	25	1,00	6,25
2	25	0,50	6,25

si le prédécesseur freine brusquement. Ainsi, cet indicateur est défini par

$$R^F = \max \left(0, \log_2 \left(\frac{v_n}{2\gamma_n T_n} \right) \right). \quad (2.44)$$

L'intérêt du passage par le logarithme en base 2 est d'associer des valeurs simples du risque à des situations courantes ; par exemple si T_n est divisée par deux, le risque augmente d'une unité. Le tableau 2.3 donne des valeurs de risque correspondant à certaines valeurs caractéristiques du T_n et de la vitesse en considérant égales les vitesses des véhicules n et $n + 1$.

11. Indicator Braking Distance Risk (IBDR)

Cet indicateur, présenté par [Aron et al., 2003], se base sur le rapport entre la distance de l'arrêt du véhicule par rapport à son interdistance. Ce rapport est donné par :

$$\frac{D_n^{\text{arrêt}}}{s_n} = \frac{v_{n+1}}{v_n} \frac{\frac{T_n^f}{2} + \tau_n}{T_n}, \quad (2.45)$$

avec T_n le temps en amont du véhicule, T_n^f le temps de freinage du véhicule n , $D_n^{\text{arrêt}}$ la distance d'arrêt du véhicule n et s_n l'interdistance nette entre les deux véhicules. À travers ce rapport donné par l'équation (2.45), l'indicateur de niveau du risque d'un véhicule est défini par :

$$R^A = \max \left(0, \log_2 \left(\frac{v_{n+1}}{v_n} \frac{\frac{T_n^f}{2} + \tau_n}{T_n} \right) \right) \quad (2.46)$$

Le T_n est le temps en amont du véhicule n . Ce temps est calculé à partir d'un capteur placé sur une autoroute où l'on enregistre le temps de passage de l'arrière du véhicule et le temps de passage du devant de son successeur.

12. Individual Braking Residual Distance Risk (IBRDR)

Le Individual Braking Residual Distance Risk (IBRDR) est un indicateur de risque qui correspond à la distance résiduelle à l'arrêt. Cet indicateur est lié directement à l'indicateur PICUD présenté par l'équation (2.32) dans la page 90.

Pour obtenir une borne sans dimension, l'équation (2.32) est multipliée par $\frac{-1}{s_n}$. Par suite, on a

$$\frac{\frac{v_n^2}{2\gamma_n} - \frac{v_{n+1}^2}{2\gamma_{n+1}} + \tau_n v_n}{s_n} > 1 \Leftrightarrow \text{Collision} \quad (2.47)$$

Ainsi, l'indicateur de risque individuel lié à la distance résiduelle à l'arrêt, noté R^D , est défini par la formule suivante

$$R^D = \max \left(0, \log_2 \left(\frac{\frac{v_n^2}{2\gamma_n} - \frac{v_{n+1}^2}{2\gamma_{n+1}} + \tau_n v_n}{s_n} \right) \right) \quad (2.48)$$

L'avantage de cet indicateur prend celui du PICUD.

13. Indicateurs de sécurité cumulative

[Aron et al., 2003] définissent l'indicateur de sécurité cumulative J-value en se basant sur l'indicateur du niveau de sécurité instantané suivant :

$$G(n) = \max \left[0, \log_2 \left(\frac{1}{2} \frac{v_n}{\gamma_n} \frac{1}{s_n} \right) \right] \quad (2.49)$$

où, $G(n)$ est l'indicateur de niveau de sécurité du véhicule n , v_n sa vitesse, γ_n sa capacité maximale de décélération et s_n son interdistance nette.

L'indicateur de sécurité cumulative J-value est donné par :

$$J(n) = \begin{cases} 0 & \text{si } G(n) = 0 \\ J(n+1) + G(n+1) & \text{si } G(n) > 0 \end{cases} \quad (2.50)$$

Comme le DWT, l'indicateur de niveau de sécurité $G(n)$ dépend seulement des propres paramètres au véhicule. Il est plus judicieux de prendre en compte les paramètres du véhicule prédécesseur pour évaluer le niveau de sécurité d'un véhicule.

Dans un contexte de conduite en file, [Aron et al., 2003] ajoutent un indicateur de la sécurité individuelle relatif à la file. Pour le véhicule n , son risque individuel (RI) lié à la file est la somme des risques de tous les véhicules qui sont devant. Le risque en file (RF) dans le cas de deux véhicules est donné comme suit :

$$\begin{aligned} \text{RF}(n) &= \text{RI}(n) + \text{RF}(n+1), \text{ si } \text{RF}(n+1) > 0 \\ \text{RF}(n) &= \text{RI}(n), \text{ si } \text{RF}(n+1) = 0 \end{aligned} \quad (2.51)$$

En général, cette méthode s'applique à l'évaluation d'un risque individuel d'un conducteur ou d'un véhicule automatisé. En effet, le risque individuel peut être évalué selon un des indicateurs cités précédemment.

Pour étendre l'application de cet indicateur de risque, il est plus judicieux de prendre en compte de deux choses :

- le risque engendré par les véhicules dans les voies voisines. En effet, comme la loi MOBIL, la condition de changement d'une voie à une autre doit tenir compte de l'ancien et du prochain véhicule successeur. Pour cette raison, le risque en file doit dépendre non seulement de sa propre file, mais aussi des autres files de véhicules dans les voies voisines.
- la normalisation de cet indicateur afin d'avoir un niveau de risque compris entre 0 et 100 %.

TABLE 2.4 – Tableau récapitulatif des indicateurs de sécurité

Indicateurs Référence	Description	Unité	Expression
TTC [Hayward, 1972]	Time To Collision	s	$TTC_n = \frac{s_n}{\Delta v_n}$
ITTC [Chin et al., 1991]	Inverse Time To Collision	s^{-1}	$ITTC_n = \frac{\Delta v_n}{s_n}$
MTTC [Yang et al., 2010]	Modified Time To Collision	s	$MTTC_n = \frac{-\Delta v_n \pm \sqrt{\Delta v_n^2 - 2\Delta a_n \Delta x_n}}{\Delta a_n}$
PICUD [Aron et al., 2003]	Potential Index for Collision with Urgent Deceleration	m	$PICUD_n = \frac{v_n^2}{2\gamma_{n+1}} - \frac{v_n^2}{2\gamma_n} + s_n - T_n v_n$
TET [Minderhoud and Bovy, 2001]	Time Exposed Time To Collision	s	$TET = \int_{t=0}^T \delta_n(t) dt$ $\delta_n(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } TTC \leq TTC^* \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
TIT [Minderhoud and Bovy, 2001]	Time Integrated Time to Collision	s^2	$TIT = \sum_{n=1}^N \int_0^T TTC_n^* - TTC_n(t) dt$ $\forall 0 \leq TTC_n(t) \leq TTC^*$
DWT [Derbel et al., 2012a]	DWell Time	s	$DWT = \int_{t=0}^T \delta_n(t) dt$ $\delta_n(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } \Delta x_n \leq \frac{v_n^2}{2\gamma_n} \\ 1 & \text{si } \Delta x_n \leq v_n T_n \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$ un conducteur un véhicule automatisé
MDWT	Modified DWell Time	s	$MDWT = \int_{t=0}^T \delta_n(t) dt$ $\delta_n(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } PICUD \leq 0 \\ 1 & \text{si } \Delta x_n \leq v_n T_n \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$ un conducteur un véhicule automatisé

CrI [Chan, 2006]	Criticality Index	$m^2 \cdot s^{-3}$	$CrI_n = \frac{v_n^2}{TTC_n}$
CI [Ozbay et al., 2008]	Crash Index	$m^2 \cdot s^{-3}$	$CI = \frac{(v_n + a_n \cdot TTC_n)^2 - (v_{n+1} + a_{n+1} \cdot TTC_{n+1})^2}{2} \cdot \frac{1}{MTTC_n}$
CID [Ozbay et al., 2008]	Crash Index Density	$m^2 \cdot s^{-4} / \text{veh}$	$CID = \sum \frac{CI_{ij} \cdot L_j}{T \cdot N \cdot L}$
IBDR [Aron et al., 2003]	Individual Braking Distance Risk	-	$R^D = \max \left(0, \log_2 \left(\frac{\frac{v_n^2}{2\gamma_n} - \frac{v_{n+1}^2}{2\gamma_{n+1}} + \tau_n v_n}{s_n} \right) \right)$
IBDRR [Aron et al., 2003]	Individual Braking Residual Distance Risk	-	$R^A = \max \left(0, \log_2 \left(\frac{\frac{T_f}{v_n} + \tau_n}{TIV_n} \right) \right)$
IBTR [Aron et al., 2003]	Individual Braking Time Risk	-	$R^F = \max \left(0, \log_2 \left(\frac{v_n}{2\gamma_n TIV_n} \right) \right)$
J-value [Pham et al., 2007]	Accumulative safety indicator	-	$G(n) = \max \left[0, \log_2 \left(\frac{1}{2} \frac{v_n}{\gamma_n s_n} \right) \right]$ $J(n) = \begin{cases} 0 & \text{si } G(n) = 0 \\ J(n+1) + G(n+1) & \text{si } G(n) > 0 \end{cases}$

2.2.4 Conclusions

Cette section a présenté les indicateurs de risque permettant l'évaluation de l'impact d'un système d'aide à la conduite (ADAS) sur la sécurité dans un trafic. Ces indicateurs sont classés selon les types de scénarios. La première classe concerne ceux relatifs aux scénarios avec collisions. Dans ces derniers, le nombre de collisions et leurs gravités constituent les indicateurs les plus pertinents pour évaluer la situation dans le trafic. Cette gravité est évaluée à travers l'Equivalent Barrier Speed (EBS) dans le cas d'un scénario comme le mur de brique et l'Equivalent Energy Speed (EES) dans le cas d'un freinage d'urgence.

La deuxième classe des indicateurs concerne les scénarios sans collision. Dans ce cas, l'évaluation de la sécurité se fait par rapport au pourcentage des véhicules automatisés dans le trafic. Ces indicateurs, présenté par le tableau 2.4, se basent sur le Time To Collision (TTC) et ses variants. De tels indicateurs présentent l'inconvénient du choix de la valeur critique du TTC. Pour cette raison, le DWell Time (DWT) est présenté par [Derbel et al., 2012b]. Mais cet indicateur reste incapable de représenter le niveau de la sécurité puisqu'il dépend seulement des propres paramètres du véhicule. Ainsi, le Modified DWell Time (MDWT) pallie cet inconvénient et remplace la distance critique pour le conducteur par un test sur le signe de l'indicateur Potential Index for Collision with Urgent Deceleration (PICUD). Ce dernier se base sur la différence entre les distances de freinage de deux véhicules dont le premier freine brusquement et son successeur freine après un temps de réaction estimé à une seconde. Les indicateurs dérivés du TTC sont le Inverse Time To Collision (ITTC) et le Modified Time To Collision (MTTC). Ces deux derniers sont utilisés, par la suite, pour évaluer la probabilité d'occurrence d'une collision entre deux véhicules. D'autres indicateurs comme le Time Exposed To TTC, sont basés sur le choix d'une valeur critique du TTC pour déterminer le niveau du risque de la conduite. Par ailleurs, nous trouvons des indicateurs, comme le J-value, basés sur le cumul des niveaux de risque instantanés durant la période de conduite (en simulation).

La prochaine section est consacrée à l'étude de la consommation en carburant et des émissions de polluants du véhicule. Cette étude a pour objectif l'évaluation de l'impact des véhicules automatisés sur la consommation en carburant dans un trafic mixte.

2.3 Modèles de consommation et d'émission des polluants pour le trafic mixte

2.3.1 Introduction

La consommation de carburant et les émissions des polluants des véhicules sont deux aspects essentiels pris en compte dans l'industrie de l'automobile. Afin de réduire les émissions des gaz à effet de serre (GES), les autorités exigent aux constructeurs de l'automobile d'avoir des véhicules plus efficaces, utiliser des combustibles alternatifs et réduire les émissions de carbone. Dans ce cadre, des programmes sont mis en oeuvre par l'état pour encourager la recherche et le développement dans cet axe. L'éco-conduite est l'un de ces programmes dont l'objet central est de fournir une variété de conseils aux conducteurs en termes de réduction de la consommation et d'émission des polluants. Les conseils spécifiques comprennent des éléments tels que le maintien d'une vitesse constante, l'anticipation du flux du trafic, l'accélération et la décélération en douceur et garder le véhicule en bon état d'entretien. Ainsi ce programme est divisé en différents sous programmes dont l'objectif est l'amélioration de la consommation de carburant de l'ordre de 5 à 15%.

Au niveau de la recherche, depuis 1985, de nombreux travaux portant sur l'évaluation et la réduction de la consommation et des émissions de polluants ont fait l'objet de la recherche scientifique dans le domaine de l'automobile. En France, l'INRETS²⁰, actuellement IFSTTAR²¹, est un acteur potentiel de recherche dans le domaine de transport routier. Sa mission consiste en la réalisation, l'orientation, l'animation et l'évaluation des recherches, des développements et des innovations de la mobilité et des moyens de transport et leur sécurité. Cette mission consiste en la conduite de recherches fondamentales et appliquées. Par exemple, le projet Automatisation Basse Vitesse (ABV), conduit par l'IFSTTAR, fait parti du programme d'éco-conduite en France. Parmi les tâches importantes de ce projet, nous citons l'amélioration simultanée de la sécurité du conducteur et la consommation en carburant du véhicule. Notre tâche, qui est la huitième du projet, consiste à évaluer l'impact des véhicules automatisés sur la consommation et l'émission des polluants. Pour modéliser ces deux aspects, une étude des facteurs agissant sur l'excès de la consommation s'impose. Selon [Samuel et al., 2002], plusieurs facteurs comme le style de conduite, l'entretien du véhicule et la géométrie de la route influent sur la consommation en carburant. Les travaux de [Biggs and Akcelik, 1986], [Post et al., 1985] et [Luu, 2009] permettent d'obtenir des modèles pertinents et fiables au niveau du calcul de la consommation en carburant du véhicule.

Les émissions de polluants sont fortement liées à la consommation en carburant du véhicule. Selon [Barth et al., 1988], les émissions des gaz à effet de serre d'un véhicule dépendra de plusieurs paramètres de fonctionnement, mais principalement du ratio air-carburant, la puissance du moteur et sa vitesse. Pour calculer les taux d'émission pour différents types de véhicules, des modèles mathématiques d'émission sont utilisés. Ces modèles calculent séparément les émissions, comme HC , CO , NO_x , PM , et CO_2 au moment du démarrage et les émissions en cours de circulation. À cet égard, nous citons deux modèles, l'un dynamique et l'autre est statique. Les modèles dynamiques permettent le calcul instantané des émissions des particules polluantes dans l'air, alors que les modèles statiques sont basés sur la vitesse du véhicule, à une accélération constante.

Cette section présente, en premier lieu, les facteurs et les paramètres influents sur la consommation du véhicule et l'émission des polluants. En deuxième lieu, elle présente un état-de-l'art

20. Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité.

21. Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux

des modèles de consommation avant de présenter celle des modèles d'émission en troisième lieu. Pour clôturer cette section, des conclusions et des perspectives seront synthétisées.

2.3.2 Facteurs et paramètres influents sur la consommation et les émissions de polluants d'un véhicule

Selon l'UTAC, plusieurs facteurs favorisent la surconsommation et l'excès d'émission de polluants de manières directes et indirectes. Les facteurs directs sont liés à la nature du carburant et aux caractéristiques du véhicule. Les facteurs indirects, quant à eux, sont liés à l'environnement du véhicule et à la nature de la conduite (conduite manuelle ou automatique, caractéristiques du conducteur...).

Cette sous-section est divisée selon ces deux types de facteurs et présente les paramètres les plus pertinents de la surconsommation et l'excès d'émission de polluants.

2.3.2.1 Facteurs directs

— Caractéristiques du véhicule :

En premier lieu, la masse du véhicule est un facteur de surconsommation et d'augmentation du taux d'émission des polluants dans l'air. En effet, un véhicule lourd exige plus de puissance qu'un véhicule plus léger pour surmonter les forces aérodynamiques et la résistance au roulement.

En deuxième lieu, le type de motorisation du véhicule, essence ou diesel, influence le taux d'émission des polluants. En effet, une motorisation diesel émet moins de polluants qu'une motorisation essence.

Finalement, selon [Ahn, 1998], les taux d'émission varient avec l'âge du véhicule. En effet, les véhicules plus anciens produisent des émissions plus élevées que les nouveaux véhicules pendant le fonctionnement normal et le démarrage. En outre, les véhicules plus anciens ne sont pas tenus aux mêmes normes restrictives que les véhicules plus récents. Selon l'EPA, les véhicules des années 1975 émettent trois fois plus de quantité de CO et de HC que les véhicules des années 1990.

— Composition du carburant :

La composition du carburant peut être aussi un facteur de surconsommation et d'émission de polluants. Cela rentre dans le contexte du cycle de synthèse du carburant à partir du pétrole brut et principalement dans l'étape du raffinage. En effet, un carburant bien raffiné permet de réduire les émissions des gaz à effet de serre. Selon [Ozkan et al., 2012], le CO_2 , CO , HC , NO_2 , SO_2 et le PM constituent une partie importante des émissions d'échappement d'un moteur diesel. Comme la combustion dans les moteurs diesel dépend essentiellement du coefficient d'air, l'émission de HC et CO résultant se trouve à un niveau négligeable. Avec les progrès de la technologie de synthèse du carburant diesel, la quantité de soufre dans ce carburant a été réduite et la quantité de SO_2 émise par l'échappement a sensiblement diminué. Pour les moteurs diesel, le NO_x , CO_2 et les PM sont les principales particules émises à prendre en considération.

— Équipements du véhicule :

La climatisation est une option qui offre un confort à son utilisateur. Cette option exige une puissance additionnelle de la part du moteur. Par conséquent, la consommation du carburant et du taux des émissions de polluants deviennent plus importantes.

— **Entretien du véhicule :**

L'entretien du véhicule permet de diminuer la consommation du véhicule. Par exemple, une pression faible des pneus augmente la consommation du véhicule. Une maintenance continue du véhicule permet de réduire les émissions.

2.3.2.2 Facteurs indirects

— **Caractéristiques du conducteur :**

Les émissions varient en fonction du style de conduite, l'attitude, l'expérience, le sexe, la condition physique et l'âge des conducteurs.

— **Style de conduite :**

Le style de conduite peut avoir une incidence significative sur la consommation de carburant, mais il est souvent difficile de savoir comment bien contrôler le véhicule pour une consommation optimale en carburant et par suite un minimum d'émission de polluants. L'accélération et le freinage excessifs augmentent la consommation de carburant aussi que l'émission des polluants. Par conséquent, la conduite à vitesse constante, à travers un régulateur de vitesse, permet de rester dans les normes de consommations de carburant pour un véhicule. D'après [Vlieger et al., 2000], une conduite agressive est dotée d'accélération et de décélérations successives de façon que le véhicule consomme plus de carburant en regardant la puissance demandée par le véhicule de la part de son moteur. [Samuel et al., 2002] ont révélé que la plupart des conducteurs passent environ 2% de la durée totale de conduite en mode agressif, ce qui contribue à environ 40% des émissions totales. Ainsi, l'accélération et la vitesse constituent deux paramètres importants d'un modèle de consommation d'un véhicule.

— **Attitude du conducteur :**

[Ozkan et al., 2012] ont analysé l'effet des caractéristiques du conducteur sur la consommation du véhicule à Istanbul en Turquie. Cette analyse montre que l'attitude du conducteur a une grande importance sur la consommation du carburant du véhicule.

— **Expérience du conducteur :**

Selon [Ericsson, 2000] et [Freij and Ericsson, 2005], l'expérience du conducteur possède une influence sur la consommation du véhicule. En effet, un conducteur expérimenté peut anticiper les accélérations, les décélérations et les changements de vitesse. Ces actions ont une grande importance dans la diminution de la consommation du véhicule.

— **Âge du conducteur :**

D'après [Wasielowski and Evans, 1985], l'âge du conducteur joue aussi un rôle très important dans la consommation du véhicule. En effet, la vitesse moyenne des conducteurs âgés diminue systématiquement pour avoir plus de sécurité vu leurs temps de réaction très élevés. De ce fait, la consommation diminue quand l'âge du conducteur augmente.

— Conditions de circulation :

Les conditions de circulation constituent un élément très important dans l'évaluation de la consommation et d'émission de polluants d'un véhicule. Selon [Vlieger et al., 2000] et [Andre and Hammarstrom, 2000], la dégradation des conditions de circulation, comme la congestion du trafic, augmentent l'émission des polluants et réduisent la vitesse du véhicule.

— Géométrie de la route :

Celle-ci peut causer la surconsommation de carburant du véhicule particulièrement dans le cas d'une faible motorisation. Dans une route ayant une grande pente, le véhicule doit fournir plus de puissance pour surmonter les forces de résistance au roulement (dépendent de l'angle de la route). En outre, le véhicule consomme plus de carburant en montée d'une pente que dans le cas d'une descente.

— Caractéristiques de la chaussée :

Une étude de [Galín, 1981] conclue que les caractéristiques de la chaussée le long de la route peuvent avoir une influence significative sur la vitesse du véhicule. En effet, le conducteur peut avoir des accélérations et des décélérations successives à cause de la mauvaise qualité des chaussées.

— Forces aérodynamiques :

Celles-ci possèdent une influence sur la consommation du véhicule lorsque la surface de contact du véhicule avec l'air est relativement grande. Dans le cas d'un vent très grand s'opposant à la conduite, le véhicule consomme plus de carburant et émet plus de polluants.

— **Caractéristiques du trafic :**

La densité, le débit, le nombre de feux de circulation par kilomètre, la coordination du signal et le nombre d'arrêts par kilomètre sont des variables liées à la circulation.

[Hallmark et al., 2002] ont constaté que les habitudes de conduite à différentes intersections sont fortement influencées par la position dans la file, le volume de la voie en aval et en amont et la vitesse du véhicule.

[Rakha et al., 2000] ont approuvé que la coordination appropriée de signal pourrait réduire les émissions jusqu'à 50%.

La congestion dans le trafic a été mentionnée toujours comme un facteur important de pollution de l'air ([Carr et al., 2002], [Oduyemi and Davidson, 1998]).

[Smit, 2006] a étudié la sensibilité de la quantité totale de polluant émise par les véhicules par rapport à la densité du réseau urbain de Brisbane en Australie. Cette analyse a montré que la congestion est le contributeur le plus important de l'émission de CO et HC .

À travers les modèles de consommation et d'émission de polluants MOBILE et EMFAC, présentés dans la suite de cette section, [Smit et al., 2008] ont étudié la consommation du véhicule et son émission de polluants. Ils constatent que la plupart de ces modèles ne prennent pas en considération le facteur de congestion malgré son importance dans l'augmentation des taux de polluants dans l'air et la surconsommation du véhicule.

[Ericsson, 2001] a montré que le nombre et la durée de l'arrêt d'un véhicule augmentent significativement la consommation du véhicule et par voie de conséquence les émissions.

— **Facteurs météorologiques :**

Les variables liées aux conditions météorologiques comme la température, l'humidité, la visibilité et la vitesse du véhicule possèdent une grande influence sur la consommation du véhicule et l'émission des polluants. Une étude de [Kilpelaninen and Summala, 2004] ainsi que celle d'[Andre and Hammarstrom, 2000] ont montré que le mauvais temps réduit la vitesse de 19 km.h^{-1} à 22 km.h^{-1} et par conséquent la consommation en carburant et les émissions de polluants.

— **Forces influentes sur la consommation du véhicule :**

La deuxième loi fondamentale de la dynamique formulée par Sir Isaac Newton²² permet d'étudier la dynamique du véhicule. Cette loi est appliquée pour deux types de mouvements, en l'occurrence celui de translation et celui de la rotation.

Mouvement de translation

Cette loi est énoncée comme suit :

Dans un référentiel Galiléen, la variation de la quantité de mouvement est égale à la somme des forces extérieures qui s'exercent sur le solide, soit

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_i \vec{F}_i \quad (2.52)$$

L'expression donnée par l'équation (2.52) peut être simplifiée si la masse du solide est constante. Ainsi on aura l'énoncé suivant : la somme des forces extérieures appliquées à un système en translation dans un référentiel Galiléen est égale à son accélération multipliée par sa masse.

$$\sum F_n^{ext} = m_n a_n^G \quad (2.53)$$

avec F_n^{ext} les forces extérieures du véhicule n , m_n sa masse, a_n^G son accélération longitudinale.

Mouvement de rotation

22. Sir Isaac Newton (1642-1727) est un philosophe, mathématicien, physicien, alchimiste, astronome et théologien anglais.

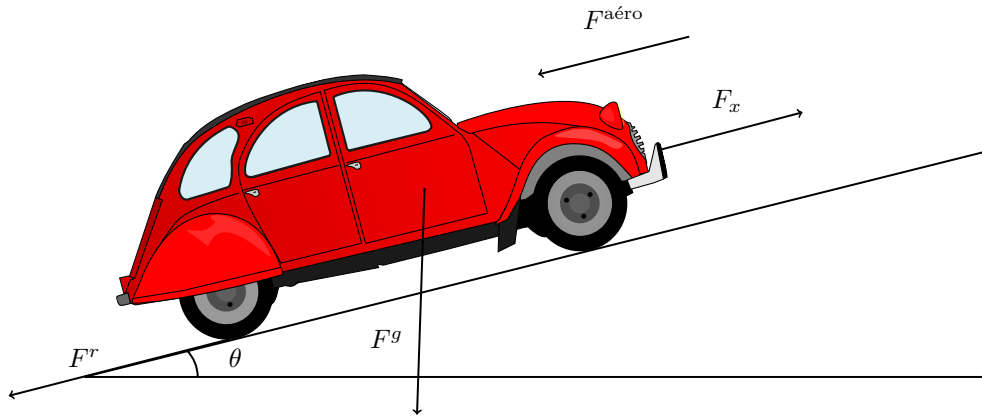


FIGURE 2.4 – Bilan des forces extérieures au véhicule

Cette loi est énoncée comme suit :

La somme des moments extérieurs, exprimés en un point O et appliqués à un corps solide en mouvement, est égale au moment dynamique de ce corps exprimé au point O :

$$\sum T_n^x = I_n^{xx} \cdot \alpha_n^x \quad (2.54)$$

avec T_n^x les moments des forces agissant sur le véhicule n , I_n^{xx} le moment d'inertie autour de l'axe x et α_n^x l'accélération angulaire autour du même axe.

1. Forces aérodynamiques

Cette force dépend principalement de la surface frontale du véhicule, sa vitesse et sa traînée aérodynamique. Son expression est donnée sous la forme suivante :

$$F_n^{\text{aéro}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_n \cdot C_x \cdot v_n^2 \quad (2.55)$$

avec $F_n^{\text{aéro}}$ la force aérodynamique [N], ρ la masse volumique de l'air ($1,3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), S_n la surface frontale du véhicule n [m^2], C_x le coefficient de traînée aérodynamique et v_n la vitesse du véhicule n [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$].

2. Forces de résistance au roulement

Selon [Biggs, 1988], la force de résistance au roulement est la somme de toutes les forces, en dehors de la traînée aérodynamique, agissant sur le véhicule en roue libre (c'est-à-dire avec le moteur débrayé). Ainsi, elle comprend toutes les forces de friction à partir de la sortie de la boîte d'engrenage aux roues et les forces de résistance au roulement.

Souvent, à vitesse constante, la force de résistance au roulement est calculée à travers l'équation suivante :

$$F_n^r = m_n \cdot g \cdot C_r \cdot \cos \theta_n \quad (2.56)$$

avec F_n^r la force de résistance au roulement [N], C_r le coefficient de résistance au roulement et θ_n la pente de la route à la position du véhicule n .

Le calcul du coefficient de résistance au roulement dépend de la nature du véhicule. Par exemple, [Watanatada et al., 1987] et [Greenwood and Bennett, 2003] proposent l'expression suivante :

$$C_r = \begin{cases} 0,0218 + 0,00061 \cdot IRI & \text{Pour les voitures} \\ 0,0139 + 0,00026 \cdot IRI & \text{Pour les autobus} \end{cases} \quad (2.57)$$

avec IRI le coefficient de rugosité.

3. Forces gravitationnelles

Sur une route inclinée, l'expression du poids du véhicule est donnée sous la forme suivante :

$$F_n^g = m_n \cdot g \cdot \sin \theta_n \quad (2.58)$$

avec F_n^g le poids du véhicule n .

Le modèle dynamique du véhicule, présenté par la figure 2.4, prend en compte les forces et les paramètres qui influent d'une manière directe ou indirecte sur la consommation d'énergie du véhicule. L'application de la première loi fondamentale de la dynamique donne l'équation suivante :

$$m_n a_n = F_n^x + F_n^r + F_n^{\text{aéro}} + F_n^g, \quad (2.59)$$

avec F_n^x la force de traction longitudinale.

4. Force de traction longitudinale

Le couple moteur T_e délivré à l'arbre d'essieu est transmis à travers le système de transmission qui comprend l'embrayage, boîte de vitesses, l'arbre d'entraînement et le différentiel. En tenant compte des pertes mécaniques, l'expression de ce couple est donnée par [Luu et al., 2010] sous cette forme :

$$T_n^a = ((\eta_n \cdot T_n^e - (I_n^e + I_n^t) \cdot \dot{w}_n^e) \cdot N_n^t - I_n^d \cdot \dot{w}_d) N_n^f \quad (2.60)$$

avec N_n^t et N_n^f respectivement les rapports de multiplicité de la boîte et de la transmission, T_n^e le couple fourni par le moteur, \dot{w}_n^e la vitesse du moteur, I_n^e et I_n^t respectivement l'inertie du moteur et de la transmission, I_n^d et I_n^w respectivement le moment d'inertie de l'arbre de transmission et celui de la roue.

D'autre part, ce couple peut s'écrire sous la forme suivante :

$$T_n^a = r_n \cdot F_n^x + I_n^w \cdot \dot{w}_n^w \quad (2.61)$$

avec r_n le rayon de la roue.

Comme $\dot{w}_d = N_n^f \cdot \dot{w}_n^w$ et $\dot{w}_n^e = N_n^t \cdot \dot{w}_d = N_n^t \cdot N_n^f \cdot \dot{w}_n^w$, l'expression de la force longitudinale peut s'écrire comme suit :

$$F_n^x = \frac{1}{r} \left[\eta_n \cdot N_n^f \cdot T_n^e - ((I_n^e + I_n^t) \cdot N_n^{f2} \cdot N_n^{t2} + I_n^d \cdot N_n^{f2} + I_n^w) \cdot \dot{w}_n^w \right], \quad (2.62)$$

avec η_n l'efficacité de la transmission et w_n^w la vitesse de rotation de la roue.

— **Couple moteur :**

Le calcul du couple à travers la puissance du véhicule et le régime moteur est donné par l'équation suivante :

$$T_n^e = \frac{P_n}{\dot{\omega}_n^e} \quad (2.63)$$

avec T_n^e le couple moteur du véhicule n [N.m], P_n la puissance moteur du véhicule n [w], $\dot{\omega}_n^e$ le régime moteur du véhicule n [rad.s⁻¹].

— **Puissance moteur :**

Dans la plupart des modèles de consommation, la puissance du moteur est un facteur indispensable pour le calcul de la consommation d'un véhicule. Dans la littérature, on trouve plusieurs modèles. Ce paragraphe présente quelques uns tributaires de la littérature.

1. **Modèle d'EMITp**

Le modèle d'EMITp est le modèle d'EMIT relatif au calcul de la puissance. Ce modèle, utilisé par [Barth et al., 2000], est donné par l'expression suivante :

$$P_n = \frac{P_n^{\text{tract}}}{\epsilon_n} + P_n^{\text{acc}} \quad (2.64)$$

avec,

- P_n la puissance demandée par le moteur pour l'avancement [kW],
- ϵ_n l'efficacité du moteur,
- P_n^{acc} la puissance demandée par les accessoires du véhicule (exemple : climatisation).

Pour calculer la puissance de traction P_n^{tract} , [Luu, 2009] a présenté le modèle comme suit :

$$P_n^{\text{tract}} = A_E \cdot v_n + B_E \cdot v_n^2 + C_E \cdot v_n^3 + m_n \cdot a_n \cdot v_n + m_n \cdot g \cdot v_n \cdot \sin \theta_n, \quad (2.65)$$

avec m_n la masse du véhicule n [kg], g l'accélération de pesanteur, v_n la vitesse du véhicule n , θ_n la pente de la route à la position du véhicule n et a_n son accélération. Les constantes relatives à ce modèle sont données par [Cappiello et al., 2002] et représentées dans le tableau 2.5.

TABLE 2.5 – Paramètres du modèle d'EMITp

Paramètres	Désignation	Valeurs	Unités
A_E	Résistance au roulement	0,1326	Kw.m ⁻¹ .s
B_E	Coefficient de correction de la vitesse selon la résistance au roulement	$2,7384 \times 10^{-3}$	Kw.m ⁻² .s ²
C_E	Coefficient de traînée aérodynamique	$1,0843 \times 10^{-3}$	Kw.m ⁻³ .s ³
m_n	Masse du véhicule	1325	Kg
θ_n	Pente de la route	0	Degrés

La figure 2.5 présente l'allure de la puissance de traction sur une route plane à vitesse constante (accélération nulle). D'après cette figure, la puissance du moteur augmente avec l'augmentation de la vitesse du véhicule.

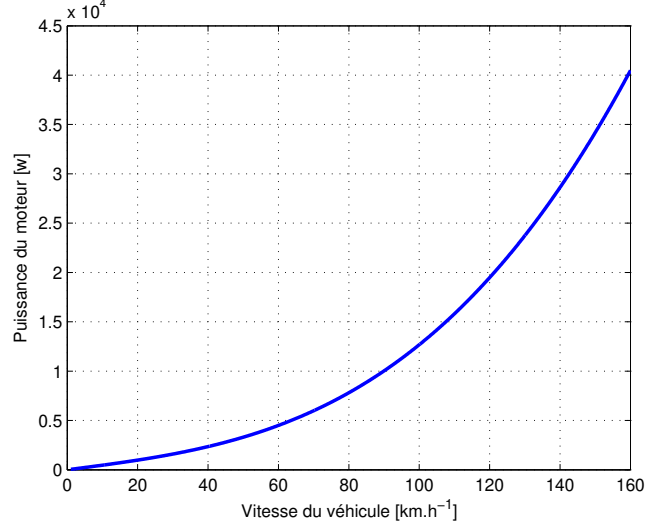


FIGURE 2.5 – Puissance de traction selon le modèle de [Luu, 2009]

Un deuxième modèle est donné par [Barth et al., 2004] sous la forme suivante :

$$P_n^{\text{tract}} = (m_n \cdot a_n + m_n \cdot g \cdot v_n \sin \theta_n + \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot S_n \cdot \rho \cdot v_n + m_n \cdot g \cdot C_r \cdot \cos \theta_n) \frac{v_n}{1000} \quad (2.66)$$

avec C_x le coefficient de traînée aérodynamique, ρ la densité de l'air, S_n la surface frontale du véhicule, C_r le coefficient de résistance au roulis.

2. Modèle de Capiello

Le modèle de [Capiello et al., 2002] a été utilisé par [Davis et al., 2005] et par l'organisation IVE (International Vehicle Emission) dans [IVE, 2008] pour le calcul de la puissance du moteur. Il est représenté par l'expression suivante :

$$P_n = v_n(1.1 \cdot a_n + g \cdot \sin \theta_n + 0.132) + 0.00302 \cdot v_n^3. \quad (2.67)$$

— Relation entre la vitesse et le régime moteur :

La relation entre le régime moteur et la vitesse du véhicule est donnée par l'expression suivante :

$$\dot{w}_n^e = S_n \frac{R_n(L)}{R_n(L_g)} v_n, \quad (2.68)$$

avec \dot{w}_n^e le régime du moteur du véhicule n [tr.min⁻¹], S_n le rapport du régime du moteur par la vitesse du véhicule n pour le plus grand rapport de la boîte vitesse L_g , $R_n(L)$ le rapport de multiplication entre le régime moteur et la vitesse des roues pour chaque rapport de vitesse L_g et $R_n(L_g)$ le rapport entre le régime moteur et la vitesse des roues pour le plus grand rapport de la boîte vitesse.

Le tableau 2.6 présente les rapports de transmission en fonction des positions de la boîte vitesse donnée par [Kiencke and L.Nielsen, 2000]. La figure 2.6 présente le régime moteur en fonction de la vitesse du véhicule en utilisant les données de ce tableau.

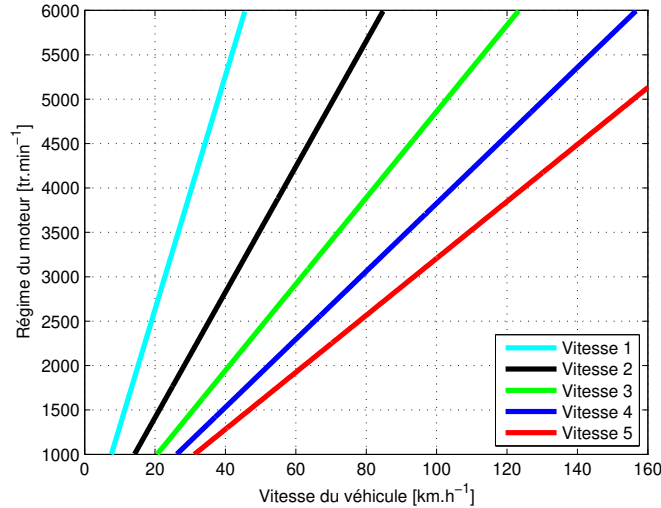


FIGURE 2.6 – Régime moteur en fonction de la vitesse du véhicule

TABLE 2.6 – Rapport de transmission pour chaque position de la boîte vitesse

Rapport de la boîte vitesse	1	2	3	4	5
Rapport de transmission	3,545	1,904	1,31	1,031	0,864

2.3.3 État de l'art des modèles de consommation

Les modèles de consommation du véhicule qui existent dans la littérature sont classés suivant trois types : modèle empirique, physique et mixte. La plupart de ces modèles prennent en considération la pente de la route, la vitesse et l'accélération du véhicule.

2.3.3.1 Modèles empiriques

Nous étalons dans ce qui suit une panoplie de modèles empiriques, lesquels nous permettront de mettre en exergue.

1. Modèle de Fonseca

[Casanova et al., 2009] ont présenté une étude préliminaire sur l'indice des performances dynamiques « DPI » pour un véhicule léger essence. Cet indice a été déterminé expérimentalement pour évaluer le style de conduite spécifique utilisé dans un essai bien déterminé. Selon [Fonseca et al., 2010], un nouvel indice de performance dynamique a été défini pour les véhicules légers diesel. Ils se sont basés sur les émissions et les mesures dynamiques effectuées dans des conditions réelles de circulation pour cinq véhicules diesel légers. Les paramètres de ces derniers sont présentés dans le tableau 2.8. Les variables dynamiques

qui ont été analysées sont : la vitesse moyenne, d'accélération moyenne positive, le pourcentage de temps au-dessus d'un certain régime moteur, le pourcentage de temps dans chaque position de la boîte vitesse et la puissance demandée définie par [Ericsson, 2001]. Notant que le pourcentage de temps n'inclut pas le temps quand la voiture est à l'arrêt. Ainsi l'indice de performance dynamique d'un moteur diesel « DPDi » (en anglais : Dynamic Performance Diesel index) peut être exprimé comme suit :

$$\text{DPDi} = 1.58 \cdot 10^{-3} \cdot \mathcal{T}_1 + 2.05 \cdot 10^{-3} \cdot \mathcal{T}_2 + 1.48 \cdot 10^{-3} \cdot T_{1850} + 5.82 \cdot 10^{-2} \cdot a_n^{moy} \quad (2.69)$$

avec \mathcal{T}_1 le pourcentage de temps, par rapport au temps du trajet, pendant lequel le conducteur roule avec le premier rapport de vitesse, \mathcal{T}_2 le pourcentage de temps, par rapport au temps du trajet, pendant lequel le conducteur roule avec le deuxième rapport de vitesse, T_{1850} le pourcentage de temps pendant lequel le conducteur roule avec un régime moteur supérieur à 1850 tr.min⁻¹ et a_n^{moy} l'accélération moyenne du véhicule sans prendre en considération les décélérations.

TABLE 2.7 – Valeurs de DPDi selon le style de conduite [Fonseca et al., 2010]

DPDi	Style de conduite
0,33	Conduite économique
0,49	Conduite normale
0,74	Conduite sportive

[Fonseca et al., 2010] présentent un modèle empirique de consommation pour différents types de véhicule. Ce modèle dépend du style de conduite ainsi que de la vitesse moyenne. Il est donné par

$$FC_n = k_0 + k_1 \cdot \frac{1}{v_n^{moy}} + k_2 \cdot Sl_n + k_3 \cdot \text{DPDi}_n, \quad (2.70)$$

avec FC_n la consommation du véhicule n [$\ell/100\text{km}$], $k_0 \dots k_3$ des constantes calculées par analyse de régression multiple et sont données par le tableau 2.8, v_n^{moy} la vitesse moyenne du véhicule n , DPDi_n l'indice de la performance du moteur diesel et Sl_n la pente de la route [%].

TABLE 2.8 – Coefficients relatifs au modèle consommation de [Fonseca et al., 2010]

Véhicule de test	k_0	k_1	k_2	k_3
Peugeot 406	-0,3474	48,2355	0,5899	12,8849
Reneault Laguna 2005	0,1196	41,1305	0,6620	12,8349
Citröen C4	0,4077	39,0072	0,6390	8,8021
Reneault Laguna 2008	-0,9273	41,9819	0,7481	14,9574
Seat Leon	-1,6971	34,6786	0,8766	17,6009

2. Modèle de Post

Le modèle de [Post et al., 1985], dont la consommation instantanée du véhicule est fonction de la puissance appliquée, est donné par l'expression suivante :

$$FC_n = \begin{cases} \alpha + \beta P_n & P_n > 0 \\ \alpha & P_n = 0, \end{cases} \quad (2.71)$$

avec FC_n la consommation instantanée en carburant du véhicule n [ml.s^{-1}], α la consommation au ralenti du véhicule n [ml.s^{-1}], β le facteur de l'efficacité moyenne du véhicule n [$\text{ml.s}^{-1}.\text{kW}^{-1}$] et P_n la puissance totale du véhicule n [kW].

3. Modèle de Biggs et Akcelik

[Biggs and Akcelik, 1986] présentent un modèle empirique donné par l'expression suivante :

$$FC_n = \alpha + \beta_a P_a + \beta_c P_c, \quad (2.72)$$

avec β_a et β_c des paramètres d'efficacités du véhicule n , P_a la puissance totale d'avancement à vitesse constante du véhicule n et P_c la puissance totale due aux effets d'inertie du véhicule n .

Ce modèle est plus précis que celui de [Post et al., 1985] puisqu'il différencie les deux types de puissance (la puissance d'avancement et la puissance totale due aux effets d'inertie) avec leurs coefficients d'efficacités.

4. Modèle de Heshner et Harrison

Le modèle de [Heshner and Harrison, 1987] introduit le gradient de la route et la vitesse du véhicule. Ce modèle empirique est donné par

$$FC_n = a_0 + \frac{a_1}{v_n} + a_2 v_n^2 + a_3 RISE + a_4 FALL + a_5 IRI, \quad (2.73)$$

avec FC_n la consommation instantanée en carburant du véhicule n [$\ell/1000\text{km}$], v_n la vitesse [km.h^{-1}], $RISE$ la pente croissante de la route, $FALL$ la pente décroissante de la route, IRI l'indice international de rugosité [m.km^{-1}] et $a_0 \dots a_5$ des constantes.

Ce modèle prend en compte la vitesse du véhicule et la pente de la route. Puisqu'il inclut un coefficient de pondération pour chaque signe de la pente, ce modèle peut être utile pour le calcul de la consommation d'un véhicule circulant sur une route montagneuse.

5. Modèle de Rakha

Le modèle de [Rakha et al., 2000], est présenté sous la forme d'un polynôme de troisième degré. Le calcul instantané de la consommation est fonction de la vitesse et l'accélération du véhicule. Ce modèle a été testé sur différents camions et véhicules. Il consiste à faire varier l'accélération entre $-1,7 \text{ m.s}^{-2}$ et $3,7 \text{ m.s}^{-2}$ avec un pas d'incrémenta-tion de $0,3 \text{ m.s}^{-2}$. Ce modèle se divise en deux sous-modèles afin de distinguer la phase d'accélération et celle de décélération. Il est donné sous la forme suivante :

$$\ln(FC_n) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 (L_{ij} v_n^i a_n^j) & a_n \geq 0 \\ \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 (M_{ij} v_n^i a_n^j) & a_n < 0 \end{cases} \quad (2.74)$$

avec FC_n la consommation instantanée du véhicule n [$\ell.s^{-1}$], v_n la vitesse du véhicule n [$m.s^{-1}$], a_n l'accélération du véhicule n [$m.s^{-2}$], L_{ij} et M_{ij} les coefficients de régression du modèle dans le cas d'accélération et de décélération respectivement.

L'inconvénient de l'approche empirique réside dans le fait qu'elle dépend des caractéristiques du véhicule étudié. Pour généraliser les modèles empiriques, comme ça était confirmé par [Luu, 2009], il faut introduire des paramètres moyens avec l'imprécision de leurs estimations. Par contre, cette approche est parfois plus directe et plus facile que si on dispose déjà de données expérimentales.

6. Modèle de Lee

[Lee et al., 2011] présentent un modèle de consommation pour un véhicule essence donné par l'expression suivante :

$$FC_n = a \cdot (\dot{w}_n^e)^2 + b \cdot \dot{w}_n^e + c, \quad (2.75)$$

avec $a = 1,337e^{-10}$, $b = -1,986e^{-7}$ et $c = -1,021e^{-4}$.

2.3.3.2 Modèles mécaniques

Les modèles mécaniques prédisent que la consommation de carburant d'un véhicule est proportionnelle aux forces agissantes.

Ce type de modèles présente une amélioration des modèles empiriques. En effet, ils se permettent des changements dans les caractéristiques du véhicule et sont intrinsèquement plus souple lorsqu'il s'agit de leurs applications dans différentes conditions.

1. Modèle de Ahn et Ross

Le modèle de [Ahn and Ross, 1993] est donné par l'expression suivante :

$$FC_n = \begin{cases} \phi \left(K_n \cdot \dot{w}_n^e \cdot v_n + \frac{P_n}{\eta_n} \right) & P_n > 0 \\ K_{idle} \cdot (\dot{w}_n^e)_{idle} \cdot V_n & P_n = 0, \end{cases} \quad (2.76)$$

avec FC_n la consommation en carburant du véhicule n [$g.s^{-1}$], K_n le coefficient de frottement du moteur du véhicule n [$kj.\ell.rev^{-1}$], \dot{w}_n^e le régime moteur du véhicule n [$tr.s^{-1}$], V le volume du cylindre du véhicule n , η_n le rendement du moteur du véhicule n , K_{idle} le coefficient de frottement du moteur au ralenti du véhicule n [$kj.\ell.rev^{-1}$], $(\dot{w}_n^e)_{idle}$ le coefficient lié à la vitesse au ralenti du véhicule n , P_n la puissance de sortie du moteur du véhicule n [kW].

2. Modèle de ARRB

Le laboratoire Australian Road Research Board (ARRB) a proposé un modèle mécanique de consommation donné par l'expression suivante :

$$FC = \max(\alpha, \beta P_{\text{tot}}), \quad (2.77)$$

avec FC la consommation en carburant [$\text{m}\ell.\text{s}^{-1}$], α la consommation au ralenti [$\text{m}\ell.\text{s}^{-1}$], β le facteur d'efficacité en carburant [$\text{m}\ell.\text{s.kW}^{-1}$] et P_{tot} la puissance totale demandée [kW].

L'inconvénient de ce modèle est la non prise en compte du style de conduite. En effet, le rapport de vitesse possède une influence sur la consommation : la conduite à basse vitesse avec un grand rapport augmente la consommation du véhicule.

Pour mesurer la consommation au ralenti α , [Bowyer, 1984] propose le modèle suivant :

$$\alpha = 0,220D + 0,0193D^2 \quad (2.78)$$

avec D le cylindrée du véhicule.

Les détails de calcul de la consommation au ralenti se trouvent dans [Greenwood, 2003].

3. Modèle de Bester

[Bester, 1981] propose un modèle similaire à celui présenté par [Hesher and Harrison, 1987]. Ce modèle est donné par l'expression suivante :

$$FC_n = a_0 + \frac{a_1}{v_n} + a_2 v_n^2 + a_3 RISE + a_4 a_n \quad (2.79)$$

avec a_0 lié à la consommation au ralenti, a_1 lié à la résistance aux roulis, a_2 lié à la résistance aérodynamique, a_3 lié à la résistance gravitationnelle, a_4 lié à l'accélération du véhicule.

La différence entre le modèle de [Hesher and Harrison, 1987] et celui de [Bester, 1981] réside dans la définition des paramètres $a_0 \dots a_4$. En effet, [Hesher and Harrison, 1987] relie ces paramètres aux différentes forces résistantes appliquées au véhicule.

L'inconvénient du modèle de [Bester, 1981] est la non prise en compte explicite du régime moteur dans sa modélisation malgré son importance dans le calcul de la consommation de carburant.

L'avantage de l'approche mécanique est qu'elle est plus simple et générique par rapport à l'approche empirique. Toutefois, il faut passer par une étape d'estimation des forces résistantes et d'identification des paramètres. Afin d'avoir un modèle de consommation adéquat, quelques modèles « mixtes », qui combinent les deux approches empirique et mécanique, sont présentés dans le prochain paragraphe.

2.3.3.3 Modèles mixtes

Parmi les modèles mixtes, nous citons celui d'EMIT et de Luu. Ces modèles sont présentés dans ce paragraphe.

1. Modèle mixte d'EMITc

Soient les hypothèses suivantes :

- la route est plane,
- P_{acc} est nulle,
- les effets de K , N , ϵ , ϕ sur la consommation sont en accord avec l'évolution de v_n , v_n^2 , v_n^3 et $a_n.v_n$.

En tenant compte de ces hypothèses, le modèle d'EMITc est présenté sous la forme suivante [Luu, 2009] :

$$FC_n = \begin{cases} \alpha + \beta v_n + \gamma v_n^2 + \delta v_n^3 + \zeta a_n v_n & P_n^{\text{tract}} > 0 \\ \alpha' & P_n^{\text{tract}} = 0, \end{cases} \quad (2.80)$$

avec α , β , γ , δ et ζ des constantes, FC_n la consommation instantanée du véhicule n [ml.s^{-1}], a_n l'accélération instantanée du véhicule n [m.s^{-2}], v_n la vitesse du véhicule n [m.s^{-1}], P_n^{tract} la puissance fournie par le moteur du véhicule n et α' la consommation au ralenti du véhicule n .

2. Modèle de Luu

Une étude dans [Luu, 2009] propose un modèle de consommation donné par l'expression suivante :

$$FC_n = \begin{cases} \beta_1 + \beta_2 \cdot \dot{w}_n^e + \beta_3 \cdot \dot{w}_n^e \cdot T_n^e + \beta_4 \cdot T_n^e & T_n^e > 0 \\ \alpha + \eta \dot{w}_n^e + \theta (\dot{w}_n^e)^2 & T_n^e \leq 0, \end{cases} \quad (2.81)$$

avec β_1 , β_2 , β_3 , β_4 , α et η des constantes, \dot{w}_n^e le régime moteur du véhicule n [tr.min^{-1}], T_n^e couple moteur du véhicule n [N.m], FC_n la consommation instantanée du véhicule n en carburant [ml.s^{-1}]. Les valeurs des paramètres de ce modèle sont données par le tableau 2.9.

TABLE 2.9 – Valeurs des paramètres du modèle de [Luu, 2009]

β_1	β_2	β_3	β_4	α	η	θ
-1029.92481	1.41071	0.03475	11.86631	1086.27350	0.05276	0.00025

Dans ce modèle, l'effet de la pente est inclus implicitement dans les paramètres β_1 , β_2 , β_3 , β_4 , α et η . D'après [Luu, 2009], le modèle peut dépendre aussi de $(\dot{w}_n^e)^2$ et $(T_n^e)^2$. D'après leurs expériences, la performance de ce modèle est plutôt satisfaisante.

La figure 2.7, présente la consommation moyenne d'une voiture BMW à vitesse constante pour une distance de 100 km. Les valeurs des différents paramètres β_1 , β_2 , β_3 , β_4 , α et η ont été empruntées de [Luu, 2009]. Dans cette référence, le modèle est donné pour un calcul instantané de la consommation du véhicule. Nous l'avons modifié pour avoir la consommation à vitesse constante.

2.3.3.4 Conclusions

Ce paragraphe a présenté quelques modèles issus de la littérature pour calculer la consommation d'un véhicule. La plupart de ces modèles présentés prennent en compte la vitesse, l'accélération et le couple moteur du véhicule. Ils sont classés en trois types : empirique, mécanique et mixte. Ce dernier prend en compte à la fois l'aspect mécanique et empirique. Parmi les modèles les plus utilisés dans la littérature, on trouve le modèle EMITc, présenté par [Luu, 2009], et

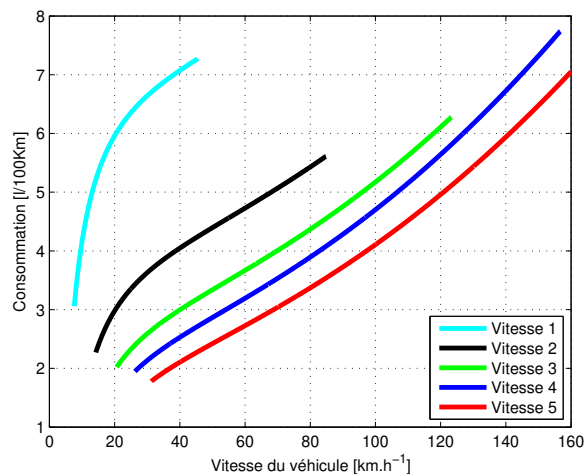


FIGURE 2.7 – Consommation du véhicule à vitesse constante : modèle de [Luu, 2009]

de [Bester, 1981]. Dans le chapitre 3, le modèle de [Luu, 2009] sera utilisé pour l'évaluation de l'impact des véhicules automatisés sur la consommation en carburant du véhicule. Ce choix a été fait en raison de la disponibilité des paramètres relatifs à ce modèle.

La consommation du véhicule est fortement liée à ses émissions de polluants dans l'air et aux gaz à effet de serre qu'il dégage. La prochaine sous-section présente un état-de-l'art des modèles d'émission de polluant et choisira le plus pertinent d'entre eux pour l'utiliser dans notre étude de l'impact des véhicules automatisés sur l'émission des polluants.

2.3.4 État de l'art des modèles d'émission des polluants

Deux types de modèles existent dans la littérature pour le calcul des émissions du véhicule. On trouve les modèles statiques et les modèles dynamiques.

2.3.4.1 Modèles statiques

Les estimations actuelles du taux d'émission à travers les modèles MOBILE et EMFAC sont exprimées en fonction de la vitesse moyenne et sont basées sur des essais avec un nombre limité de cycles de conduite. Les taux d'émission de références sont prises de la FTP (Federal Test Procedure) et qui sont relatifs aux trois phases suivantes : une phase de démarrage à froid, une phase de stabilisation et une phase de démarrage à chaud.

Selon [Guensler et al., 1993], dans le modèle EMFAC, le taux d'émission de référence est dérivé de la seule phase de stabilisation du cycle FTP avec une vitesse de fonctionnement moyenne de 25,6 km.h⁻¹. Pour développer ce modèle, des analyses par régression ont été effectuées pour chaque particule polluante et pour chaque groupe de technologie de véhicules. Le résultat du test des deux autres cycles ont été omis parce que le cycle au ralenti est considéré comme un mode sans charge.

d

2.3.4.2 Modèles dynamiques

[Cappiello et al., 2002] ont présenté le modèle d'EMIT pour le calcul de la quantité de CO_2 émise de l'échappement du véhicule [$g.s^{-1}$] donné par les expressions suivantes :

$$TP_{CO_2} = \begin{cases} \alpha_{CO_2} + \beta_{CO_2} v_n + \eta_{CO_2} v_n^2 + \delta_{CO_2} v_n^3 + \xi_{CO_2} a_n \cdot v_n & P_{tract} > 0 \\ \alpha'_{CO_2} & P_{tract} = 0, \end{cases} \quad (2.82)$$

avec, α_{CO_2} , β_{CO_2} , η_{CO_2} , δ_{CO_2} et ξ_{CO_2} , des constantes données par le tableau 2.10. Le mot EMITe réfère au modèle EMIT pour le calcul des émissions.

TABLE 2.10 – Paramètres du modèle d'EMITe

Paramètres	Valeurs	Unités
α_{CO_2}	1,1100	$g.s^{-1}$
β_{CO_2}	0,0134	$g.m^{-1}$
δ_{CO_2}	$1,9800 \times 10^{-6}$	$g.m^{-3}.s^2$
ξ_{CO_2}	0,2410	$g.m^{-2}.s^2$
α'_{CO_2}	0,9730	$g.s^{-1}$

Pour les autres particules, le calcul se fait comme suit. Soit $i=CO, HC, NO_x$

$$TP_i = EO_i \cdot CPF_i, \quad (2.83)$$

avec,

- TP_i la quantité de particule i émise par l'échappement du véhicule,
- EO_i la quantité de particule en i émise par le moteur,
- CPF_i une constante spécifique pour chaque modèle de véhicule qui dépend de la quantité de carburant introduite dans le moteur.

La quantité de EO_i de la particule i émise par le moteur est donnée par l'équation suivante :

$$EO_i = \begin{cases} \alpha_i + \beta_i v_n + \eta_i v_n^2 + \delta_i v_n^3 + \xi_i a_n \cdot v_n & \text{si } P_{tract} > 0, \\ \alpha'_i & \text{si } P_{tract} = 0, \end{cases} \quad (2.84)$$

où α_i , β_i , η_i , δ_i , ξ_i , sont des constantes données par [Cappiello et al., 2002].

Le modèle de [Ardekani et al., 2008] permet de calculer l'émission des particules CO , HC et NO_x [$g.s^{-1}$] sous la forme suivante :

$$HC = 0,018 + 5,668 \cdot 10^{-3} a_n \cdot v_n + 2,165 \cdot 10^{-4} \cdot a_n \cdot v_n^2 \quad (2.85)$$

$$CO = 0,182 - 8,587 \cdot 10^{-2} \cdot a_n \cdot v_n + 1,279 \cdot 10^{-2} \cdot a_n \cdot v_n^2 \quad (2.86)$$

$$NO_x = \begin{cases} 3,86 \cdot 10^{-3} + 8,767 \cdot 10^{-3} a_n \cdot v_n & \text{si } a_n \cdot v_n > 0, \\ 1,43 \cdot 10^{-3} - 1,830 \cdot 10^{-4} a_n \cdot v_n & \text{si } a_n \cdot v_n < 0. \end{cases} \quad (2.87)$$

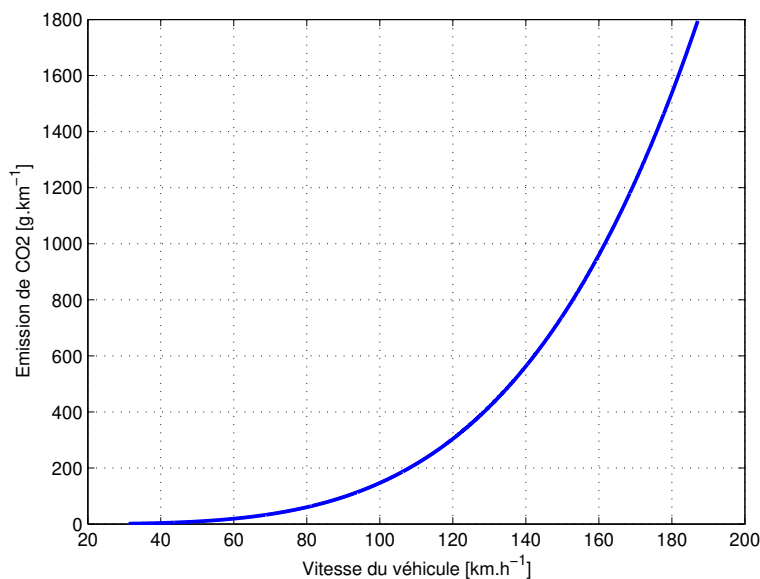


FIGURE 2.8 – Emission de CO_2

2.3.4.3 Calcul des émissions de CO_2 à partir de la consommation

D'après [Ecoscore, 2013], les émissions de CO_2 peuvent être calculées à partir de la consommation en carburant, soit :

- Un litre de diesel pèse 835 grammes dont 86,2% de cette quantité est du carbone (C). Pour brûler cette quantité en CO_2 , 1 920 g d'oxygène sont nécessaires. Ce qui donne 2 640 g de CO_2 par litre de diesel.
- Dans un litre d'essence, on trouve 87% de carbone (C). Pour brûler cette quantité, 1 740 g d'oxygène sont nécessaires. Ce qui donne 2 392 g de CO_2 par litre d'essence.
- Un litre de LPG, qui pèse 550 grammes, possède 82,5% de carbone (C), ce qui correspond à 454 g de C par litre de LPG. Pour brûler ce C en CO_2 , 1 211 g d'oxygène sont nécessaires. Ce qui donne 1 665 g de CO_2 par litre de LPG.

2.3.4.4 Conclusions

Ce paragraphe a présenté un état-de-l'art des modèles d'émission pour estimer les taux de polluant comme HC , CO , NO_x , PM , et CO_2 et les polluants toxiques comme le benzène et le formaldéhyde dans le trafic. Ces modèles sont classés en deux catégories. On trouve des modèles statiques et des modèles dynamiques. Les premiers prennent en compte la vitesse et l'accélération moyenne du véhicule alors que les deuxièmes s'intéressent à ces paramètres d'une manière instantanée.

Aux États-Unis, les modèles statiques MOBILE et EMFAC sont les plus utilisés pour estimer le taux de ces polluants dans l'air. À notre connaissance, l'expression explicite de ces deux modèles n'est pas disponible dans la littérature. Le modèle de d'EMIT présenté par [Cappiello et al., 2002] est retenu pour l'évaluation de l'impact des véhicules automatisés sur les taux d'émission des polluants dans le trafic mixte en raison de la disponibilité de ses paramètres.

2.3.5 Conclusions

Cette sous-section a présenté, en premier lieu, les facteurs et les paramètres influents sur la consommation et l'émission des polluants. Ces facteurs sont classés en directe et indirecte. Les facteurs directs sont liés au véhicule à savoir ses caractéristiques, ses équipements, son entretien et la composition du carburant. Les facteurs indirects sont le style de conduite, les conditions de circulation, les caractéristiques du conducteur, les caractéristiques du trafic, les facteurs météorologiques et les forces aérodynamiques et de résistance au roulement.

En deuxième lieu, un état-de-l'art des modèles de consommation a été présenté. Ces modèles sont classés en trois catégories à savoir les modèles empiriques, mécaniques et mixtes. Le modèle de [Luu, 2009] a été retenu pour l'utilisation dans le chapitre 3 afin d'évaluer l'impact des véhicules automatisés sur la consommation en carburant du véhicule.

Finalement, un état-de-l'art des modèles d'émission a été présenté. Ces modèles sont classés en deux catégories à savoir les modèles statiques et dynamiques. Les modèles dynamiques donnent instantanément le taux d'émission d'un polluant, alors que les modèles statiques se basent sur les valeurs moyennes des paramètres influents sur les taux d'émission de polluant à savoir la vitesse du véhicule et son accélération. Le modèle d'EMIT, présenté par [Cappiello et al., 2002], a été retenu dans cette partie.

2.4 Conclusions

Ce chapitre se compose de deux parties. La première a présenté un état-de-l'art des indicateurs de sécurité. Ces derniers sont classés en deux catégories. La première concerne les scénarios où des collisions se produisent et la deuxième concerne des scénarios sans collision. Dans le cas de collisions, leurs nombres et leurs sévérités ont constitué les principaux indicateurs de risques. Alors que dans le cas d'absence de collision, les nouveaux indicateurs présentés, DWell Time et le Modified DWell Time, constitueront la base de notre évaluation de la sécurité dans un trafic mixte. Ces deux indicateurs consistent à mesurer le temps pendant lequel le véhicule possède une interdistance critique.

La deuxième partie a présenté les facteurs et les paramètres influant sur la consommation et l'émission des polluants en premier lieu. En deuxième lieu, un état-de-l'art des modèles de consommation et d'émission de polluants a été présenté. Un modèle pour la consommation et un autre pour l'émission de polluants ont été choisis pour évaluer l'impact des véhicules automatisés sur la consommation et l'émission des polluants dans le trafic.

Le chapitre 3 est consacré à l'évaluation de l'impact des véhicules automatisés sur la sécurité, la consommation en carburant et les émissions de polluant en se basant sur les modèles présentés dans les chapitres 1 et 2.

Chapitre 3

Outils de simulation et résultats

Sommaire

3.1	Introduction	119
3.2	Simulateur et scénarios	120
3.2.1	Introduction	120
3.2.2	Structure du simulateur	120
3.2.3	Modèles	122
3.2.4	Géométrie de la route	123
3.2.5	Scénarios développés	124
3.2.6	Gestion des collisions	125
3.2.7	Résultats et niveau de confiance	125
3.2.8	Conclusions	126
3.3	Résultats relatifs au scénario freeze	127
3.3.1	Introduction	127
3.3.2	Conditions de simulation et principes d'évaluation	127
3.3.3	Gestion des collisions : modèle sans agglomérat	128
3.3.4	Gestion des collisions : modèle avec agglomérat	130
3.3.5	Conclusions	133
3.4	Résultats relatifs au scénario sans collision	133
3.4.1	Introduction	133
3.4.2	Conditions de simulation et principes d'évaluation	134
3.4.3	Résultats relatifs à l'indicateur DWell Time (DWT)	135
3.4.4	Résultats relatifs à l'indicateur Modified Dwell Time (MDWT)	136
3.4.5	Résultats relatifs à la consommation et aux émissions de polluants	138
3.4.6	Conclusions	141
3.5	Résultats relatifs au scénario profil de vitesse	142
3.5.1	Introduction	142
3.5.2	Conditions de simulations	142
3.5.3	Résultats relatifs aux nombre de collisions et à la sévérité	142
3.5.4	Résultats relatifs à la consommation en carburant et aux émissions de polluants	143
3.5.5	Conclusions	145
3.6	Résultats relatifs au goulot d'étranglement	146
3.6.1	Introduction	146
3.6.2	Conditions de simulation et principes d'évaluation	146

3.6.3	Résultats relatifs au nombre de collisions et à la sévérité	146
3.6.4	Résultats relatifs à la consommation et aux émissions de polluants	148
3.6.5	Conclusions	150
3.7	Modified Intelligent Driver Model	150
3.7.1	Introduction	150
3.7.2	Adaptation aux capacités réelles du véhicule	151
3.7.3	Nouvelle formulation de l'IDM	151
3.7.4	Détermination du paramètre Fv	153
3.7.5	Conclusions	154
3.8	Conclusions	154

3.1 Introduction

Le développement des simulateurs de trafic a reçu une grande attention durant les dernières années dans le monde de l'industrie de l'automobile comme dans le monde académique. Plusieurs sociétés se sont investies dans ce genre de projet et elles ont mis à disposition des simulateurs intégrant divers modèles dynamiques et cinématiques de véhicules, du conducteur et des architectures routières. Ces simulateurs sont connus par leurs complexités de développement au niveau logiciel. Par exemple, le simulateur ARCHISIM adopte l'approche multi-agent et des techniques issues de l'intelligence artificielle pour simuler des phénomènes complexes. D'après [Liebermann and Rathi, 1997], les outils de simulation restent le plus souvent fondés sur des modèles mathématiques utilisant des lois de poursuite et des équations de flux.

Dans cette thèse, des modèles de poursuite du véhicule automatisé et un modèle régis par l'action du conducteur ont été présentés dans le premier chapitre. À travers le deuxième chapitre, des indicateurs de sécurité ont été synthétisés pour l'étude de la sécurité dans un trafic mixte. Dans ce même chapitre, des modèles de consommation en carburant du véhicule et d'émissions de polluants, à savoir le CO_2 , le CO et le HC , ont été présentés. Le troisième chapitre de cette thèse permet de regrouper ces modèles dans un environnement logiciel avec une représentation graphique des phénomènes mis en jeu. Nos motivations pour le développement d'un simulateur de trafic mixte se justifie suivant les deux aspects suivants :

- le coût élevé des simulateurs de trafic dans le marché,
- le problème de gestion de collisions. Par exemple les simulateurs de trafic CarMaker et Microsimulation of Road Traffic Flow (MRTF) ne permettent pas de gérer les collisions. En effet, dans le simulateur MRTF, on peut observer des véhicules qui se superposent sans gérer cette situation de collision. Ce type de simulateur favorise alors l'étude macroscopique plutôt que d'autres études comme l'étude microscopique. Puisque l'objectif de la simulation est l'évaluation de la sécurité, ces simulateurs ne sont pas adaptés à nos objectifs.

La deuxième section de ce chapitre décrit la structure du simulateur de trafic mixte et présente les géométries des routes prises en compte, les scénarios développés et leurs particularités. La troisième section, quant à elle, s'intéresse à l'évaluation de la sécurité dans le cas du scénario « freeze ». Les indicateurs de sécurité pris en considération sont le nombre de collisions et leurs sévérités. Dans la quatrième section, une étude de la sécurité, à travers les indicateurs S_{DWT} et S_{MDWT} , est réalisée. La consommation moyenne en carburant et l'émission moyenne de polluants, par véhicule sont également étudiées. Les sections cinq et six présentent respectivement les résultats relatifs au scénario « profil de vitesse » et celui du « goulot d'étranglement ». La septième section formule le modèle IDM modifié et la huitième conclut ce chapitre.

3.2 Simulateur et scénarios

3.2.1 Introduction

Le simulateur de trafic mixte, développé par le laboratoire MIPS, est écrit en langage C. Le choix de ce langage a reposé sur le critère du temps d'exécution. En effet, avec le langage C, le temps d'exécution des scénarios développés est assez faible par rapport au cas avec Matlab. À l'aide de la bibliothèque OpenGL²³ (Open Graphics Library), une interface graphique a été générée.

Cette section présente, en premier lieu, la structure du simulateur de trafic mixte. En deuxième lieu, un rappel des modèles utilisés est présenté. En troisième lieu, les architectures de la route et les scénarios développés avec leur interface graphique, sont donnés. Dans le cas d'une éventuelle collision, la gestion des collisions est détaillée. Enfin, la démarche de synthèse des résultats de la simulation est présentée.

3.2.2 Structure du simulateur

La figure 3.1 page 121 présente la structure générale du simulateur de trafic mixte. Ce simulateur possède des entrées qui sont utilisées par ses différents modules de son corps afin d'enregistrer les sorties de la simulation sous format vidéo et/ou de données nécessaires au post-traitement.

3.2.2.1 Entrées

Les entrées du simulateur sont au nombre de trois :

- « Fichier XML » dans lequel quelques paramètres peuvent être fixés : le nombre de simulation à faire, le nombre de véhicules initial, la longueur de la route, le pourcentage minimum et maximum des véhicules automatisés et le pas de variation de ce pourcentage. D'autres options peuvent être choisies en l'occurrence la gestion des collisions (ON ou OFF selon le choix de l'opérateur) et le changement de voie dans le cas de deux ou plusieurs voies.

La figure 3.1 de l'annexe 5 page 174 présente un exemple de ce fichier.

- « Paramètres globaux » : ces paramètres sont fixes durant toute la simulation (e.g largeur de la route).
- « Librairie OpenGL » : cette librairie est responsable de la gestion de l'interface graphique des scénarios et l'architecture, utilisés dans la simulation.

3.2.2.2 Corps

Le corps principal du simulateur gère toutes les simulations à travers les entrées globales, celles fixées dans le fichier XML et la librairie OpenGL pour l'interface graphique. Dans ce corps se trouve principalement les modules suivants :

- « Module de développement des scénarios » : Ce module comporte les différents scénarios développés. Ils prennent leurs paramètres d'entrée à travers la fonction « main ». Cette dernière sélectionne le scénario à exécuter à partir du choix fait dans le fichier XML. Dans les scénarios, on trouve les modèles utiles en l'occurrence les modèles IDM et TVDM pour le comportement longitudinal des véhicules et la loi MOBIL pour la gestion du

23. OpenGL est une librairie graphique très évoluée, gratuite et totalement portable offrant de nombreuses ressources aux programmeurs

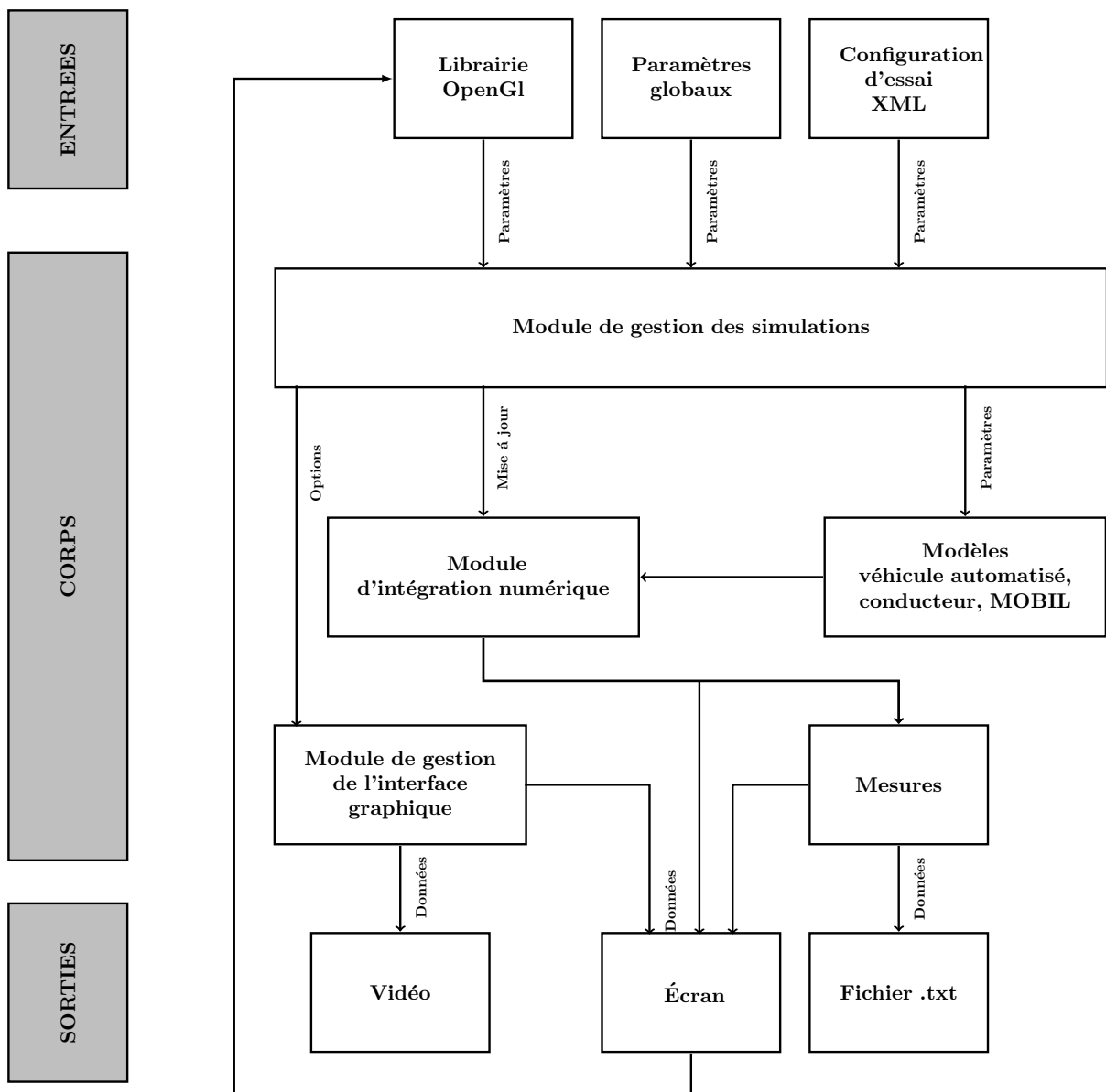


FIGURE 3.1 – Structure du simulateur

changement de voie. Ces modèles ont besoin d'une mise à jour à chaque pas de simulation. Cette étape se fait à travers le module d'intégration numérique dont ses détails seront expliqués plus tard dans le paragraphe 3.2.3.1.

- « Module de gestion de l'interface graphique » : ce module s'appuie sur la bibliothèque OpenGL et les mesures enregistrées afin de générer et mettre à jour l'interface graphique affichée sur l'écran de l'ordinateur.

3.2.2.3 Sorties

Les sorties de ce simulateur sont au nombre de trois :

- « Écran » : permet d'afficher l'architecture et le déroulement du scénario.

- « Vidéo » : consiste à enregistrer l'interface graphique à chaque pas de simulation et l'afficher en même temps que la simulation.
- « Fichier .txt ou .bin » : permet d'enregistrer les données nécessaires au post-traitement sous forme d'un tableau.

3.2.3 Modèles

Pour la modélisation du trafic mixte, deux types de modèles ont été implémentés : des modèles caractérisant la dynamique longitudinale et un modèle latéral pour la gestion du changement de voie.

3.2.3.1 Modèles longitudinaux

Les modèles longitudinaux de ce simulateur dépendent du style de conduite. Le modèle TVDM est choisi pour représenter la conduite manuelle alors que le modèle IDM est destiné à représenter la conduite automatisée. Ces modèles longitudinaux sont des modèles instantanés en terme de temps et sont définis uniquement par l'accélération du véhicule, soit :

$$\frac{dv_n}{dt} = f(s_n, v_n, \Delta v_n). \quad (3.1)$$

Cette accélération dépend de l'interdistance et de la vitesse relative de chaque véhicule par rapport à son véhicule prédécesseur. Ces expressions sont regroupées dans le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{dv_n}{dt} = f(s_n, v_n, \Delta v_n) \\ \frac{dx_n}{dt} = v_n \\ s_n(t) = x_{n+1}(t) - x_n(t) - l_n \end{cases} \quad (3.2)$$

Le système (3.2) représente un système d'équations différentielles ordinaires pour la position x_n et la vitesse v_n . Comme les fonctions f (accélérations du véhicule à travers le modèle IDM ou TVDM) sont non linéaires, on est ramené à résoudre le système (3.2) avec les méthodes d'intégration numérique comme celles d'Euler ou de Runge-Kutta pour mettre à jour la position et la vitesse de chaque véhicule dans le trafic à chaque pas de simulation.

En supposant que l'accélération soit constante pendant la durée de temps Δt , cela mène à des règles explicites de mise à jour numérique données par

$$\begin{cases} v_n(t + \Delta t) = v_n(t) + \dot{v}_n(t)\Delta t, \\ x_n(t + \Delta t) = x_n(t) + v_n(t)\Delta t + \frac{1}{2}\dot{v}_n(t)(\Delta t)^2. \end{cases} \quad (3.3)$$

3.2.3.2 Modélisation du changement de voie

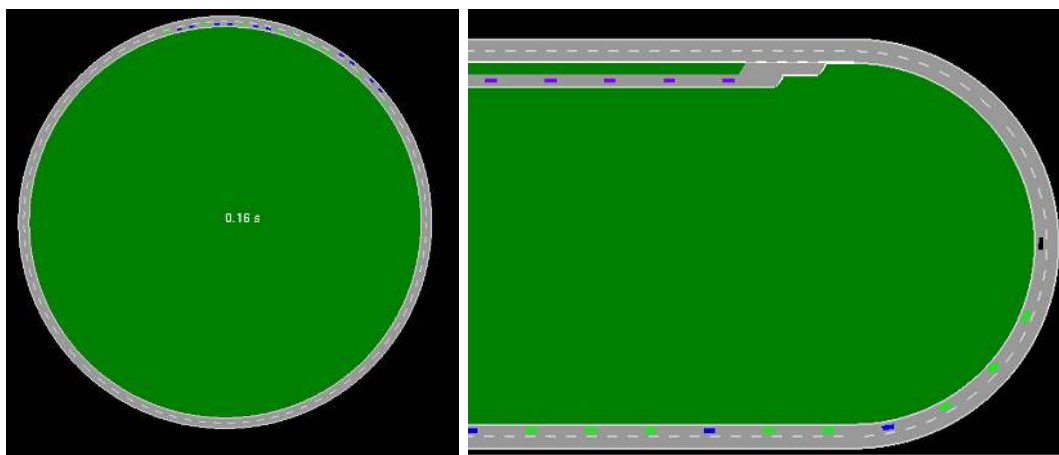
Le modèle de changement de voie développé dans le simulateur est la loi « MOBIL ». Pour mémoire, cette loi consiste à tester deux conditions dont la première est celle de la sécurité donnée par l'équation (1.22) page 43. En effet, après le changement de voie, la décélération du prochain suiveur doit être confortable. C'est-à-dire qu'elle ne doit pas dépasser un seuil fixé. La deuxième condition, donnée par l'équation (1.23) page 43, est celle de motivation dans laquelle la différence entre la somme des accélérations du véhicule, de son suiveur et de son prochain suiveur et leurs accélérations après le changement, ne doit pas dépasser un seuil critique fixé.

3.2.4 Géométrie de la route

Différentes géométries de la route peuvent être développées dans le simulateur. Dans le cadre de cette thèse, l'infrastructure Ring a été développée. Selon le choix de l'opérateur, une voie d'insertion peut être ajoutée.

3.2.4.1 Infrastructure Ring sans voie d'insertion

La figure 3.2(a) montre une infrastructure de route de type Ring (anneau). Les variables mises en jeu pour cette infrastructure sont le nombre de voies et leurs rayons. Avec cette infrastructure, le circuit est fermé et le nombre de véhicules sur la route est conservé durant toute la simulation. L'augmentation du nombre de véhicules initial permet d'augmenter la densité du trafic.



(a) Infrastructure Ring sans voie d'insertion

(b) Infrastructure Ring avec voie d'insertion

FIGURE 3.2 – Architectures de route développées

3.2.4.2 Infrastructure Ring avec voie d'insertion

Dans cette infrastructure, représentée par la figure 3.2(b), deux circuits sont présentés :

- le premier circuit est celui du Ring et composé d'une ou de plusieurs voies selon le choix de l'opérateur.
- le deuxième circuit représente une voie d'insertion de véhicules dans le premier circuit. On trouve une voie d'accélération à la fin de ce circuit. Cette voie permet aux véhicules d'ajuster leurs vitesses avant d'entrer dans le circuit fermé. Ces véhicules sont en mode préétabli et ne tiennent pas compte de leurs environnements. Néanmoins, ces véhicules évoluent dans le même sens que les autres véhicules. Dans la figure 3.2(b), ces véhicules sont à l'arrêt et commencent à rouler à partir d'un temps fixé au préalable. Dans le cas où il serait impossible d'entrer dans le circuit fermé, le véhicule s'arrête sur la voie d'accélération. À chaque pas de simulation, ce véhicule teste son entrée dans le circuit fermé selon la loi de changement de voie « MOBIL ».

Au contraire du cas de l'infrastructure Ring sans voie d'insertion, la densité est variable pendant la durée de simulation. L'ajout des véhicules à travers la voie d'insertion permet d'augmenter la densité du trafic au cours de la simulation.

3.2.5 Scénarios développés

Ce paragraphe décrit les scénarios développés en détail et les compare avec ceux présentés dans la littérature.

1. « Freeze »

Le but du développement du scénario « freeze » est l'analyse de la sécurité dans des situations très critiques en ayant une perturbation intérieure à la file.

Le scénario « freeze » consiste à faire évoluer le trafic jusqu'à l'état d'équilibre (c'est-à-dire en régime établi : accélérations nulles des véhicules). À un instant donné, le véhicule en tête de la file passe en mode « freeze ». Il s'arrête alors instantanément (distance de freinage nulle).

Le scénario « freeze » est similaire aux scénarios « mur de brique » et « freinage d'urgence » qui sont issus de la littérature. Le scénario « mur de brique » consiste à placer un mur au milieu de la route. Les différences entre le scénario « mur de brique » et le scénario « freeze » sont de l'ordre de deux :

- Dans le cas du « mur de brique », la perturbation est extérieure au système composé par les véhicules de la file. Alors que dans le scénario « freeze » la perturbation de la file est intérieure au système.
- Le mur est supposé posséder une masse infinie (c'est-à-dire très grande devant celle d'un véhicule). Par conséquent, la sévérité d'une éventuelle collision s'en trouvera modifiée.

Le scénario « freeze » constitue une approche intermédiaire entre celles basées sur le scénario « mur de brique » et celles fondées sur le scénario « freinage d'urgence ». En effet, si la perturbation à travers le scénario « freinage d'urgence » est également intérieure au système, la différence se trouve dans la sévérité de la première collision. Cette différence est due à la différence des décélérations lors du déclenchement du scénario.

Nous estimons que l'évaluation de la sécurité avec une file de véhicules dans une seule voie est suffisante pour ce genre de scénario pour les deux raisons suivantes :

- puisque le trafic est composé de plusieurs files de véhicules réparties sur une ou plusieurs voies, l'étude de la sécurité d'une file dans une seule voie est considérée comme unitaire par rapport à un trafic à plusieurs files et voies. De plus, si le véhicule est en situation dangereuse, la file dans laquelle le véhicule se trouve et, par suite, le trafic est aussi en situation dangereuse.
- dans le cas d'un trafic à deux voies où la gestion des collisions se fait à travers la deuxième approche (formation d'un agglomérat), la collision dans l'une des deux voies forme un goulot d'étranglement. Puisque ce scénario sera traité seul, la sécurité à travers le scénario « freeze » sera évaluée dans un trafic à une seule voie.

2. « Profil de vitesse »

Dans le mode manuel, le véhicule considéré suit un profil de vitesse préétabli. Cherchant à voir la réponse du système composé par les véhicules, la plupart des études ont été menées avec des profils de vitesses sinusoïdaux à différentes fréquences. Selon le type de conduite, la poursuite de ce véhicule peut être différente.

Un tel comportement du véhicule en tête de la file peut engendrer des collisions dans la file. Par conséquent, la sécurité, en termes de nombre de collisions et de sévérité, sera analysée dans le cas de ce scénario. Cette analyse sera faite dans un trafic à une seule voie pour les mêmes raisons citées dans le cas du scénario « freeze ».

3. « Goulot d'étranglement »

Dans ce scénario, le circuit est composé principalement de deux voies. Sur une section de longueur préétablie, la chaussée est réduite à une seule voie. Dans ce cas de figure, le nombre de collisions et leurs sévérités réaliseront un indice de sécurité dans le cas d'une éventuelle collision. Notons que la loi de changement de voie possède une grande importance dans ce genre de scénario et d'architecture.

3.2.6 Gestion des collisions

La gestion des collisions en simulation est une tâche difficile à l'égard de sa caractéristique aléatoire dans la réalité. Le protocole de test des collisions est le suivant : à chaque pas de simulation, la fonction « CollisionManagement » teste les interdistances entre les véhicules dans chacune des voies dans le trafic. Si l'interdistance pour un véhicule donné est inférieure à la longueur de son véhicule prédécesseur, la collision est détectée.

Dans ce mémoire, deux approches de gestion des collisions sont proposées :

- avec la première approche, le véhicule entrant en collision avec son prédécesseur sera éjecté de la voie. Nous avons permis à ce dernier de continuer à rouler, d'une part afin de voir sa réaction envers le véhicule en mode freeze dans le cas où il ne l'est pas et d'autre part pour avoir un trafic fluide durant toute la période de simulation.
- la deuxième approche consiste en la formation d'un agglomérat, composé par les deux véhicules accidentés, qui décélère jusqu'à l'arrêt. Ce dernier aura pour masse la somme des masses des deux véhicules et pour longueur, la somme de leurs longueurs. En appliquant le principe de conservation de la quantité du mouvement au moment du choc entre ces deux véhicules de masse m_n et m_{n+1} , la vitesse v_a du système formé par ces deux véhicules accidentés, n et $n + 1$, juste après la collision est donnée par l'équation (2.9) page 83.

3.2.7 Résultats et niveau de confiance

L'objectif de la modélisation du trafic, du changement de voie et de la collision est d'avoir un comportement proche de la réalité et des résultats avec un niveau de confiance élevé. Cela permet de prédire la situation du trafic dans le cas d'un scénario critique. Par conséquent, le conducteur ou le véhicule automatisé peuvent prendre les mesures nécessaires afin d'avoir un minimum de dégât.

Pour évaluer la sécurité dans un trafic, deux types de scénarios ont été définis et développés :

- Le premier type de scénario intègre une perturbation dans le trafic. Cette dernière peut être extérieure à la file, comme la présence d'un mur sur la voie (simulant la présence d'un obstacle fixe), ou bien intérieure comme le cas d'un véhicule qui effectue un freinage d'urgence. Dans ce cas de figure, une collision peut éventuellement se produire. L'évaluation de la sécurité tient compte du taux des véhicules automatisés ainsi que ceux régis par l'action du conducteur et les caractéristiques du véhicule telles que la masse et la vitesse (état).
- Dans le deuxième type de scénario, où il n'y a pas de perturbations, la sécurité est évaluée seulement par rapport au taux de véhicules automatisés dans le trafic. Dans ce cas, les critères d'évaluation de la sécurité sont différents de ceux des scénarios du premier type. À titre d'exemple, cette évaluation tient compte du temps de simulation et d'autres variables liées au type du véhicule en l'occurrence les accélérations et les décélérations

maximales.

Considérons une file de véhicules. Le choix des véhicules automatisés, représentés par le modèle IDM, est réalisé d'une façon aléatoire. Les autres véhicules sont représentés par le modèle TVDM. Ce caractère aléatoire de sélection des modes des véhicules nous incite à utiliser des approches statistiques pour analyser les paramètres de sortie qui sont les suivants :

- le nombre de collisions et l'ees dans le cas d'un scénario avec collisions,
- le DWT ou MDWT dans le cas d'un scénario sans collision,
- la consommation moyenne en carburant et les émissions de polluants.

Ces paramètres de sortie ont une moyenne et un écart-type avec un niveau de confiance qui sera déterminé à partir du nombre de simulations à effectuer. La simulation de Monte Carlo peut être utilisée pour estimer la moyenne, la variance et l'écart-type de la réponse d'un système. En se référant à la loi de Student, le nombre de simulations minimum N_{\min} est donné par [Schutz, 1984] et [Sudret, 2007] comme suit :

$$N_{\min} = 1 + E \left[\left(\frac{100}{\epsilon_{ms}} \frac{\hat{\sigma}}{\hat{m}} u_{\alpha} \right)^2 \right], \quad (3.4)$$

avec

- $\hat{\sigma}$, la variance estimée du paramètre aléatoire,
- \hat{m} , la moyenne estimée du paramètre aléatoire,
- u_{α} , un coefficient à déterminer en fonction du niveau de confiance $(1 - \alpha)$ à partir du tableau dans la référence [Schutz, 1984],
- ϵ_{ms} , la précision relative de la moyenne du paramètre de sortie en [%],
- E, la partie entière.

Pour plus de détails sur l'équation (3.4), le lecteur peut se référer à [Sudret, 2007].

3.2.8 Conclusions

Cette section a présenté la structure du simulateur de trafic, les modèles utilisés et les scénarios et les architectures développés. L'analyse du trafic mixte à travers les scénarios développés sera portée sur la sécurité, la consommation moyenne en carburant et les émissions des polluants.

D'autres scénarios peuvent également être étudiés à savoir :

- « Commutation entre les modes » : dans ce scénario, les véhicules dans le trafic peuvent commuter à tout instant d'un mode à l'autre (de l'automatisé vers le manuel et vice versa). En fonction du taux de véhicules automatisés et du taux de véhicules qui commutent, la sécurité dans le trafic sera évaluée.
- « Véhicule en sens inverse ». Dans ce scénario, les véhicules sont placés en file sur la route. À l'instant $t=0$ s, les véhicules commencent à rouler. Le dernier véhicule roule en sens inverse. Puisque le circuit est fermé, les autres véhicules vont être nécessairement amenés à le croiser. Ceci constitue une perturbation qui évolue dans le temps. Toutefois, la collision de ce scénario est similaire à celui du « freeze » et les seules différences se situent dans la sévérité de la première collision et la vitesse de l'agglomérat.

La sécurité, la consommation en carburant et les émissions de polluants pourront être analysés à travers ces scénarios.

3.3 Résultats relatifs au scénario freeze

3.3.1 Introduction

L'objectif de cette section est l'évaluation de la sécurité dans un trafic mixte, comme défini dans le chapitre 1, avec le scénario « freeze » à travers les deux indicateurs S_{Coll} et S_{ees} présentés dans le chapitre 2.

Le deuxième paragraphe de cette section présente les conditions de simulation et les principes d'évaluation adoptés. Les troisième et quatrième paragraphes présentent respectivement les résultats avec leurs discussions pour la gestion de collisions avec et sans agglomérat. Le dernier paragraphe conclut les résultats présentés dans cette section.

3.3.2 Conditions de simulation et principes d'évaluation

Considérons une file de véhicules placés sur une voie en anneau (architecture Ring sans voie d'insertion). Cette file comporte des véhicules automatisés dont le choix de leurs placements est aléatoire. Les autres véhicules sont à conduite manuelle et représentés par le modèle TVDM.

Le tableau 3.1 présente les paramètres de simulation dans le cas du scénario « freeze » pour les deux modèles de gestion des collisions (avec et sans agglomérat). Le tableau 3.2 présente les valeurs des paramètres du modèle IDM.

La valeur du temps de sécurité en amont (T_n) minimum recommandée par [Kesting, 2008] est de 1,2 s. Nous avons choisi la valeur de 1,5 s pour que la densité microscopique des véhicules du trafic ne soit pas biaisée. En effet, le retard δt introduit par le modèle TVDM est égale à 1,5 s. Si la valeur de T_n est inférieure à δt , les véhicules automatisés auront une interdistance plus petite que ceux régis par l'action du conducteur dans le cas d'un trafic libre. Ainsi, à vitesse égale, le véhicule à conduite automatisée aura moins d'interdistance par rapport à son prédécesseur que le véhicule à conduite manuelle. Par conséquent, la densité microscopique du véhicule automatisé est inférieure à celle d'un véhicule régi par l'action du conducteur. Dans ce cas, le trafic n'est pas qualifié d'iso-densité.

L'interdistance initiale pour le véhicule régi par l'action du conducteur et son prédécesseur est égale à 7,32 m. Cette distance permet d'avoir à la fois une accélération et une vitesse optimale ($V_n(\Delta x)$) nulles.

À $t = 0$ s, les véhicules placés sur l'anneau, représenté par la figure 3.2(a), démarrent. Les positions, les vitesses et les accélérations sont enregistrées durant toute la période de simulation dans un fichier et seront ensuite analysées avec le logiciel Matlab. Le nombre de simulations est déterminé à travers l'équation (3.4).

Dans chaque simulation, le nombre de collisions et $l'ees$ sont enregistrés. À la fin de toutes les simulations et pour chaque pourcentage de véhicules automatisés fixé, la moyenne et l'écart-type du nombre de collisions et de $l'ees$ moyenne, sont calculés. Les valeurs moyennes de $l'ees$ sont normalisées par rapport à la plus grande valeur obtenue.

Dans le chapitre 2, deux méthodes de gestion de collisions ont été proposées. La première consiste à éjecter le véhicule accidenté de la file et la deuxième considère que les deux véhicules accidentés forment un agglomérat qui décélère jusqu'à l'arrêt. Par conséquent, nous allons présenter les résultats relatifs à chaque méthode pour le scénario freeze dans les deux prochaines sous sections.

TABLE 3.1 – Paramètres de simulations pour le scénario freeze

Paramètres	Valeurs	Unités
Nombre de véhicules	100	véhicule
Temps de simulation	1000	s
Temps de déclenchement du scénario	500	s
Vitesses désirées	15,00	m.s ⁻¹
Vitesses initiales	0,00	m.s ⁻¹
Masse du véhicule	1380	kg
Longueur du véhicule	5,00	m
Pourcentage de véhicules automatisés minimum	0,00	%
Pourcentage de véhicules automatisés maximum	100	%
Pas de variation du pourcentage de véhicules automatisés	20	%

TABLE 3.2 – Paramètres de simulation du modèle IDM

Paramètres	Valeurs	Unités
Accélération maximale a_n	4,00	m.s ⁻²
Décélération désirée b_n	4,00	m.s ⁻²
Temps de sécurité en amont T_n	1,50	s
Interdistance à l'arrêt s_n^0	7,32	m

3.3.3 Gestion des collisions : modèle sans agglomérat

Ce paragraphe présente les résultats relatifs au scénario « freeze » avec la première approche de gestion des collisions.

3.3.3.1 Résultats relatifs au nombre de collisions

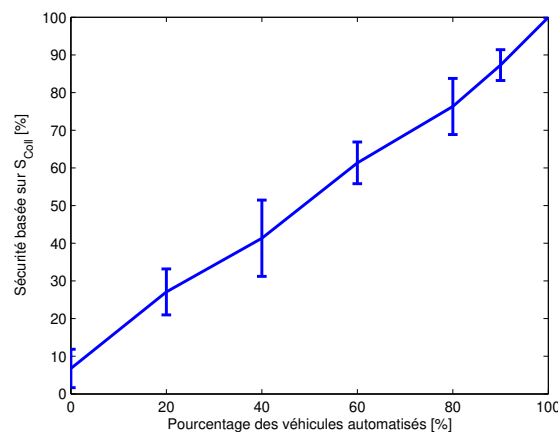


FIGURE 3.3 – Résultat basé sur l'indice relatif au nombre de collisions : S_{Coll}

La figure 3.3 présente le pourcentage de sécurité basé sur le nombre de collisions en fonction

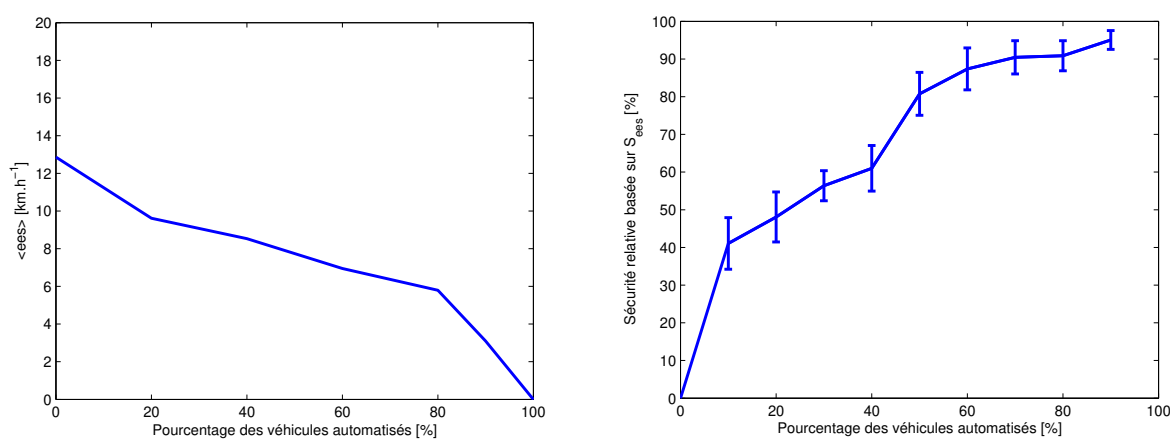
du pourcentage des véhicules automatisés dans une file. Cette relation est représentée par une courbe affine. Comme le montre cette figure, lorsque le pourcentage des véhicules automatisés augmente, la file devient de plus en plus sécurisée. Cette affinité peut être expliquée par la conjonction de deux raisons :

- les paramètres relatifs au modèle IDM : la décélération désirée du modèle IDM est fixée à 4 m.s^{-2} comme mentionnée par [Kesting, 2008]. Par suite, le véhicule automatisé à travers le modèle IDM va générer une décélération égale à cette valeur dans le cas de la présence d'un obstacle dont le véhicule en mode freeze est un exemple. Par contre, la décélération maximale et désirée pour un véhicule régi par l'action du conducteur est de 3 m.s^{-2} . Cette valeur est aussi la capacité maximale réelle de décélération d'un véhicule dans le cas des deux styles de conduite comme mentionné dans le chapitre 1 page 31. Cela peut engendrer un inconfort pour les passagers du véhicule automatisé en contre partie de la sécurité.
- l'approche adoptée pour la gestion des collisions consiste ici à éjecter le véhicule qui entre en collision avec son prédécesseur. À la fin de la simulation, nous avons remarqué que le pourcentage des véhicules automatisés est supérieur à celui des véhicules régis par l'action du conducteur. Par suite, les véhicules à conduite manuelle sont entrés en collision et sont déjà éjectés de la voie. Ceci justifie aussi la première explication dans le premier point et explique cette affinité dans la courbe présentée dans la figure 3.3.

Le prochain paragraphe analyse la sévérité des collisions engendrées dans la file à travers la première approche de gestion des collisions.

3.3.3.2 Résultats relatifs à la sévérité des collisions

La figure 3.4(a) présente les valeurs moyennes des $\langle ees \rangle$ obtenues après la simulation du trafic pour chaque pourcentage de véhicules automatisés fixé. D'après cette figure, deux



(a) Courbe des valeurs moyennes des ees (collision sans agglomérat) (b) Indice de sécurité basé sur la sévérité des collisions : S_{ees}

FIGURE 3.4 – Résultats relatifs à la sévérité des collisions pour le scénario freeze (sans agglomérat)

conclusions peuvent être faites :

- la valeur maximale de $\langle ees \rangle$ obtenue est de $12,8 \text{ km.h}^{-1}$. Cette valeur correspond à un trafic où tous les véhicules sont régis par l'action du conducteur. La figure 2.1 dans le chapitre 2 représente le pourcentage de personnes tuées ou gravement blessées en fonction de $\langle ees \rangle$. Cette figure montre que la valeur minimale de $\langle ees \rangle$ pour laquelle les passagers sont blessés ou morts est de 23 km.h^{-1} . Par conséquent, à basse vitesse et dans le cas du scénario freeze avec cette approche de gestion de collisions, il n'y aura pas de dégâts humains.
- lorsque tous les véhicules dans la file sont automatisés, la sévérité n'est pas prise en compte pour évaluer la sécurité du trafic. En effet, d'après la figure 3.3, il n'y pas de collision dans la file avec ce pourcentage de véhicules automatisés. Cela peut s'expliquer, d'une part par la capacité du modèle IDM à générer une décélération convenable pour éviter les accidents et, d'autre part, par l'état du trafic (libre). Toutefois, comme mentionné ci-dessus, cette décélération peut gêner le confort des passagers.

La figure 3.4(b) présente l'indice de sécurité basé sur $\langle ees \rangle$ en fonction du pourcentage des véhicules automatisés. Cette figure montre que la sécurité dans la file augmente quand le nombre de véhicules automatisés augmente. Ce résultat peut être expliqué par les mêmes raisons présentées dans le premier paragraphe (résultats relatifs au nombre de collisions).

Par ailleurs, nous remarquons deux régions particulières selon la pente de la courbe dans la figure 3.4(b) :

- $\%IDM \in [0; 20] \cup [80; 90]$: la variation de la sécurité est importante. Dans ces deux intervalles, une augmentation de 20% de véhicules automatisés favorise une sécurité de 25% et diminue la gravité de la collision de 25%. Dans ces deux intervalles, le trafic est qualifié par une forte homogénéité. En effet, dans le premier interval, la conduite manuelle domine le trafic et c'est les véhicules régis par l'action du conducteur qui imposent leur style de conduite. Alors que dans le deuxième intervalle, la conduite automatisée est dominante et ce sont les véhicules automatisés qui imposent leur style de conduite.
- $\%IDM \in [20; 80]$: lorsque le pourcentage des véhicules automatisés est compris entre 20% et 80%, la sécurité dans le trafic varie avec une faible pente. Une augmentation de 20% de véhicules automatisés augmente la sécurité dans le trafic de 10% et ne diminue la gravité de la collision que de 10%.

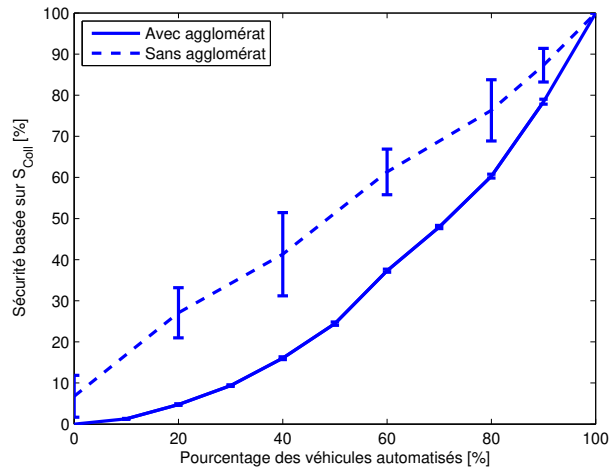
3.3.4 Gestion des collisions : modèle avec agglomérat

Ce paragraphe présente les résultats relatifs au scénario freeze avec la deuxième approche de gestion des collisions.

3.3.4.1 Résultats relatifs au nombre de collisions

La courbe en trait continu de la figure 3.5 représente l'indice de sécurité basé sur le nombre de collisions en fonction du pourcentage de véhicules automatisés dans le trafic, pour une gestion des collisions avec agglomérat. D'après cette courbe, la sécurité dans le trafic augmente lorsque le pourcentage des véhicules automatisés dans le trafic augmente. Cela signifie que le nombre de collisions diminue en présence de véhicules automatisés. Ce résultat peut être expliqué par les mêmes raisons citées dans le cas précédent (sans agglomérat).

En comparant les courbes de la figure 3.5, nous remarquons que la sécurité dans un trafic où la gestion des collisions est réalisée avec la première approche (sans agglomérat), est plus élevée que dans le cas où la gestion des collisions est réalisée avec deuxième approche (avec agglomérat).

FIGURE 3.5 – Indice de sécurité basé sur le nombre de collisions : S_{Coll}

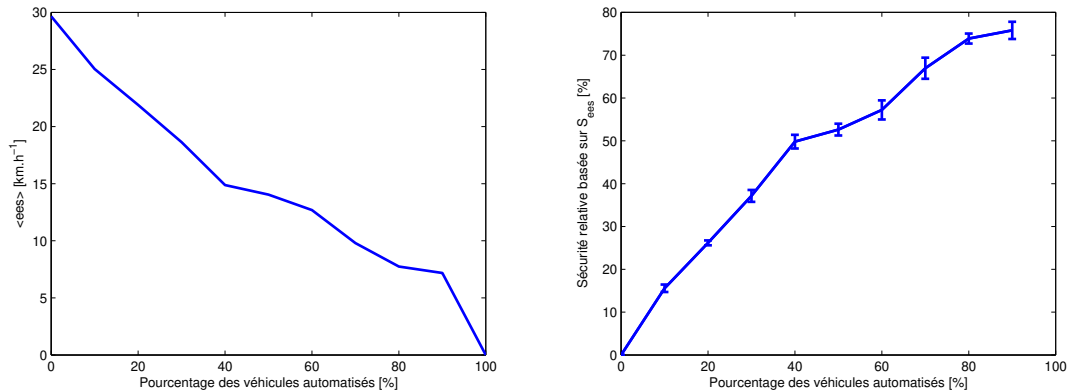
Ce résultat peut être expliqué par l'apparition de trois phénomènes qui sont :

- Un seul agglomérat dans la file. Il est formé par le véhicule en mode freeze, qui est le véhicule de tête de la file, et ses premiers véhicules suiveurs dans la file avec lesquels ils sont entrés en collision. Cet agglomérat évolue en longueur lorsqu'il y a plus de collisions. De ce fait, plus cet agglomérat est long, plus les véhicules, qui se trouvent à la fin de la file, doivent être capable de freiner le plutôt possible. En effet, d'une part, le sens de formation de l'agglomérat est à l'opposé de celui de déplacement des véhicules dans la file et, d'autre part, les derniers véhicules dans la file n'ont pas l'information sur les collisions entre les premiers véhicules pour effectuer un freinage anticipé. On peut alors imaginer aisément que si les véhicules communiquaient entre eux, l'information sur la formation du premier agglomérat (ou la première collision) serait partagée entre les véhicules et, par conséquent, les véhicules qui se trouvent à la fin de la file pourraient s'arrêter sans collision.
- Puisque la figure 3.5 montre que la présence des véhicules automatisés augmente la sécurité dans la file, dans ce cas de figure, nous pouvons conclure que malgré le critère de l'anticipation spatiale du conducteur des deux véhicules en amont (modèle TVDM), celui-ci n'est pas suffisant pour éviter la collision dans cette situation. Par suite, le conducteur doit anticiper plus de deux véhicules afin de détecter l'agglomérat et freiner plus tôt.
- Plusieurs agglomérats répartis dans la file. C'est-à-dire, qu'en plus de l'agglomérat formé avec le véhicule en mode freeze, il existe d'autres agglomérats conséquence du comportement des agglomérats qui se trouvent en amont. Dans ce cas, tous les véhicules de la file sont entrain d'effectuer un freinage d'urgence. L'existence de ces comportements différents présente d'autres perturbations autre que le « freeze » dans le trafic qui dégradent en plus sa sécurité.
- L'éjection des véhicules lors de la collision permet aux véhicules d'avoir plus de distance pour freiner et éviter la collision. Par contre, ici lorsque les véhicules en collision forment un agglomérat et les distances entre les véhicules diminuent. C'est-à-dire que la densité microscopique des véhicules avec la première approche de gestion des collisions est plus grande que dans le cas de la deuxième approche. Puisque la densité microscopique est en

relation directe avec l'interdistance, nous pouvons conclure que la sécurité dans le cas de la première approche de gestion des collisions est plus importante que celle dans le cas de la deuxième approche.

Le prochain paragraphe analyse la sévérité de ces collisions avec la deuxième approche de gestion des collisions.

3.3.4.2 Résultats relatifs à la sévérité des collisions



(a) Données brutes de l'ees (collision avec agglomérat) (b) Indice de sécurité basé sur la sévérité des collisions : S_{ees}

FIGURE 3.6 – Résultats relatifs à la sévérité pour le scénario freeze

La figure 3.6(a) présente les valeurs moyennes de l'ees obtenues pendant les simulations pour chaque pourcentage de véhicule automatisé fixé. La valeur maximale de l'ees est obtenue pour un trafic où tous les véhicules sont régis par l'action du conducteur. En comparant cette valeur avec la valeur maximale de l'ees relative à la première approche de gestion des collisions, elle est plus élevée. Ce résultat est concordant puisque nous avons des collisions de véhicules avec agglomérat dont la masse est grande par rapport à celle du véhicule proprement dit (au moins deux fois la masse du véhicule). Dans ce contexte, d'après la figure 2.1 page 84, les collisions correspondantes à ce pourcentage de véhicules automatisés vont pronostiquer des dégâts humains (personnes blessées ou tuées).

En conclusion, avec cette approche de gestion de collisions, le scénario « freeze » pronostique des dégâts humains à basse vitesse.

La figure 3.6(b) présente l'indice de sécurité basé sur l'ees en fonction du pourcentage des véhicules automatisés dans la file. La courbe sur cette figure montre que l'augmentation du pourcentage de la présence des véhicules automatisés augmente la sécurité dans le trafic. Le minimum de la sécurité correspond à un trafic où tous les véhicules sont régis par l'action du conducteur. En effet, la valeur maximale de l'ees correspond à un trafic où tous les véhicules sont à conduite manuelle.

Par ailleurs, deux régions peuvent être distinguées dans cette figure :

- $\%IDM \leq 40\%$: lorsque moins de 40% de véhicules dans la file sont automatisés, la sécurité du conducteur varie quasi linéairement et atteint 50%. Dans cette région, les valeurs moyennes des ees sont supérieures ou égales à 23 km.h⁻¹. D'après la figure 2.1 page 84, les collisions dans cette région vont pronostiquer des dégât humains. D'après la figure 3.5,

nous remarquons que la sécurité en termes de nombre de collisions est faible. C'est-à-dire que le nombre de collisions est important. Ainsi, dans cette région, la situation du trafic est qualifiée de critique.

- %IDM > 40% : lorsque plus de 40% de véhicules sont automatisés, la sécurité augmente avec une faible pente et atteint 75%. Ainsi, la sévérité des collisions est faible pour un trafic à 90 % de véhicules automatisés.

Ces résultats peuvent être expliqués par la capacité du modèle IDM à gérer les situations critiques en fixant ses paramètres comme donnés dans le tableau 3.2 page 128.

3.3.5 Conclusions

Dans cette section, une analyse de la sécurité dans un trafic mixte a été élaborée. Cette analyse a été basée sur le scénario « freeze » et a été partagée en deux parties selon l'approche de la gestion des collisions. La première partie concerne l'approche sans agglomérat alors que la deuxième approche consiste à la formation d'un agglomérat au moment de la collision. En se basant sur le nombre de collisions et leurs sévérités, deux conclusions peuvent être retenues :

- La première concerne l'avantage de la présence des véhicules automatisés dans une file. En effet, l'augmentation du pourcentage des véhicules automatisés, représentés par le modèle IDM, améliore la sécurité du trafic. Toutefois, la collision peut engendrer des dégâts humains pour certains pourcentages de véhicules automatisés.
- La deuxième conclusion concerne une limite de l'automatisation du trafic qui se trouve dans le confort des passagers du véhicule automatisé. En effet, l'utilisation du modèle IDM avec les paramètres fixés dans cette partie engendre une variation de décélération qui peut causer un inconfort des passagers même dans des conditions d'un trafic libre et à basse vitesse.

3.4 Résultats relatifs au scénario sans collision

Cette section présente une analyse d'un trafic mixte sans collision sur deux volets : le premier concerne la sécurité à travers les indicateurs de sécurité DWT et MDWT. Le deuxième présente l'impact des véhicules automatisés sur la consommation et les émissions de polluants.

3.4.1 Introduction

La section précédente était dédiée à l'évaluation de la sécurité du trafic mixte dans le cas d'un scénario qui engendre des collisions. Mais, dans une situation normale de conduite (scénario sans collision), le conducteur pourrait être dans une situation critique (un éventuel freinage d'urgence de la part de son prédécesseur) sans qu'il y ait une perturbation dans le trafic (e.g. véhicule en mode freeze) et sans qu'il s'aperçoive de cette situation. L'évaluation de ce type de situation nécessite alors l'utilisation des indicateurs pertinents afin d'informer le conducteur de son état de conduite.

Les objectifs de cette section est l'évaluation de l'impact des véhicules automatisés :

- sur la sécurité dans le trafic en utilisant les indicateurs adéquats,
- sur la consommation en carburant et les émissions de polluants dans le trafic.

La sécurité sera évaluée à travers les indicateurs DWT et MDWT développés dans le chapitre 2. Ces indicateurs sont une amélioration de l'indicateur TET et une adaptation à notre

contexte d'étude qui est le trafic mixte. Cette amélioration concerne la définition de l'état critique d'une conduite manuelle qui dépend, en premier lieu, de la distance de freinage à travers l'indicateur DWT et, en deuxième lieu, de son comportement face à un freinage imprévu de son prédécesseur dans la file par le biais de l'indicateur PICUD (page 90).

Dans un second temps, les conditions de simulation et les principes d'évaluation de la sécurité, de la consommation en carburant et des émissions de polluants, seront présentées. Les résultats relatifs à la sécurité d'un trafic mixte à travers les indicateurs DWT et MDWT seront ensuite détaillés. Enfin, les résultats relatifs à la consommation et les émissions de polluants seront présentés avant de conclure.

3.4.2 Conditions de simulation et principes d'évaluation

Soit une file de véhicules placée sur une route en anneau à une seule voie. Cette file comporte un pourcentage de véhicules automatisés positionnés d'une manière aléatoire. Les autres véhicules sont régis par l'action du conducteur (conduite manuelle).

Les paramètres du modèle IDM sont ceux donnés par le tableau 3.2 à l'exception du paramètre b_n (la décélération désirée du véhicule n) dont la valeur est égale à 3 m.s^{-2} .

Les paramètres du modèle TVDM sont ceux représentés dans le chapitre 1 par le tableau 1.2 page 30. Le tableau 3.3 résume les paramètres de simulation utilisés dans cette section.

TABLE 3.3 – Paramètres de simulation

Paramètres	Valeurs	Unités
Rayon de l'anneau	800	m
Longueur du véhicule	5,00	m
Temps de simulation	800	s
Décélération maximale	3,00	m.s^{-2}
Accélération maximale	4,00	m.s^{-2}
Vitesses désirées	15,00	m.s^{-1}
Pente de la route	0,00	Degré
Masse du véhicule (consommation)	1269	kg
Masse du véhicule (émission)	1325	kg
Pourcentage de véhicules automatisés minimum	0	%
Pourcentage de véhicules automatisés maximum	100	%
Pas de variation du pourcentage de véhicules automatisés	10	%

TABLE 3.4 – Paramètres de simulation du modèle IDM

Paramètres	Valeurs	Unités
Accélérations maximales a_n	4,00	m.s^{-2}
Décélération désirées b_n	3,00	m.s^{-2}
Temps de sécurité en amont T_n	1,50	s

Le diagramme fondamental vitesse - capacité comporte deux régions importantes. La première région est caractérisée par un trafic congestionné dans lequel la vitesse de la file augmente en même temps que la capacité. Cette région correspond à la troisième région du diagramme

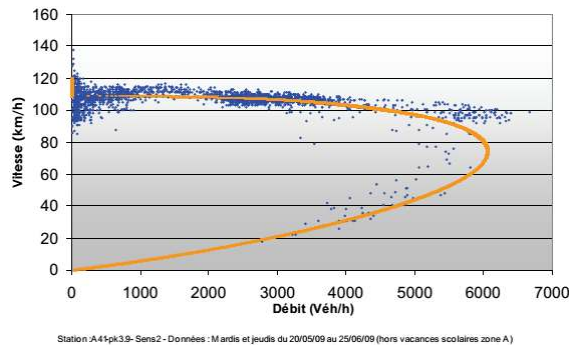


FIGURE 3.7 – Diagramme fondamental vitesse - capacité [Buisson and Lesort, 2010]

capacité - densité dans la figure 1.1 page 24. La deuxième région est qualifiée de trafic libre (ou fluide) dans laquelle la vitesse de la file augmente et la capacité diminue (figure 3.7).

Dans le cadre de notre travail, puisque la vitesse maximale autorisée est inférieure à 50 km.h^{-1} , la région dans laquelle on travaille est donc la première où la courbe vitesse - capacité est croissante. Pour varier la capacité du trafic dans notre cas, il suffit de varier la vitesse moyenne de la file. Puisque nous travaillons sur un circuit fermé (infrastructure Ring), la vitesse de la file dépend de la densité du trafic. Pour augmenter la densité du trafic il suffit d'augmenter le nombre de véhicules dans l'anneau et par conséquent la vitesse diminue.

Les études menées sur la sécurité montrent que la vitesse est le paramètre le plus influent sur le taux d'accidents dans le trafic routier : plus la vitesse du véhicule est élevée, plus le niveau de sécurité est bas. En conclusion, dans le cadre de nos simulations, plus la vitesse de la file est petite, plus la sécurité est élevée. Par suite, nous nous attendons à une amélioration de la sécurité lorsque la densité augmente puisque la vitesse de la file diminue.

Les résultats présentés dans cette section sont relatifs au scénario sans collision. La sécurité, la consommation en carburant et les émissions de polluants, sont évaluées en fonction du pourcentage des véhicules automatisés dans le trafic ainsi que leur densité.

3.4.3 Résultats relatifs à l'indicateur DWell Time (DWT)

L'indicateur de sécurité DWT, défini dans le troisième paragraphe page 89, est destiné à évaluer la sécurité d'un trafic mixte. Rappelons que par définition, l'indicateur DWT est la période de temps pendant laquelle l'interdistance du véhicule est inférieure à une interdistance critique. Dans notre contexte, cette dernière dépend du type de conduite (manuelle ou automatisée) parce que le temps de sécurité en amont pour les véhicules automatisés est déjà fixé comme une entrée du modèle. La distance de freinage est considérée comme une interdistance critique, dans ce paragraphe, seulement pour le conducteur qui est représenté par le modèle calibré TVDM.

La figure 3.8 présente la relation entre la densité, la sécurité à travers l'indicateur S_{DWT} et le pourcentage de véhicules automatisés dans un trafic à une seule voie. Pour un pourcentage fixe de véhicules automatisés, lorsque la densité du trafic augmente, la sécurité en terme de DWT augmente aussi. En effet, l'infrastructure utilisée dans cette partie est le Ring sans voie d'insertion. Ainsi, l'augmentation de la densité se fait à travers l'augmentation du nombre de véhicules dans la file. De ce fait, cette augmentation va diminuer la vitesse moyenne des véhicules et par suite une amélioration de la sécurité.

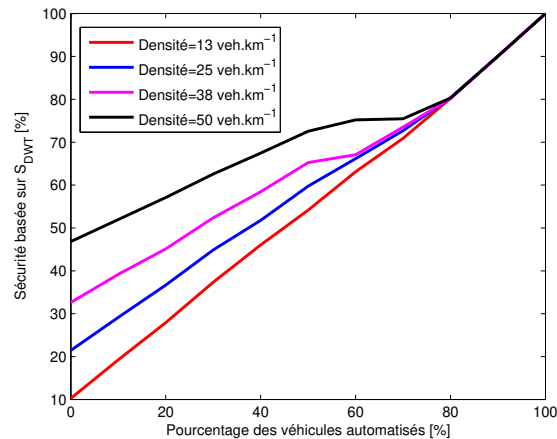


FIGURE 3.8 – Relation entre la sécurité (S_{DWT}), la densité et le pourcentage des véhicules automatisés

D'après la figure 3.8, à une densité de 13 veh.km^{-1} , la sécurité dans le trafic augmente quasi linéairement en présence de plus de véhicules automatisés. En effet, nous avons remarqué lors de la simulation que la vitesse moyenne des véhicules diminue en augmentant le pourcentage des véhicules automatisés (voir explication donnée)

Lorsque 80% ou plus de véhicules sont automatisés, la figure 3.8 montre que la densité n'a pas d'impact sur la sécurité. Et les niveaux de sécurité pour des densités supérieures à 13 veh.km^{-1} similaires dans cette tranche d'automatisation. Cela est lié aux interdistances entre les véhicules dans le trafic. En effet, avec ce pourcentage de véhicules automatisés, les véhicules arrivent à laisser une interdistance supérieure à l'interdistance critique relativement au style de conduite. Logiquement, la sécurité augmente avec l'augmentation du pourcentage des véhicules automatisés. En effet, avec 80% ou plus de véhicules automatisés dans le trafic, ce dernier a tendance à être totalement automatisé puisque la majorité des véhicules est représentée par le modèle IDM. Ainsi, avec le choix de la valeur de T_n , l'interdistance des véhicules automatisés est supérieure à $v_n \cdot T_n$ pour ces mêmes valeurs de densité.

3.4.4 Résultats relatifs à l'indicateur Modified Dwell Time (MDWT)

Dans cette partie, la situation de conduite du conducteur sera évaluée avec l'indicateur PICUD. L'objectif consiste à mesurer le temps pendant lequel le PICUD du conducteur est négatif (situation critique). Pour les véhicules automatisés, la distance critique reste la même, soit $v_n \cdot T_n$.

Le choix de cet indicateur de la situation critique pour le conducteur apparaît plus pertinent puisque le PICUD prend en compte la distance de freinage des deux véhicules en plus du temps de réaction du conducteur. Ce temps apparaît comme un facteur très important pour la sécurité du conducteur. Un conducteur avec un temps de réaction petit (jeune conducteur) est capable de réagir et éviter une éventuelle collision plus qu'un conducteur avec un temps de réaction important (conducteur âgé).

La figure 3.9 présente la sécurité dans le trafic à une seule voie en fonction du pourcentage de véhicules automatisés et de la capacité du trafic. Nous avons choisi de faire varier la capacité afin de voir l'impact de ce paramètre sur la sécurité du trafic.

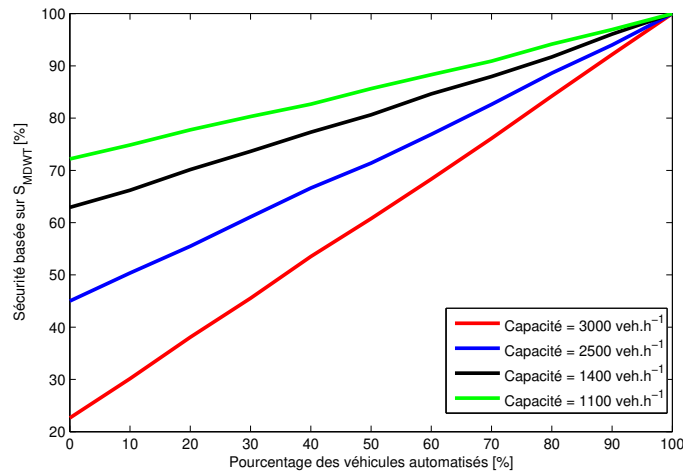


FIGURE 3.9 – Relation entre la sécurité (S_{MDWT}), la capacité et le pourcentage de véhicules automatisés

Comme le montre cette figure, la sécurité augmente en présence de plus de véhicules automatisés pour une capacité fixe du trafic. Ce résultat peut être expliqué par les mêmes raisons relatives à l'indicateur DWT.

Les courbes de cette figure correspondent aux capacités 1 100 veh.h⁻¹, 1 400 veh.h⁻¹, 2 500 veh.h⁻¹ et 3 000 veh.h⁻¹. Pour un pourcentage de véhicules automatisés fixe, l'augmentation de la capacité du trafic dégrade la sécurité en terme de MDWT. Cela est attendu puisque l'augmentation de la capacité du trafic signifie une augmentation de la vitesse moyenne des véhicules. Et comme mentionné avant, l'augmentation de la vitesse moyenne dégrade la sécurité dans le trafic. Nous pouvons ainsi conclure que l'augmentation de la capacité diminue la sécurité dans le trafic.

Par ailleurs, deux remarques peuvent être faites :

- le trafic totalement automatisé représente un maximum de sécurité qui atteint 100%. Cela est expliqué par le choix de l'indicateur à travers lequel la sécurité du véhicule automatisé est évaluée ($v_n \cdot T_n$). En effet, d'après [Kesting, 2008], la valeur de T_n fixé permet d'avoir un niveau de sécurité adéquat pour le véhicule. Dans notre cas, l'objectif est de tester ce choix de la valeur de T_n dans le cas d'un trafic mixte. Cela permet de conclure que le temps de sécurité en amont du modèle IDM est un bon critère pour l'évaluation de la situation de sécurité d'un véhicule automatisé. Toutefois, il est important de rappeler qu'en réalité la sécurité parfaite n'existe pas puisqu'elle dépend aussi d'autres facteurs comme l'environnement,
- dans un trafic où les véhicules sont régis par l'action du conducteur, la sécurité dans le trafic est dépendante de la capacité. En effet, à une capacité de 3 000 veh.h⁻¹, les véhicules ont été dans une situation dangereuse pendant en moyenne 23% du temps de simulation, soit 60 s. Ce temps inclut le régime transitoire de la file où la situation des véhicules est instable. Par conséquent, on peut dire que le modèle IDM gère mieux la situation de congestion, et donc la sécurité, que le modèle TVDM. Ce résultat est attendu puisque la conduite automatisée est sensée être plus sécuritaire que la conduite manuelle.

Notons que, les présents résultats sont relatifs aux conditions de simulation, aux modèles

et aux critères d'évaluation. Dans les prochains travaux, la validation de ces indicateurs est nécessaire avec des données expérimentales issues d'un trafic à basse vitesse.

3.4.5 Résultats relatifs à la consommation et aux émissions de polluants

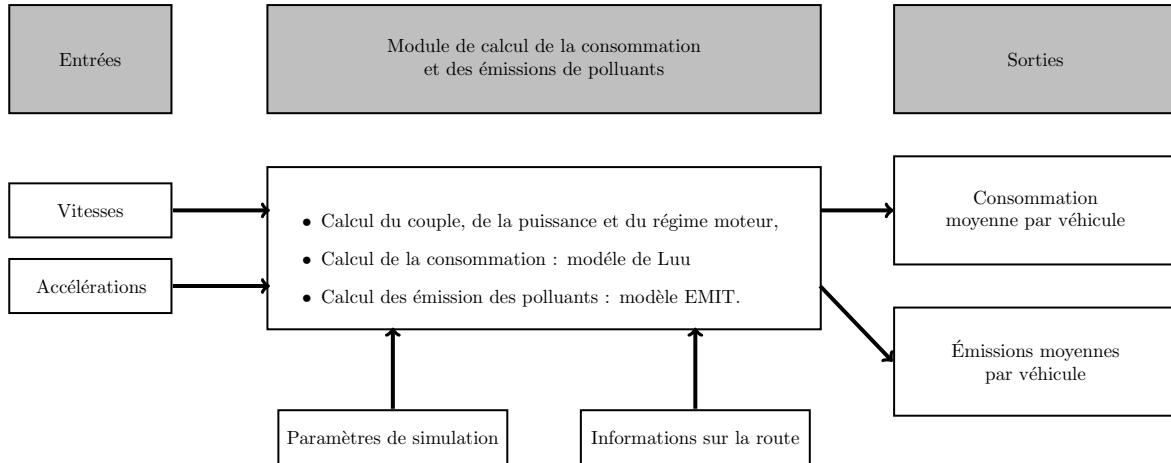


FIGURE 3.10 – Module de la consommation et des émissions de polluants

Le modèle de [Luu, 2009] donné par l'équation (2.81) page 113 permet de calculer la consommation instantanée de chaque véhicule. Ce calcul nécessite le passage par les étapes suivantes :

- calculer la puissance de traction du véhicule, P_n^{tract} . Le modèle utilisé est présenté par l'équation (2.65) page 106,
- calculer le régime moteur, dont le modèle est donné par l'équation (2.68) page 107,
- calculer le couple moteur, dont le modèle est donné par l'équation (2.63) page 106.

La figure 3.10, présente les entrées et les sorties du module de consommation et d'émission, développé à partir des modèles présentés dans le chapitre 2. À partir des vitesses et des accélérations des véhicules, la consommation et l'émission moyenne de chaque particule par véhicule est calculée. La puissance de traction, le couple moteur, le régime moteur et la consommation instantanée en carburant de chaque véhicule dans le trafic sont estimés à chaque pas de la simulation. Pour la consommation, les valeurs des paramètres du véhicule sont relatifs au modèle d'un Renault Megane écologique donnés par [Luu, 2011]. Alors que pour le calcul des émissions, nous nous sommes référés aux valeurs mentionnées dans la communication de [Cappiello et al., 2002] qui utilisent le modèle EMIT.

La figure 3.11 présente la consommation moyenne en carburant par véhicule en fonction du pourcentage des véhicules automatisés durant la période de simulation dans le cas d'un trafic sans collision. Dans ce paragraphe, deux conclusions peuvent être faites :

- Pour des faibles capacités (1 100 veh.h⁻¹ et 1 400 veh.h⁻¹), la présence des véhicules automatisés augmente légèrement la consommation moyenne par véhicule par rapport à une file avec des véhicules régis par l'action du conducteur. Ces capacités sont simulées pour des vitesses très faibles ([0 km.h⁻¹; 20 km.h⁻¹]) qui coïncident avec la phase de démarrage du véhicule. Dans cette région, la consommation du véhicule dépend de la puissance du moteur et du rapport de la boîte de vitesses (premier ou deuxième rapport). En même temps, le véhicule automatisé démarre plus vite que le conducteur d'après les courbes des figures 1.3 et 1.6. Pour une capacité de 2 500 veh.h⁻¹, les véhicules

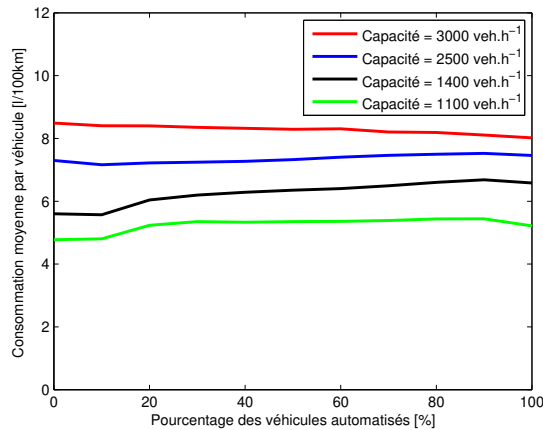


FIGURE 3.11 – Consommation moyenne en carburant par véhicule

automatisés n’ont pas un impact sur la consommation en carburant. Alors que pour une capacité de 3 000 veh.h⁻¹, la présence des véhicules automatisés diminue légèrement la consommation moyenne par véhicule.

La figure 3.12 permet d’expliquer ce résultat. Cette figure présente la vitesse moyenne d’une file de véhicules en fonction de sa densité normalisée pour chaque pourcentage de véhicules automatisés. La normalisation de la densité se fait par rapport à la longueur de la file à l’arrêt avec des interdistances nulles. D’après cette figure, à grande densité (dans ce cas la densité de la file est comprise entre 0,5 et 0,7), la vitesse moyenne de la file totalement automatisée est légèrement supérieure à celle d’une file totalement régie par l’action du conducteur. Alors qu’à faible densité, cette relation est inversée. Pour cette raison, l’ajout des véhicules automatisés permet de diminuer la vitesse moyenne de la file et par suite la consommation moyenne par véhicule.

Cette différence en terme de consommation entre les deux styles de conduite sera significative lorsqu’il s’agit d’un long parcours et pour des poids lourds.

- Lorsque la capacité du trafic augmente, la consommation en carburant augmente aussi. Ceci est attendu puisque, d’une part, la vitesse de la file augmente (diminution de la densité) et, d’autre part, le modèle de la consommation dépend de la vitesse du véhicule.

La figure 3.13 présente les résultats relatifs à l’émission moyenne de CO_2 par véhicule en fonction du pourcentage des véhicules automatisés. La figure 3.13(a) présente la quantité moyenne émise par véhicule, en g.km⁻¹, pour une capacité de 1 400 veh.h⁻¹ et pour différents types de carburants en se basant sur le modèle de [Ecoscore, 2013]. Cette figure 3.13(a) confirme que le carburant LPG présente de meilleures performances en termes d’émission de CO_2 .

La figure 3.13(b) présente la quantité moyenne émise par véhicule pour différentes capacités du trafic. Ces quantités sont calculées à partir du modèle d’EMIT présenté par [Cappiello et al., 2002]. D’après cette figure, la présence des véhicules automatisés n’a pas d’impact significatif sur l’émission moyenne de CO_2 par véhicule. Ici, nous nous attendons à une diminution des émissions moyennes de CO_2 par véhicule vue que la vitesse moyenne de la file baisse en augmentant le pourcentage des véhicules automatisés d’après la figure 3.12. Il est à noter également que la différence en terme d’émission de CO_2 entre une file totalement automatisée et celle totalement

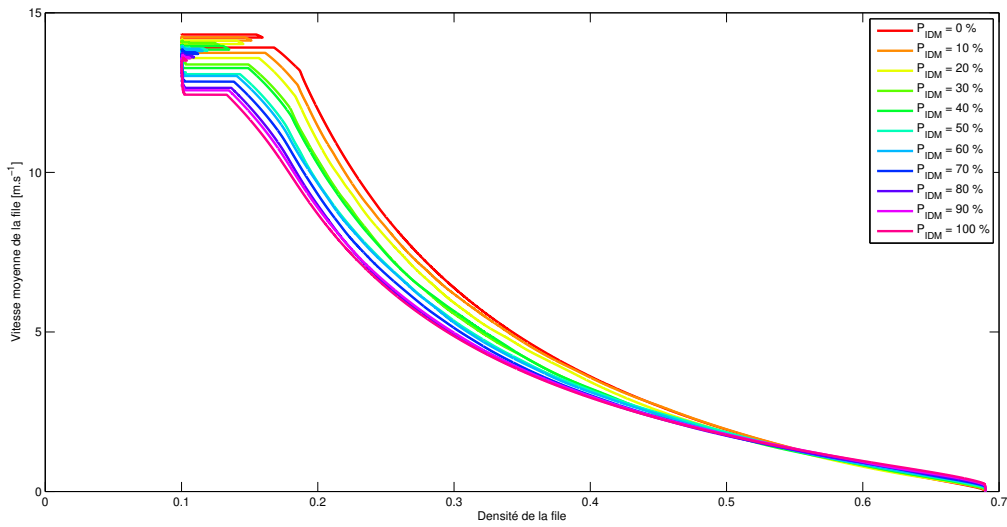
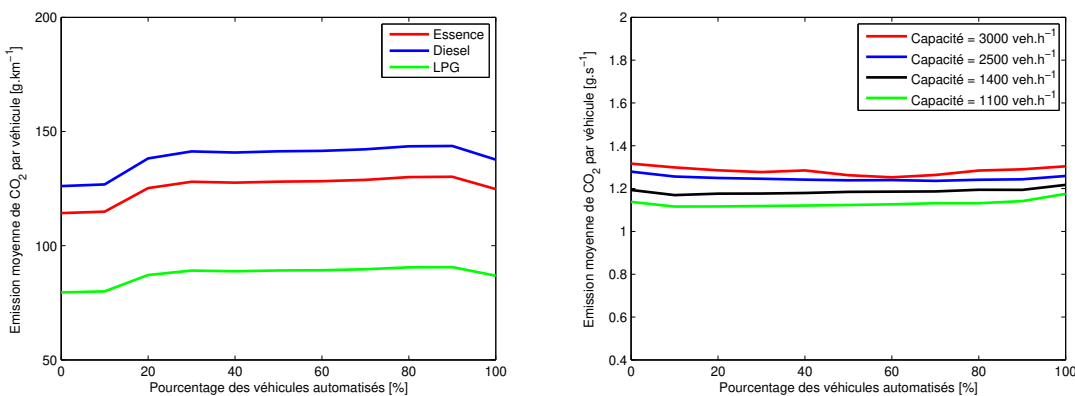


FIGURE 3.12 – Relation entre la vitesse moyenne et la densité de la file (sans scénario)



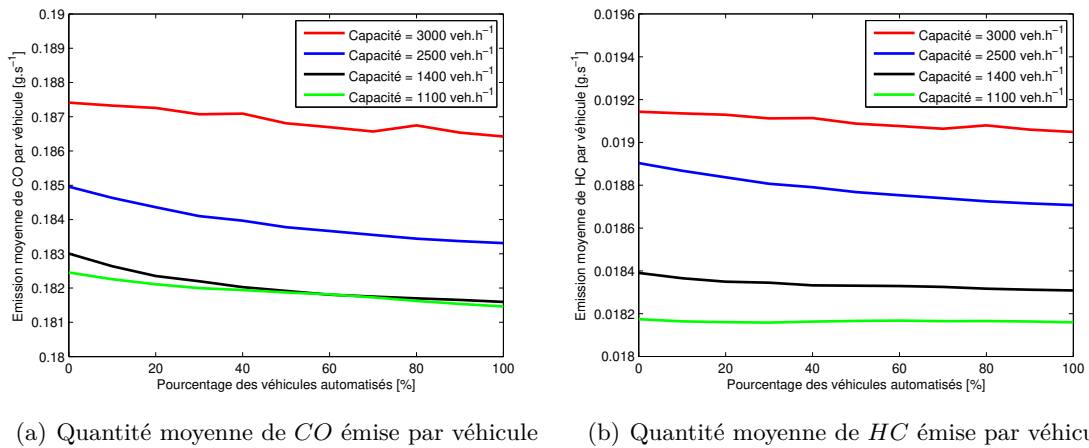
(a) Quantité moyenne de CO₂ émise par véhicule (b) Quantité moyenne de CO₂ émise par véhicule (Modèle EMIT)

FIGURE 3.13 – Résultats relatifs à l'émission de CO₂

régie par l'action du conducteur, n'est pas très importante. De ce fait, les émissions de CO₂ estimées sont peu sensibles à la vitesse du véhicule ce qui pose le problème de la calibration. Cela peut être dû au modèle du véhicule et/ou de celui de calcul des émissions de CO₂.

La figure 3.14 présente les résultats relatifs aux émissions des polluants CO (figure 3.14(a)) et HC (figure 3.14(b)). D'après les figures 3.14(a) et 3.14(b), lorsque le pourcentage des véhicules automatisés augmente, les émissions d'oxydes de carbone (CO) et d'Hydroxydes de Carbone (HC) diminuent. Ce résultat peut être expliqué par la diminution de la vitesse moyenne de la file lorsque le pourcentage des véhicules automatisés augmente.

Une augmentation de la capacité favorise une augmentation des émissions de CO et de

FIGURE 3.14 – Résultats relatifs aux émissions de CO et HC

HC . Ce résultat est une conséquence de l'augmentation de la vitesse moyenne de la file lorsque la capacité augmente. Ainsi, nous pouvons conclure que les émissions de CO et de HC sont sensibles à la vitesse qui représente le paramètre le plus important dans le calcul des émissions de ces polluants d'après le modèle donné par [Cappiello et al., 2002]. Toutefois, la réduction de ces émissions reste faible et n'apparaît que lorsqu'il s'agit d'un long parcours.

3.4.6 Conclusions

Dans cette section, les remarques suivantes ont été conclues d'après les résultats relatifs aux indicateurs S_{DWT} et S_{MDWT} . Elles consistent en :

- l'augmentation du pourcentage des véhicules automatisés présents dans une file améliore la sécurité ;
- la diminution de la capacité du trafic augmente la sécurité dans une file de véhicule.

Toutefois, l'indicateur de la sécurité d'un trafic pour des situations normales de conduite (sans collision) doit dépendre de deux facteurs :

- l'état du trafic : congestionné ou libre,
- le pourcentage de présence des véhicules automatisés dans une file.

À travers l'étude de l'impact sur la consommation et des émissions de CO_2 , CO et HC , les conclusions suivantes ont été faites :

- la consommation du véhicule dépend de la capacité du trafic. À des capacités élevées, la présence des véhicules automatisés diminue la consommation moyenne en carburant et l'émission moyenne de CO_2 , CO et HC par véhicule dans la file ;
- l'impact des véhicules automatisés sur ces derniers paramètres n'apparaît que lorsqu'il s'agit d'un long parcours.

3.5 Résultats relatifs au scénario profil de vitesse

3.5.1 Introduction

Parmi les études réalisées sur le domaine étudié ici, le scénario fondé sur un profil de vitesse de type sinusoïdal est intéressant. En effet, ce profil de vitesse apparaît lorsque les véhicules

traversent des ralentisseurs. Dans cette zone, le passage des piétons peut causer des profils de décélération et d'accélération variables des véhicules (perturbation). L'objectif de cette section est l'évaluation de l'impact de cette perturbation en termes de sécurité, de consommation en carburant et d'émissions de polluants.

Le premier paragraphe présente les conditions de simulation adoptées dans cette section. Le deuxième étudie la sécurité de la file en termes de nombre de collisions et de sévérité. Le troisième paragraphe présente une évaluation de la consommation en carburant et des émissions de polluants. Le quatrième paragraphe conclut cette section.

3.5.2 Conditions de simulations

Dans cette section, nous considérons une file de véhicules placés uniformément sur une route en anneau (Ring). À $t = 0$ s, les véhicules commencent à rouler. À $t = 500$ s, le véhicule de tête suit un profil sinusoïdal donné par l'expression suivante :

$$v_n(t) = 7,5 + 3,5 \sin\left(\frac{2\pi}{T_{\text{sinus}}}\right) \quad (3.5)$$

avec T_{sinus} la période. Dans cette partie, nous avons choisi deux valeurs de T_{sinus} , soit $T_{\text{sinus}} \in \{50 \text{ s}, 400 \text{ s}\}$. Ce choix a été fait afin de voir la réponse du système, constitué de plusieurs véhicules hétérogènes en terme de style de conduite, à des basses et hautes fréquences et pour une vitesse maximale V_{max} inférieure à la vitesse maximale des véhicules d'une file.

Le tableau 3.5 présente les paramètres de simulation utilisés dans cette section. Ici, le trafic est à une seule voie pour les mêmes raisons citées précédemment.

TABLE 3.5 – Paramètres de simulation

Paramètres	Valeurs	Unités
Rayon de l'anneau	1300	m
Nombre de véhicules	100	véhicules
Temps de simulation	1000	s
Temps de déclenchement du scénario	500	s
Pas de simulation	$2 \cdot 10^{-4}$	s
Vitesses désirées	15,00	m.s^{-1}
Longueur du véhicule	5,00	m
Accélérations maximales	4,00	m.s^{-2}
Décélération maximales	3,00	m.s^{-2}

3.5.3 Résultats relatifs aux nombre de collisions et à la sévérité

La figure 3.15 présente la sécurité en termes de nombre de collisions en fonction du pourcentage des véhicules automatisés pour deux périodes de la sinusoïde. Pour une période fixe, la sécurité dans le trafic augmente avec la présence des véhicules automatisés comme le montre les courbes en couleurs rouge et bleue. Cela s'explique par la bonne gestion des situations critiques du véhicule automatisé comme montré auparavant en terme de nombre de collisions.

La courbe en couleur rouge représente la sécurité dans le trafic pour une période $T_{\text{sinus}} = 400$ s. Cette courbe se trouve au dessus de celles relatives à la période $T_{\text{sinus}} = 50$ s pour les deux valeurs de la vitesse désirée du modèle IDM (courbes bleue et noire). Cela s'explique par le fait

que les véhicules arrivent à suivre le véhicule de tête lorsqu'il s'agit de grandes périodes (basses fréquences).

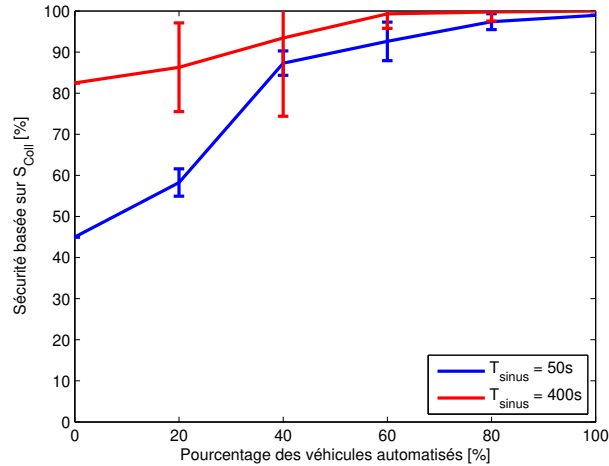


FIGURE 3.15 – Relation entre la sécurité et le pourcentage de véhicules automatisés en termes de nombre de collisions

La figure 3.16 présente les valeurs moyennes de $\langle l'ees \rangle$ en fonction du pourcentage des véhicules automatisés pour deux périodes du profil de vitesse. À basse fréquence, la sévérité des collisions diminue en présence des véhicules automatisés ($T_{sinus} = 400s$). Cela se traduit par une amélioration de la sécurité dans le trafic lorsque le pourcentage des véhicules automatisés augmente (figure 3.17). Il s'explique par la bonne gestion des collisions dans des situations critiques du véhicule automatisé représenté par le modèle IDM avec les paramètres du tableau 3.4. Toutefois, ces collisions n'engendrent pas de dégâts humains d'après la figure 2.1.

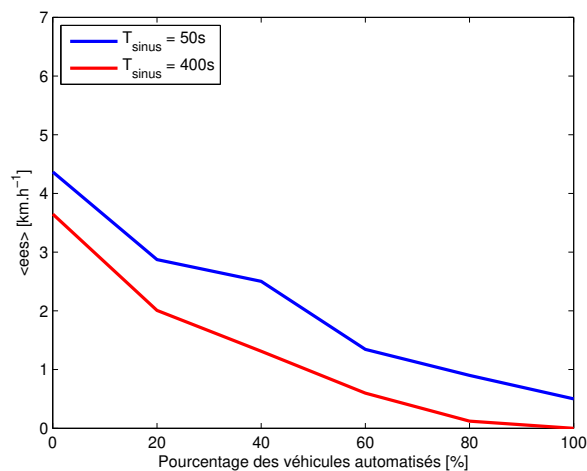


FIGURE 3.16 – Relation entre les valeurs de $\langle l'ees \rangle$ et le pourcentage de véhicules automatisés

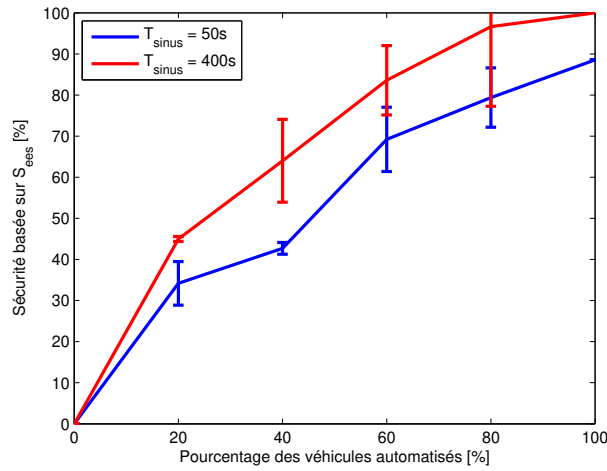


FIGURE 3.17 – Indice de sécurité basé sur la sévérité du collision : S_{ees}

3.5.4 Résultats relatifs à la consommation en carburant et aux émissions de polluants

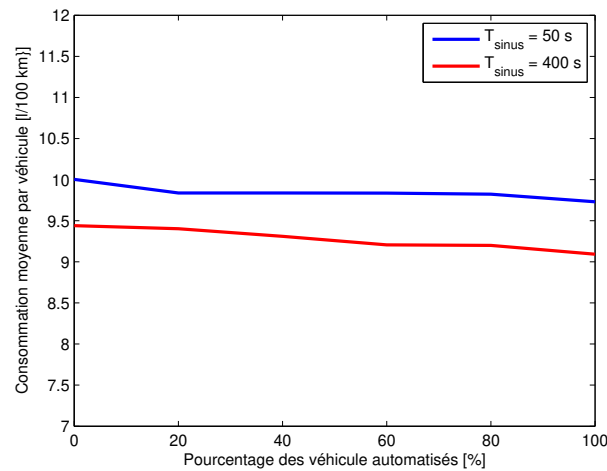


FIGURE 3.18 – Consommation moyenne en carburant par véhicule

La figure 3.18 présente la consommation moyenne en carburant par véhicule dans la file en fonction du pourcentage des véhicules automatisés. D'après cette figure, la présence des véhicules automatisés dans la file a peu d'impact sur la consommation moyenne en carburant par véhicule. Ceci peut être expliqué par le choix des modèles relatifs au conducteur et au véhicule automatisé dont ils sont considérés comme des modèles de poursuite.

Par ailleurs, la période de la sinusoïde du véhicule tête de file, par suite sa fréquence, possède un impact sur la consommation moyenne en carburant par véhicule. Lorsque la période $T_{sinusoide}$ augmente la consommation moyenne en carburant par véhicule diminue. En effet, le véhicule effectue plus d'accélération et de décélération dans le cas des hautes fréquences.

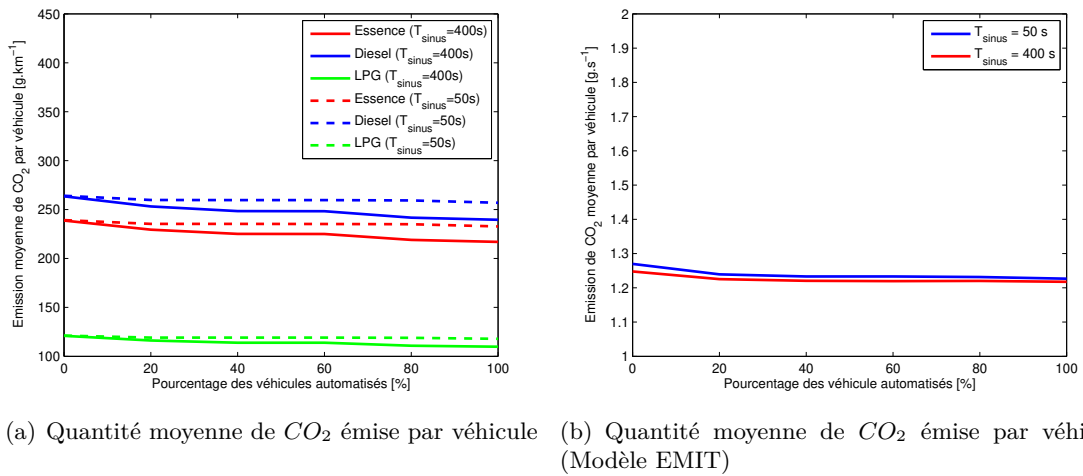


FIGURE 3.19 – Résultats relatifs aux émissions de CO et HC

La figure 3.19 compare les taux moyens d'émission de CO_2 par véhicule en fonction du pourcentage des véhicules automatisés. Ces émissions sont calculées à partir de la consommation (figure 3.19(a)) et du modèle d'EMIT (figure 3.19(b)).

La figure 3.19(a) présente les taux moyens d'émission de CO_2 en fonction du type de carburant. Ces taux sont calculés à partir de la consommation moyenne en carburant par véhicule. Comme le montre cette figure, le véhicule diesel possède le taux d'émission le plus élevé dans le cas des deux périodes de la sinusoïde.

D'après la figure 3.19(b), la présence des véhicules automatisés a très peu d'impact sur les émissions de CO_2 pour les périodes $T_{\text{sinus}} = 400$ s et $T_{\text{sinus}} = 50$ s.

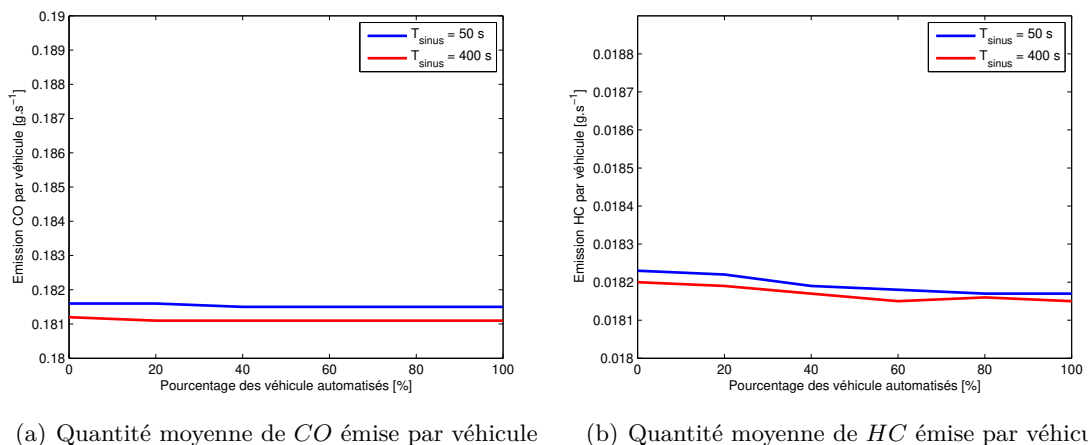


FIGURE 3.20 – Résultats relatifs aux émissions de CO et HC

La figure 3.20 présente les taux moyens d'émission de CO (figure 3.20(a)) et de HC (figure

3.20(b)) en fonction du pourcentage des véhicules automatisés. D'après cette figure, la présence des véhicules automatisés dans la file a très peu d'impact sur les émissions de CO et de HC . Pour des fréquences élevées, ces taux sont légèrement plus importants que dans le cas des basses fréquences. Ces résultats peuvent être expliqués par le même raisonnement que dans le cas de la consommation.

3.5.5 Conclusions

Cette section a présenté les résultats relatifs à la sécurité en termes de nombre de collisions, la consommation et les émissions de polluants pour le scénario « profil de vitesse » de type sinusoïdal. L'analyse a été basée sur deux périodes de la sinusoïde. Les résultats ont montré que le véhicule automatisé doit adapter sa vitesse maximale en fonction du profil de vitesse du véhicule tête de file dans le cas des hautes fréquences. Les conclusions suivantes peuvent également être faites :

- la sécurité augmente avec la présence de plus de véhicules automatisés, en terme de nombre de collisions pour les différentes fréquences,
- l'amélioration de la sécurité du trafic en terme de sévérité dépend de la fréquence de la sinusoïde,
- l'automatisation du trafic a peu d'impact sur la consommation et les émissions des particules de CO_2 , CO et de HC .

3.6 Résultats relatifs au goulot d'étranglement

3.6.1 Introduction

Le goulot d'étranglement est un phénomène très répandu dans la circulation sur les autoroutes. Dans cette zone de rétrécissement des voies, les véhicules sont amenés à ralentir voire s'arrêter et/ou changer de voie afin qu'ils puissent éviter l'obstacle qui se trouve sur une des deux voies.

3.6.2 Conditions de simulation et principes d'évaluation

Le rétrécissement de voie ainsi généré, est une perturbation qui peut causer des collisions. En effet, ce scénario est équivalent à un « mur de brique » placé sur une seule voie dans une route à deux voies.

Les paramètres de simulation sont résumés dans le tableau 3.6. Comme dans les paragraphes précédents, le nombre de collisions, la sévérité, la consommation et les émissions moyennes de polluants par véhicule, sont calculés dans cette section.

3.6.3 Résultats relatifs au nombre de collisions et à la sévérité

La figure 3.21 présente l'indice de sécurité basé sur le nombre de collisions dans un trafic à deux voies. D'après cette figure, deux remarques peuvent être faites :

1. La sécurité dans le trafic augmente en présence de plus de véhicules automatisés. Ce-ci rejoint les résultats précédemment trouvés pour les autres scénarios étudiés et s'explique par la bonne gestion des situations critiques de la part des véhicules automatisés.
2. La sécurité du conducteur (0% de véhicule automatisé) a été améliorée par rapport au scénario freeze en terme de nombre de collisions.

TABLE 3.6 – Paramètres de simulation

Paramètres	Valeurs	Unités
Rayon de l'anneau	1300	m
Temps de simulation	1000	s
Pas de simulation	0,002	s
Vitesses initiales	0,00	m.s ⁻¹
Vitesses désirées	15,00	m.s ⁻¹
Longueur du véhicule	5,00	m
Accélérations maximales	4,00	m.s ⁻²
Décélérations maximales	3,00	m.s ⁻²
Nombre de voies	2,00	voies
Pourcentage des véhicules dans la voie 1	50,00	%
Pourcentage de véhicules automatisés minimum	0	%
Pourcentage de véhicules automatisés maximum	100	%
Pas de variation du pourcentage de véhicules automatisés	20	%

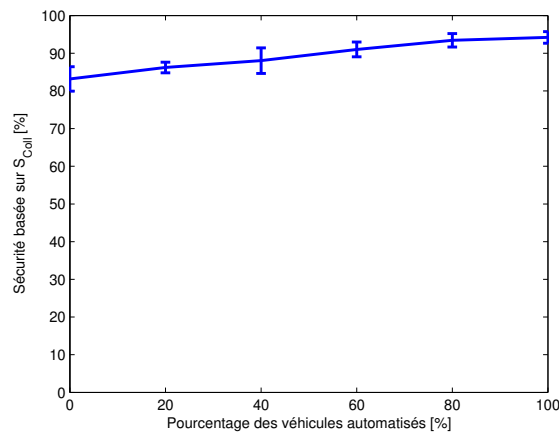
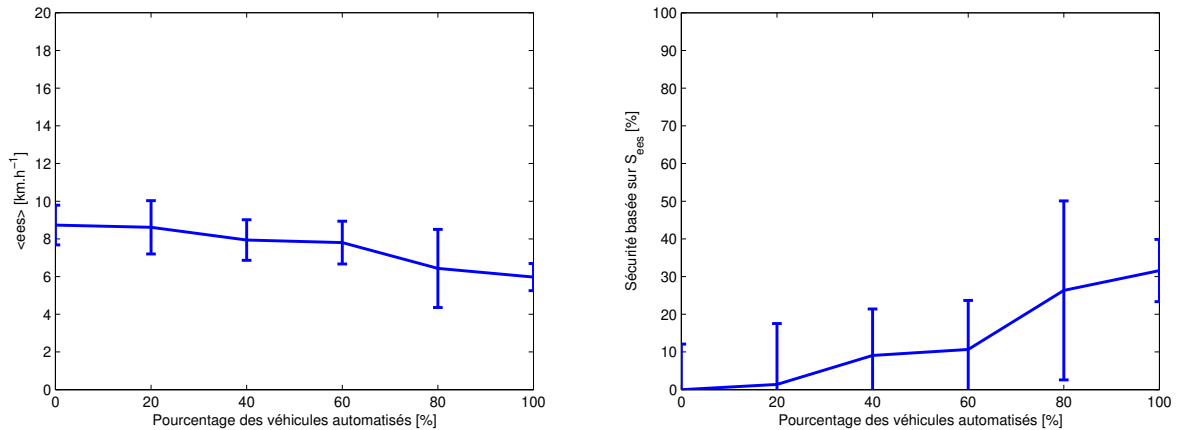


FIGURE 3.21 – Sécurité basée sur le nombre de collisions : goulot d'étranglement

Cette amélioration au niveau de la sécurité est une conséquence du changement de voie. En effet, les véhicules peuvent changer de voie lors de la perception d'un obstacle et lorsque les conditions de changement de voie sont satisfaites. Les véhicules qui ne peuvent pas changer de voie sont amenés à freiner afin d'éviter les collisions dans la zone du goulot d'étranglement.

D'après la figure 3.22(a), la sévérité des collisions engendrées dans ce type de scénario ne dépasse pas 25 km.h⁻¹. D'après la figure 2.1, les collisions ne causent pas des personnes tuées ou gravement blessées.

Les valeurs de l'*ees* obtenues dans ce scénario sont très faibles en les comparant avec ceux obtenues dans le scénario freeze. En effet, les véhicules sont amenés à décélérer et diminuer leurs vitesses afin de dépasser la zone du goulot d'étranglement. Par conséquent, la densité dans cette zone augmente et par suite la vitesse moyenne des véhicules diminue. Ainsi, les collisions dans le trafic sont à très basses vitesses.



(a) Relation entre les valeurs de $\langle ees \rangle$ et le pourcentage de véhicules automatisés (b) Indice de sécurité basé sur la sévérité de collision : S_{ees}

FIGURE 3.22 – Résultats relatifs à la sévérité pour le goulot d'étranglement

La figure 3.22(b) présente l'indice de sécurité basé sur la sévérité de collisions à travers l' ees . Cette figure montre que le minimum de sécurité correspond à un trafic avec des véhicules totalement régis par l'action du conducteur. Toutefois, en augmentant la présence des véhicules automatisés, la sécurité augmente dans le trafic. Cela peut être expliqué par la conjonction de deux phénomènes :

- La gestion des situations critiques : les véhicules automatisés peuvent éviter les collisions mieux que les véhicules régis par l'action du conducteur comme le montre la figure 3.21.
- La gestion du changement de voie : le véhicule automatisé gère son changement de voie mieux que le véhicule régis par l'action du conducteur. En effet, l'accélération du conducteur à travers le modèle TVDM dépend de deux véhicules en amont alors que celui du véhicule automatisé ne dépend que du prédécesseur. Puisque le changement de voie à travers le modèle « MOBIL » ne prend pas en compte de deux véhicules en amont, ce-ci influe la décision du changement de voie du véhicule régi par l'action du conducteur.

3.6.4 Résultats relatifs à la consommation et aux émissions de polluants

La figure 3.23 présente la consommation moyenne en carburant par véhicule en fonction du pourcentage des véhicules automatisés dans le trafic. D'après cette figure, la consommation du véhicule diminue avec l'augmentation du pourcentage de véhicules automatisés. Cela peut être expliqué par la conjonction de deux phénomènes :

- la gestion des situations critiques : puisque la consommation à l'arrêt est prise en compte par le modèle de [Luu, 2011], nous pouvons déduire que les véhicules automatisés ont réduit leurs vitesses et se sont arrêtés à l'approche du goulot d'étranglement. Pour cette raison, la consommation moyenne par véhicule a diminué avec la présence de plus de véhicules automatisés.
- l'effet du changement de voie : en effet, le changement de voie permet de fluidifier le trafic et de diminuer les décélérations et les accélérations successives des véhicules qui sont deux facteurs très importants dans la mesure de la consommation.

L'impact des véhicules automatisés sur la consommation moyenne en carburant par véhicule sera important lorsqu'il s'agit d'un long parcours.

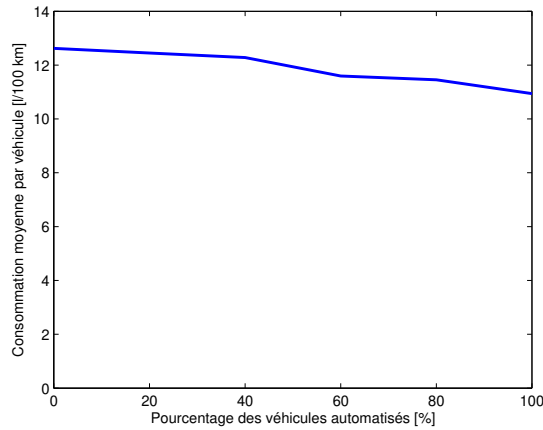
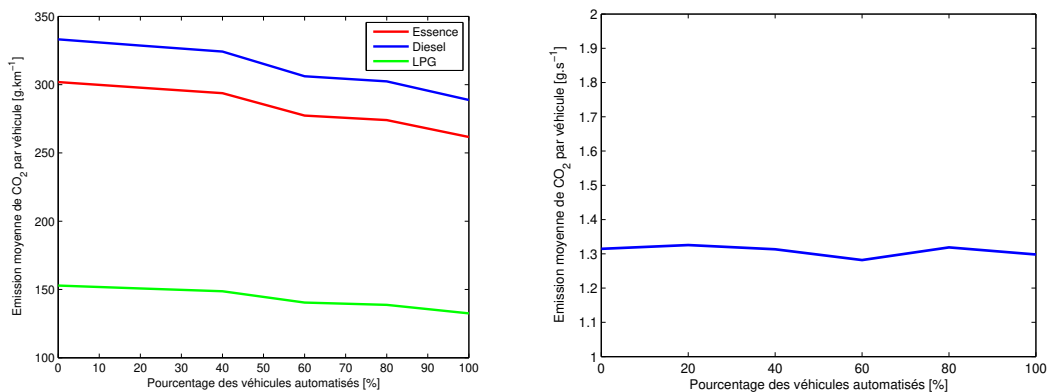


FIGURE 3.23 – Résultats relatifs à la consommation en carburant par véhicule

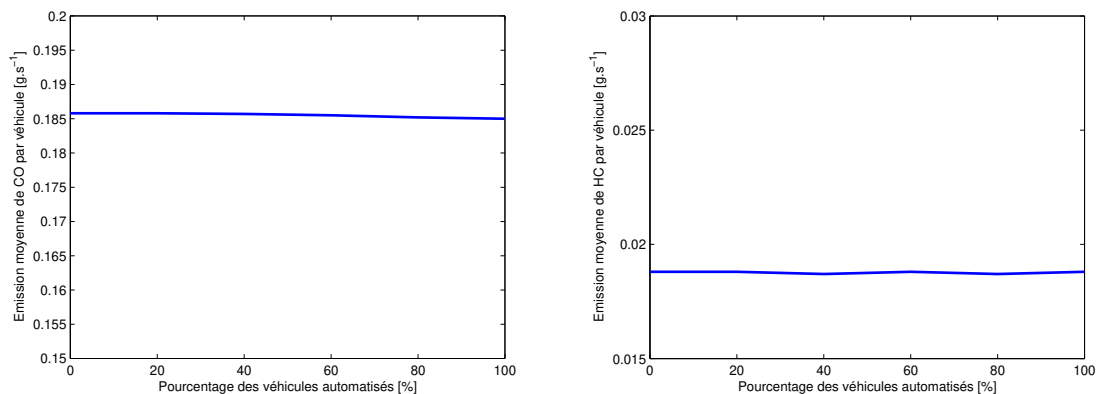
Les figures 3.24(a) et 3.24(b) présentent les taux moyens d'émission de CO_2 par véhicule pendant la durée de simulation. Rappelons que ces deux figures ne correspondent pas au même modèle de calcul. Ces deux figures montrent que les émissions de CO_2 se sont légèrement dégradées avec l'ajout de véhicules automatisés dans le trafic. Puisque les émissions sont liées à la consommation en carburant, les causes de cet apport positif des véhicules automatisés en termes d'émission de CO_2 sont les mêmes que pour la consommation.



(a) Quantité moyenne de CO_2 émise par véhicule (b) Quantité moyenne de CO_2 émise par véhicule

FIGURE 3.24 – Résultats relatifs aux émissions de CO_2

La figure 3.25 présente respectivement les taux des émissions moyens par véhicule du CO (figure 3.25(a)) et de HC (figure 3.25(b)). D'après ces deux figures, l'ajout des véhicules automatisés diminue légèrement les émissions de ces deux particules dans le cas d'un goulot d'étranglement. Les causes de cet apport sont les mêmes que dans le cas de la consommation.



(a) Quantité moyenne de CO émise par véhicule

(b) Quantité moyenne de HC émise par véhicule

FIGURE 3.25 – Résultats relatifs aux émissions de CO et de HC

3.6.5 Conclusions

Cette section a présenté les résultats relatifs au goulot d'étranglement en terme de sécurité, de consommation et des émissions de polluants. Deux grandes conclusions peuvent être déduites de cette section :

- La présence des véhicules automatisés dans le trafic augmente la sécurité dans le trafic, en termes de nombre de collisions et de sévérité, et diminue légèrement la consommation et l'émission de CO_2 .
- Les véhicules automatisés réduisent légèrement les émissions de CO et de HC .

3.7 Modified Intelligent Driver Model

3.7.1 Introduction

La formulation originale du modèle IDM est présentée par l'équation 1.27 page 45. Cette formulation a été utilisée dans plusieurs travaux de recherche pour la reproduction de quelques aspects du trafic à savoir le diagramme fondamental ([Kesting, 2008]) et la conduite longitudinale du véhicule automatisé comme dans les travaux présentés dans cette thèse.

Malgré que l'IDM possède plusieurs avantages en l'occurrence l'intuitivité des paramètres, il présente un inconvénient qui est le dépassement des capacités réelles en décélération du véhicule. Dans les travaux présentés précédemment dans cette thèse, les décélérations des véhicules ont été seuillées par la décélération réelle qui est de 3 m.s^{-2} . Les raisons de l'utilisation de la formulation originale du modèle IDM sont les suivantes :

- garder le nombre de paramètres et leurs représentativités. En effet, l'ajout d'un paramètre ou une expression pourrait engendrer la non conformité avec les critères de choix du modèle ACC dans le chapitre 1.
- l'ajout d'un paramètre donne lieu à une étape de calibration à travers des données expérimentales que nous ne possédons pas actuellement.

Cette section présente dans son premier paragraphe l'élément responsable au dépassement de la décélération réelle du véhicule à travers le modèle IDM et propose la modification adéquate pour pallier cet inconvénient. Dans son deuxième paragraphe, la nouvelle formulation du modèle

IDM pour un système à plusieurs véhicules est présentée. Le test du modèle IDM modifié a fait l'objet du troisième paragraphe à travers un scénario présenté dans le chapitre 2. Le dernier paragraphe conclut cette section.

3.7.2 Adaptation aux capacités réelles du véhicule

Le test du modèle IDM dans les travaux présentés précédemment a montré que le dépassement des limites réelles du véhicule en décélération se trouve dans l'expression de l'interdistance. En effet, l'accélération du modèle IDM est inversement proportionnelle à l'interdistance nette du véhicule s_n . Dans l'équation (1.27), on a

$$\text{si } s_n \rightarrow 0 \quad \text{alors} \quad \left(\frac{1}{s_n}\right)^2 \rightarrow +\infty \quad (3.6)$$

L'interdistance nulle correspond à une collision entre deux véhicules. Ainsi, avec le modèle IDM, la collision ne se produit pas quand son décélération n'est pas seuillée.

L'idée consiste à ajouter une constante à l'interdistance nette qui permet d'avoir une décélération finie quand s_n est nulle. Soit $\epsilon_n \in \mathbb{R}^*$, nous avons

$$\text{si } s_n \rightarrow 0 \quad \text{alors} \quad \left(\frac{1}{s_n + \epsilon_n}\right)^2 \in \mathbb{R} \quad (3.7)$$

Pour un seul véhicule, la nouvelle expression du modèle IDM est donnée par

$$\dot{v}_n = a_n \cdot \left(1 - \left(\frac{v_n}{v_n^0}\right)^4 - \left(\frac{s^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n + \epsilon_n}\right)^2\right), \quad (3.8)$$

où ϵ_n est une valeur à régler en fonction des limites réelles du véhicule en décélération. Soit,

$$\dot{v}_n \geq \gamma_n \quad (3.9)$$

avec γ_n la décélération maximale du véhicule.

3.7.3 Nouvelle formulation de l'IDM

Pour une file de véhicule, le modèle IDM peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\langle \underline{\underline{A}} \rangle^{-1} \ddot{\underline{x}}(t) + \langle \underline{\underline{V}} \rangle^{-1} \underline{f}_1(\dot{\underline{x}}(t)) + \langle \underline{\underline{S}} \rangle \underline{f}_2(\underline{x}(t)) = \underline{1} \quad (3.10)$$

avec

$$\langle \underline{\underline{A}} \rangle^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a_1} & & & & \\ & \frac{1}{a_2} & & & \\ & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & & & \frac{1}{a_n} \end{bmatrix},$$

$$\langle \underline{\underline{V}} \rangle^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(v_1^0)^4} & & & & \\ & \frac{1}{(v_2^0)^4} & & & \\ & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & & & \frac{1}{(v_n^0)^4} \end{bmatrix},$$

$$\langle \underline{\underline{S}} \rangle^{-1} = \begin{bmatrix} (s_1^*)^2 & & & & \\ & (s_2^*)^2 & & & \\ & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & & & (s_n^*)^2 \end{bmatrix},$$

$$\underline{f}_1(\dot{\underline{x}}(t)) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1^4 \\ \dot{x}_2^4 \\ \vdots \\ \dot{x}_n^4 \end{bmatrix}, \underline{f}_2(\underline{x}(t)) = \begin{bmatrix} \frac{1}{s_1^2} \\ \frac{1}{s_2^2} \\ \vdots \\ \frac{1}{s_n^2} \end{bmatrix}, \underline{1}(t) = \begin{bmatrix} 1(t) \\ 1(t) \\ \vdots \\ 1(t) \end{bmatrix}.$$

Dans le chapitre 2, nous avons vu que dans le cas où le véhicule est régi par l'action du conducteur, ce dernier prend en compte deux ou plusieurs véhicules en amont. Pour un véhicule automatisé et puisque la communication n'est pas prise en compte, ce véhicule ne prend compte que son prédécesseur. L'idée dans ce paragraphe est de donner en plus la possibilité au véhicule automatisé de gérer son interdistance par rapport à son successeur aussi. Pour cette raison, une nouvelle formulation du modèle IDM a été proposée et donnée par l'expression suivante :

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} x_n = a_n \left(1 - \frac{(\frac{\partial}{\partial t} x_n)^4}{v_0^4} - \frac{(s_n^*)^2}{\epsilon_n^2 + (\Delta x_n)^2} \right) + (Fv)_n a_{n-1} \left(1 - \frac{(\frac{\partial}{\partial t} x_{n-1})^4}{(v_{n-1}^0)^4} - \frac{(s_{n-1}^*)^2}{\epsilon_{n-1}^2 + (\Delta x_{n-1})^2} \right) \quad (3.11)$$

où

$$s_n^* = s_n^0 + v_n T_n - \frac{v_n \Delta v_n}{2\sqrt{a_n b_n}}.$$

Notons que le nombre minimum de véhicule dans la file doit être supérieur ou égal à trois.

Pour un système composé de plusieurs véhicules, le modèle IDM peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\langle \underline{\underline{A}} \rangle^{-1} \ddot{\underline{x}}(t) + \langle \underline{\underline{V}} \rangle^{-1} \underline{f}_1(\dot{\underline{x}}(t)) + \langle \underline{\underline{S}} \rangle \underline{f}_2(\underline{x}(t)) = \underline{1}(t) + \underline{h}(t) \quad (3.12)$$

avec

$$\langle \underline{\underline{A}} \rangle^{-1} = \left\langle \frac{1}{a_1}, \frac{1}{a_2}, \dots, \frac{1}{a_n} \right\rangle, \underline{f}_1(\dot{\underline{x}}(t)) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1^4 \\ \dot{x}_2^4 \\ \vdots \\ \dot{x}_n^4 \end{bmatrix}, \underline{f}_2(\underline{x}(t)) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\epsilon_1^2 + s_1^2} \\ \frac{1}{\epsilon_2^2 + s_2^2} \\ \vdots \\ \frac{1}{\epsilon_n^2 + s_n^2} \end{bmatrix},$$

$$\underline{h}(t) = \begin{bmatrix} h_1(t) \\ h_2(t) \\ \vdots \\ h_n(t) \end{bmatrix},$$

avec $h_i(t) = (Fv)_i \frac{a_i(t)}{a_{i-1}(t)}$ $\forall i \in \{1..n-1\}$ et $h_n(t) = 0$,

$$\langle \underline{V} \rangle^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(v_1^0)^4} + \frac{h_1(t)}{(v_2^0)^4} & & & & & & \\ & \frac{1}{(v_2^0)^4} + \frac{h_2(t)}{(v_3^0)^4} & & & & & \\ & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ & & & \frac{1}{(v_i^0)^4} + \frac{h_i(t)}{(v_{i+1}^0)^4} & & & \\ & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ & & & & & & \frac{1}{(v_n^0)^4} \end{bmatrix},$$

$$\langle \underline{S} \rangle = \begin{bmatrix} (s_1^*)^2 & h_1(t)(s_2^*)^2 & & & & \\ & (s_2^*)^2 & h_2(t)(s_3^*)^2 & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ & & (s_i^*)^2 & h_i(t)(s_{i+1}^*)^2 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ & & & & & (s_n^*)^2 \end{bmatrix}.$$

3.7.4 Détermination du paramètre Fv

Ce paragraphe commence par introduire le scénario de test utilisé pour la détermination de Fv dans sa première partie. La deuxième partie discute les résultats de simulation et propose une valeur de Fv .

3.7.4.1 Scénario

Dans ce paragraphe, le modèle IDM modifié est testé avec le scénario suivant : le véhicule de tête commence à rouler à une vitesse de 8 m.s^{-1} puis il passe à 5 m.s^{-1} . Après que la file de véhicule soit stable, la vitesse du véhicule de tête suit un profil sinusoïdal de fréquence 1 Hz et d'amplitude 1 m.s^{-1} .

3.7.4.2 Résultats et discussions

Le profil décrit dans le paragraphe 3.7.4.1 est appliqué au véhicule de tête de la file. Cette file est composée de sept véhicules. Les vitesses et les accélérations des véhicules sont respectivement représentées par les figures 3.26 et 3.27.

En se basant sur les critères de la stabilité de la file et le temps du régime transitoire, l'analyse des courbes de ces figures permet de conclure que :

- $Fv_n = 0$: dans ce cas, nous avons la formulation classique du modèle Intelligent Driver Model (IDM). Le véhicule prédécesseur n'est pas pris en compte dans la loi de contrôle. À $t_{Fv_n=0} = 37 \text{ s}$, la file est stable (les véhicules ont la même vitesse constante et les accélérations sont nulles).
- $Fv_n = 0,2$: cela signifie que le véhicule prend en compte 20 % de l'état du véhicule précédent. D'après les figures 3.26 et 3.27, on observe une diminution d'amplitude des oscillations en termes de vitesses et d'accélérations en comparant à celle où $Fv_n = 0$. Dans ce cas, la file devient stable en termes de vitesse et d'accélération à $t_{Fv_n=0,2} = 32 \text{ s}$. Cette valeur est plus petite que celle qui correspond à $Fv_n = 0$.
- $Fv_n = 0,6$: l'amplitude des oscillations de la file diminue avant et après sa stabilisation (avant et après l'application du profil de vitesse au véhicule de tête de la file). Ici, la file se stabilise à $t_{Fv_n=0,6} = 25 \text{ s}$ qui est moins important que $t_{Fv_n=0}$ et $t_{Fv_n=0,2}$.

- $Fv_n = 1$: chaque véhicule dans la file suit son prédécesseur avec moins d'oscillations en terme de vitesse.
- $Fv_n = 1,5$: les oscillations en termes de vitesse et d'accélération reviennent avec une amplitude plus importante que celles qui correspondent au $Fv_n = 1$. Dans ce cas, la file devient stable à $t_{Fv_n=0,6} = 30$ s qui est plus important que $t_{Fv_n} = 1$. Quand Fv_n augmente, le temps de stabilisation de la file augmente aussi.

En conclusion, $Fv_n = 1$ est le meilleur compromis en termes de l'amplitude des oscillations de la vitesse et de l'accélération et en termes de temps de stabilisation de la file.

3.7.5 Conclusions

Dans cette section, une amélioration du modèle IDM a été proposée en deux niveaux :

- L'adaptation aux capacités réelles en décélération du véhicule. Puisque, la décélération du véhicule est inversement proportionnelle à l'interdistance du véhicule, cela permet d'avoir une décélération infinie dans le cas d'une interdistance nulle (collision). Dans ce cas, un paramètre ϵ_n a été ajouté à l'interdistance du véhicule. Selon les capacités réelles en accélération et décélération du véhicule, le paramètre ϵ_n peut être calibré.
- La stabilité d'une file avec des véhicules totalement automatisés. L'idée consiste à prendre en compte l'état du véhicule successeur en plus du prédécesseur. Dans un environnement de simulation et en se basant sur les critères de stabilité et de minimisation du régime transitoire, la calibration du nouveau modèle IDM modifié a été élaborée. Les résultats montrent que la prise en compte de l'état du prédécesseur doit être égale à la prise en compte du successeur.

3.8 Conclusions

Ce chapitre a présenté les résultats relatifs à la sécurité, la consommation en carburant et les émissions de polluants du véhicule dans un trafic mixte. Ces résultats sont issus d'une étape de simulation à travers le simulateur de trafic mixte développé par le laboratoire MIPS dans le cadre de cette thèse. Selon les scénarios développés dans ce simulateur, les résultats se sont présentés dans ce chapitre :

- « Freeze » : l'analyse de la sécurité à travers ce scénario a été répartie en deux selon le modèle de gestion de collisions. La première approche consiste à éjecter le véhicule qui entre en collision alors que la deuxième considère que les deux véhicules accidentés forment un agglomérat qui décélère jusqu'à l'arrêt. Les résultats ont montré que la présence des véhicules automatisés dans le trafic améliore la sécurité globale du trafic en termes de nombre de collisions et de sévérité. Toutefois, selon des données références, les collisions peuvent ne pas avoir de grand dégâts humains (morts ou blessures graves).
- « Scénario sans collision » : l'étude de la sécurité à travers ce scénario est partagée en deux parties. La première partie a analysé le trafic mixte selon l'indicateur DWT. Ce dernier consiste à mesurer la période pendant laquelle l'interdistance d'un véhicule régi par l'action du conducteur est inférieure à sa distance de freinage. Dans la deuxième partie, l'indicateur de sécurité MDWT a été présenté pour analyser la sécurité du trafic mixte. Les résultats ont montrés que la présence des véhicules automatisés augmente la sécurité dans le trafic.

De même, pour un pourcentage fixe de véhicules automatisés, l'augmentation de la densité augmente la sécurité puisque sa vitesse moyenne du trafic diminue. D'une autre façon, l'augmentation de la capacité du trafic dégrade la sécurité du conducteur.

Cependant, les véhicules automatisés n'ont pas montrés un grand impact sur la consommation moyenne en carburant et les émissions des polluants par véhicule.

- « Profil de vitesse » : dans cette partie, deux périodes ont été choisies pour le profil sinusoïdal du véhicule de tête de la file. L'analyse de ce scénario avec les deux valeurs de la période a montré l'importance des véhicules automatisés sur la sécurité dans le trafic en terme de nombre de collisions et de sévérité. Cependant, une limite des systèmes d'aide à la conduite a été révélée. En effet, la vitesse désirée maximale du véhicule automatisé ne doit pas dépasser la vitesse maximale du sinusoïde. Dans le cas contraire, la sécurité dans le trafic se dégrade en présence des véhicules automatisés.

Par ailleurs, l'impact des véhicules automatisés sur la consommation en carburant moyenne par véhicule et les émissions des polluants ont été soulevés. Toutefois, l'apport sur la consommation n'apparaît que lorsqu'il s'agit d'un long parcours.

- « Goulot d'étranglement » : au contraire des scénarios précédents, celui-ci a été testé pour un trafic à deux voies. En termes de nombre de collisions et de sévérité, les résultats ont montré que la présence des véhicules automatisés réduit le nombre de collisions et leurs sévérités.

La consommation en carburant et les émissions de polluant ont été légèrement réduites en présence des véhicules automatisés dans le trafic.

La dernière sous-section de ce chapitre a été dédiée à l'amélioration des performances des véhicules automatisés en termes de stabilité de la file et de sécurité. Deux résultats ont été trouvés à ce niveau. Le premier concerne l'adaptation de la décélération du véhicule à sa capacité réelle et le deuxième se trouve dans la modification du modèle en ajoutant un terme qui traduit la prise en compte du véhicule successeur en plus du prédécesseur.

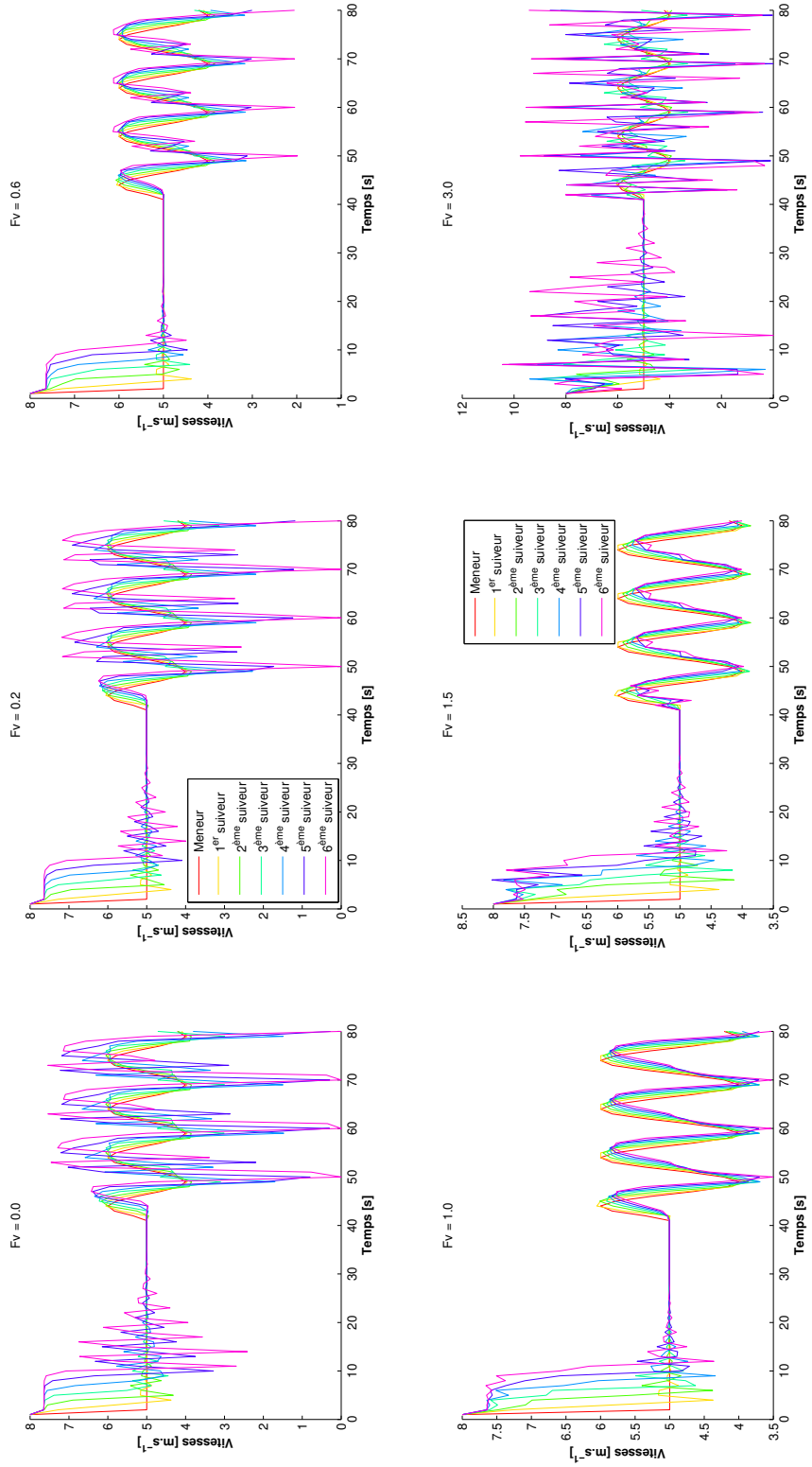
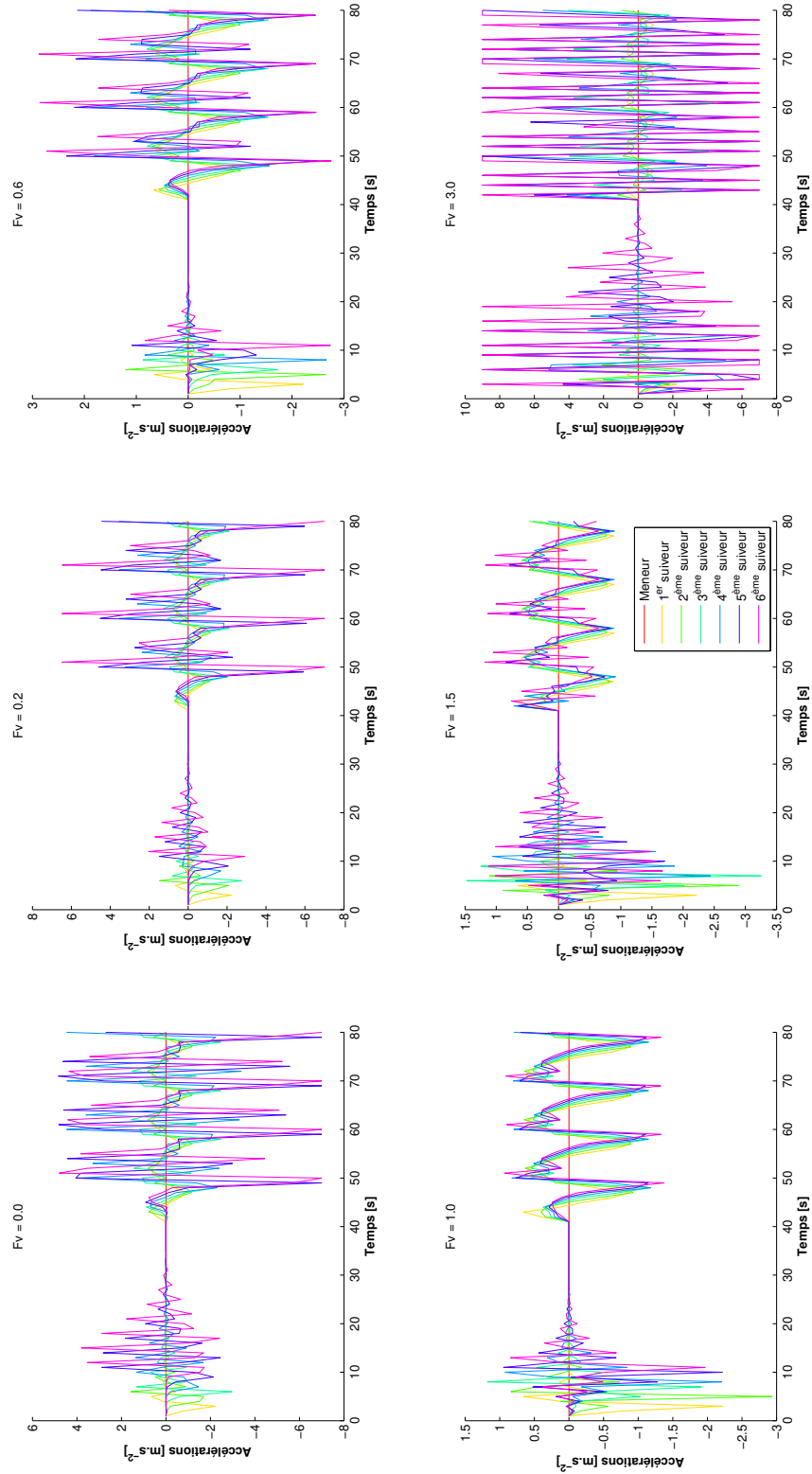


FIGURE 3.26 – Vitesses des véhicules pour différentes valeurs de Fv_n

FIGURE 3.27 – Accélérations des véhicules pour différentes valeurs de Fv_n

Conclusions générales et perspectives

Conclusions générales

Comme mentionné dans l'introduction de cette thèse, les systèmes d'aide à la conduite existent actuellement dans le marché. Un véhicule totalement automatisé sera disponible dans le marché dans un futur proche. Ces systèmes de pilotage automatique sont restreints à la conduite longitudinale seule.

Cette thèse a passé un revue sur l'étude microscopique, en mettant l'accent sur l'évaluation de l'impact des véhicules automatisés sur la sécurité globale du trafic, la consommation moyenne en carburant et les émissions de polluants, et macroscopique en développant un nouveau modèle vitesse - densité sur lequel le diagramme fondamental est basé.

Afin d'évaluer la sécurité du trafic dans des scénarios avec collisions, un simulateur de trafic mixte a été développé en commençant par un état-de-l'art des modèles longitudinaux du véhicule automatisé et de celui régis par l'action du conducteur et latéraux de changement de voie. Notre motivation pour a été basée sur les lacunes des simulateurs de trafic existant dans le marché et qui se présente dans leurs incapacités à gérer les collisions. Puisque cette dernière constitue la base de l'évaluation de la sécurité dans des scénarios avec collisions, le simulateur de trafic a introduit deux approches de gestion ont été présentés dont la première consiste à éjecter de la voie le véhicule qui entre en collision afin de conserver la fluidité du trafic. Dans la deuxième approche, les véhicules accidentés forment un agglomérat qui décélère jusqu'à l'arrêt.

Cette étude a montré l'importance de la présence des véhicules automatisés qui permet d'améliorer la sécurité globale du trafic selon les deux approches de gestion de collisions. Toutefois, ces systèmes de pilotage automatique du véhicule a présenté des limites dont l'inconfort des passagers est un exemple dans le cas d'un scénario freeze à basse vitesse.

Dans un scénario sans collision, la sécurité a été évaluée par rapport au pourcentage des véhicules automatisés dans le trafic. Puisque ce cas d'étude demande des indicateurs de sécurité particuliers, deux indicateurs ont été développés dans ce contexte. Le premier a été basé sur la durée de temps pendant laquelle le véhicule automatisé ait un temps inter-véhiculaire inférieur à celui de son temps de sécurité en amont. Pour le conducteur, celui-ci doit avoir une interdistance avec son prédécesseur inférieure à sa distance de freinage. Le deuxième indicateur a été basé sur l'indice de sécurité PICUD pour le véhicule automatisé. Ainsi, un PICUD négatif signifie que la collision est inévitable dans le cas où le prédécesseur effectue un freinage d'urgence.

Les résultats de simulations avec ces deux indicateurs ont montré l'importance de la présence de véhicules automatisés dans le trafic pour différentes capacités et densités. En effet, la sécurité du trafic s'améliore avec l'augmentation de la présence des véhicule à conduite automatisée. En même temps, nous avons démontré un résultat attendu qui consiste que l'augmentation de la capacité du trafic diminue la sécurité pour une région spécifique du diagramme fondamental.

Toutefois, les résultats présentés sont relatifs aux modèles choisis et au indicateurs, que nous les estimons adéquats pour une évaluation pertinente de la sécurité dans un trafic.

Puisque le facteur écologique représente un critère important pour l'environnement et spécialement dans le secteur de l'automobile, une étude de l'impact des véhicules automatisés sur la consommation en carburant et les émissions de polluants a été prise en compte. Cette étude a été basée sur des modèles issus de la littérature. En ce qui concerne la consommation en carburant, les résultats ont montré que l'utilisation des véhicules automatisés avec le modèle IDM ne dégrade pas la consommation moyenne en carburant par véhicule dans le trafic. Toutefois, ces résultats de simulations sont relatifs aux modèles des véhicules et à ceux de la consommation en carburant.

Les émissions de polluants dont le CO_2 , le CO et le HC ont été mesurées à travers des modèles de la littérature et des paramètres relatifs au véhicule d'essais de chaque référence. Les résultats de simulation ont montré que la présence des véhicules automatisés ne dégrade pas les émissions de ces polluants que dans certains cas. Toutefois, un résultat relatif au type de carburant a été présenté. Nous avons montré, comme prévu, que le carburant LPG est le plus efficace en termes d'émissions.

L'étude macroscopique dans cette thèse a fait l'objet de la synthèse d'un nouveau macroscopique modèle vitesse - densité. Ce modèle a été basé sur des données macroscopiques mesurées à partir des données microscopiques à travers le modèle du véhicule automatisé Intelligent Driver Model (IDM). Cette méthode a permis d'avoir la possibilité d'identifier un paramètre microscopique à partir d'un paramètre macroscopique par la méthode d'interpolation. En plus, le modèle vitesse - densité générique développé permet de prédire chacun de ces deux paramètres pour différentes situations du trafic en l'occurrence dans l'état congestionné et libre. En effet, la fixation de quelques paramètres de notre nouveau modèle permet d'avoir trois modèles de la littérature correspondants aux différents états du trafic. Cette généralité du modèle permet une utilisation meilleure pour toutes données mesurées macroscopiques réelles du trafic.

Également, la gestion du trafic a fait l'objet de synthèse d'un modèle mésoscopique sous forme matriciel du trafic. La gestion des différentes files de véhicules dans un trafic à deux voies a été basée sur l'ajout d'un paramètre de contact entre les véhicules. La commande de ce paramètre par les gestionnaire du trafic permet de diminuer la congestion dans des zones précises du trafic. Toutefois, ce modèle constitue pour nous un commencement pour ce type d'étude.

Cependant, de nombreuses questions restent encore posées. Elles font l'objet des perspectives de cette thèse.

Perspectives

Dans le cadre de cette thèse, des modèles microscopiques et macroscopiques pour le trafic routier ont été développés. Les travaux de cette thèse peuvent s'étendre sur plusieurs points de recherche qui sont fortement liés.

Le premier point en perspective est notamment la validation expérimentale du modèle vitesse - densité développé dans le premier chapitre de ce mémoire. Malgré que ce modèle a été basé sur des données microscopiques générées à partir du modèle calibré IDM, la validation de ce modèle à partir des données réelles reste primordiale.

Le deuxième point concerne les systèmes d'alerte de collision. Ces systèmes se basent sur les données provenant du système de navigation inertiel, composé de deux principaux capteurs qui sont l'accéléromètre et le gyroscope, et du GPS. Généralement, ces capteurs sont de type micromachined electromechanical systems (MEMS). Ce type est le plus utilisé dans le marché parce qu'il est caractérisé par son faible coût, la petite taille et la faible masse. Cependant, la

précision de ce type de capteur est relativement faible à cause des erreurs de calibration, leurs sensibilité par rapport à la température et ses linéarités ([Woodman, 2007]). Ainsi, la position 2D et la vitesse du véhicule sont munies d'une erreur sur chaque axe. Une première idée consiste en l'étude de la sensibilité de l'indicateur S_{MDWT} par rapport aux erreurs introduites par le GPS afin d'améliorer sa fiabilité dans un système d'alerte de collision. Une deuxième idée se présente dans la prise en compte du coefficient d'adhérence des pneus dans la mesure du niveau du risque à travers l'indicateur S_{MDWT} .

Finalement, il sera intéressant d'intégrer d'autres modèles pour le véhicule automatisé qui prennent en compte à la fois l'aspect sécuritaire et écologique. Le test de ce type de modèle dans un trafic mixte permet d'apporter une idée sur leur efficacité dans le futur proche.

Bibliographie

- [Aerde, 1995] Aerde, M. (1995). Single regime speed-flow-density relationship for congested and uncongested highways. In *The 74th TRB Annual Conference*. 61, 62
- [Ahn and Ross, 1993] Ahn, F. and Ross, M. (1993). Model of fuel economy with applications to driving cycles and traffic management. *Transportation Research Record*, 9 :105–114. 111
- [Ahn, 1998] Ahn, K. (1998). *Microscopic fuel consumption and emission modeling*. PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University. 100
- [Al-Jameel, 2009] Al-Jameel, H. (2009). Examining and improving the limitations of the gazis-herman-rothery car-following model. In *Salford Postgraduate Annual Research Conference*. 26
- [Ammoun, 2007] Ammoun, S. (2007). *Contribution des communications intervéhiculaires pour la conception de systèmes avancés d'aide à la conduite*. PhD thesis, Mines Paris. 88
- [Andre and Hammarstrom, 2000] Andre, M. and Hammarstrom, U. (2000). Driving speeds in europe for pollutant emissions estimation. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 5 :321–335. 102, 103
- [Ardekani et al., 2011] Ardekani, S., Ghandehari, M., and S.Nepal (2011). Macroscopic speed-flow models for characterization of freeway and managed lanes. *Politechnic diniasi*, 7 :6. 59, 60
- [Ardekani et al., 2008] Ardekani, S., Hauer, E., and Jamei, B. (2008). Impact traffic models. 115
- [Aron, 1988] Aron, M. (1988). Car following in an urban network : simulation and experiments. Technical report, INRETS Bron. 28
- [Aron et al., 2003] Aron, M., Biecheler, M., and Peytavin, J. (2003). Temps inter-véhiculaires et vitesses : Quels enjeux de sécurité sur les routes de normandie. deuxième étape : vitesses et inter-distances pratiquées, liens avec les débits et les accidents. Technical report, IFSTTAR. 90, 93, 94, 95, 96, 97
- [Aumann, 1989] Aumann, R. (1989). Lectures on game theory. *Westview Press Inc*. 41
- [Bando and Hasebe, 1995] Bando, M. and Hasebe, K. (1995). Dynamical model of traffic and numerical simulation. *Physical Review E*, 51 :1035–1042. 29
- [Bando et al., 1998] Bando, M., Hasebe, K., Nakanishi, K., and Nakayama, N. (1998). Analysis of optimal velocity model with explicit delay. *Physical Review E*, 58 :5429–5435. 24
- [Barceló and Casas, 2002] Barceló, J. and Casas, J. (2002). Dynamic network simulation with aimsun. Technical report, AIMSUN. 28
- [Barth et al., 2000] Barth, M., An, F., Younglove, T., Scora, G., Levine, C., Ross, M., and Wenzel, T. (2000). Development of a comprehensive modal emissions model. Technical report, National cooperative highway research program. 106

- [Barth et al., 1988] Barth, M., Norbeck, J., and Ross, M. (1988). Recent progress on nchrp project 25-11 : The development of a comprehensive modal emissions model. In *8th CRC On-Road Vehicle Emissions Workshop*. 99
- [Barth et al., 2004] Barth, M., Scora, G., and Younglove, T. (2004). Modal emissions model for heavy-duty diesel vehicles. 107
- [Bede and Peter, 2011] Bede, Z. and Peter, T. (2011). The development of large traffic network model. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 39 :3–5. 24
- [Bernet, 2012] Bernet, S. (2012). *Analyse du regard pour le développement d'indicateurs du risque. Application à la formation et l'évaluation des conducteurs*. PhD thesis, Université de Haute Alsace. 33
- [Bester, 1981] Bester, C. (1981). *Fuel Consumption of Highway Traffic*. PhD thesis, University of Pretoria. 76, 112, 114
- [Biggs, 1988] Biggs, D. (1988). Arfcom - models for estimating light to heavy vehicle fuel consumption. Technical report, Australian Road Research Board. 104
- [Biggs and Akcelik, 1986] Biggs, D. and Akcelik, R. (1986). Estimation of car fuel consumption in urban traffic. In *13th ARRB*, volume 13, pages 123–132. 99, 110
- [Bin et al., 2003] Bin, M., Uno, N., and Iida, Y. (2003). A study of lane-changing behavior model at weaving section considering conflict. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5 :2039–2052. 90
- [Boranard, 2012] Boranard, J. (2012). *Développement d'un modèle du conducteur automobile : De la modélisation cognitive à la simulation numérique*. PhD thesis, Université de Beardeau 1. 26
- [Bourrel, 2003] Bourrel, E. (2003). *Modélisation dynamique de l'écoulement du trafic routier : du macroscopique au microscopique*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 57, 58, 171
- [Bowyer, 1984] Bowyer, D. (1984). Procedures for estimating fuel consumption in small urban road networks :saturn validation. Technical report, Australian Road Research Board. 112
- [Brackstone and McDonald, 2000] Brackstone, M. and McDonald, M. (2000). Car-following : a historical review. *Transportation Research Part F*, 2 :181–196. 28
- [Buisson and Lesort, 2010] Buisson, C. and Lesort, J. (2010). *Comprendre le trafic routier. Méthodes et calculs*. Direction générale des infrastructure des transports et de la Mer. 11, 135
- [Burdzik et al., 2012] Burdzik, R., Folega, P., Konieczny, L., Lazarz, B., Stanik, Z., and Warczek, J. (2012). Analysis of material deformation work measures in determination of a vehicle's collision speed. *Archives of materials science and engineering*, 58 :12–21. 81
- [Cappiello et al., 2002] Cappiello, A., Chabini, I., Nam, E., Lué, A., and Abou Zeid, M. (2002). A statistical model of vehicle emissions and fuel consumption. In *The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. 106, 107, 115, 116, 117, 138, 139, 141
- [Carbaugh et al., 1998] Carbaugh, J., Godbole, N., and Sengupta, R. (1998). Safety and capacity analysis of automated and manual highway systems. *Transportation research Part C*, 31 :69–99. 79
- [Carr et al., 2002] Carr, D., Ehrenstein, O. V., Weiland, S., Wagner, C., Wellie, O., Nicolai, T., and Von Mutius, E. (2002). Modelling annual benzene, toluene, no2, and soot concentrations on the basis of road traffic characteristics. *Environmental Research*, 90 :111–118. 103

-
- [Casanova et al., 2009] Casanova, J., Fonseca, N., and Espinosa, F. (2009). Proposal of a dynamic performance index to analyze driving pattern effect on car emissions,. In *17th Transport and air pollution symposium and 3rd Environment and Transport Symposium*. 108
- [Cassidy and May, 1991] Cassidy, M. and May, A. (1991). A proposed analytical technique for the design and analysis of major freeway weaving sections. *Transport Research Board*, 1320 :99–109. 39
- [Ceder and May, 1976] Ceder, A. and May, D. (1976). Further evaluation of single and two regime traffic flow models. *Transportation Research Record*, 567 :1–30. 28
- [Chan, 2006] Chan, C. (2006). Defining safety performance measures of driver-assistance systems for intersection left-turn conflicts. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2006 IEEE*, pages 25–30. 93, 97
- [Chin et al., 1991] Chin, H., Quek, S., and Cheu, R. (1991). Traffic conflicts in expressway merging. *Journal of Transportation Engineering*, 117(6) :633–643. 86, 96
- [Coclite et al., 2004] Coclite, G., Garavello, M., and Piccoli, B. (2004). Traffic flow on a road network. *SIAM journal mathematical Analysis*. 24
- [Craig, 1993] Craig, V. (1993). Analysis of pole barrier test data and impact equations. *Accident reconstruction journal*, 12 :9–10. 82
- [Davis et al., 2005] Davis, N., Lents, J., Osses, M., Nikkila, N., and Barth, M. (2005). Development and application of an international vehicle emissions model. In *Transportation Research Board 84th Annual Meeting, Washington D.C.* 107
- [Del Castillo and Benitez, 1995] Del Castillo, J. and Benitez, F. (1995). On the functional form of the speed-density relationship : General theory. *Transport Research Part B*, 29 :373–389. 61, 62
- [Derbel et al., 2012a] Derbel, O., Mourllion, B., and Basset, M. (2012a). Etude de la sécurité d’un trafic mixte. In *Conférence Internationale Francophone d’Automatique*, pages 841–846. 96
- [Derbel et al., 2012b] Derbel, O., Mourllion, B., and Basset, M. (2012b). Extended safety descriptor measures for relative safety assessment in mixed road traffic. In *15th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems*, pages 752–757. 89, 98
- [Derbel et al., 2012c] Derbel, O., Mourllion, B., and Basset, M. (2012c). Safety assessment of mixed traffic based on accident scenario. In *13-th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems*, pages 383–388. 84
- [Drake et al., 1967] Drake, J., Schofer, J., and May, A. (1967). A statistical analysis of speed-density hypothesis. *Highway Research Record*, 156 :53–87. 59, 62
- [Drew, 1968] Drew, D. (1968). Traffic flow theory and control. Technical report, McGraw-Hill book Company. 10, 57, 60, 61, 62, 74
- [Ecoscore, 2013] Ecoscore (2013). Comment calculer les émissions de CO_2 en fonction de la quantité de carburant consommé ? 116, 139
- [Edie, 1960] Edie, L. (1960). Car following and steady state theory for non-congested traffic. Technical report, New York University. 28
- [Ericsson, 2000] Ericsson, E. (2000). Driving pattern in urban areas - descriptive analysis and initial prediction model. Technical report, Department of Technology and Society, Lund Institute of Technology Lund University. 101

- [Ericsson, 2001] Ericsson, E. (2001). Independent driving pattern factors and their influence on fuel use and exhaust emission factors. *Transportation Research Part D*, 6 :324–345. [103](#), [109](#)
- [Evans, 1991] Evans, L. (1991). *Traffic safety and the driver*. Van nostrand reinhold. [76](#)
- [Fonseca et al., 2010] Fonseca, N., Casanova, J., and Espinosa, F. (2010). Influence of driving style on fuel consumption and emissions in diesel powered passenger car. In *18th International Symposium Transport and Air Pollution*. [12](#), [108](#), [109](#)
- [Freij and Ericsson, 2005] Freij, K. and Ericsson, E. (2005). Influence of street characteristics, driver category and car performance on urban driving patterns. *Transportation Research Part D*, 10 :213–229. [101](#)
- [Galín, 1981] Galín, D. (1981). Speeds on two-lane rural roads—a multiple regression analysis. *Traffic Engineering and Control*, 22 :453–463. [102](#)
- [Ge et al., 2008] Ge, H. X., Cheng, R. J., and Li, Z. P. (2008). Two velocity difference model for a car following theory. *Physica A*, 387(21) :5239–5245. [24](#), [26](#), [27](#), [29](#), [30](#), [31](#)
- [Germann and Isermann, 1995] Germann, S. and Isermann, R. (1995). Nonlinear distance and cruise control for passenger cars. In *Proceedings of the American Control Conference*, 1 :3081–3085. [10](#), [34](#), [35](#)
- [Gipps, 1981] Gipps, P. (1981). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B*, 15 (2) :105–111. [28](#)
- [Gipps, 1986] Gipps, P. (1986). A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B : Methodological*, 20(5) :403 – 414. [39](#), [40](#)
- [Gorkem, 2013] Gorkem, K. (2013). *Modélisation agent de la perception visuelle humaine limitée appliquée à la simulation du comportement des conducteurs en carrefour*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis. [25](#)
- [Greenberg, 1959] Greenberg, H. (1959). A study of traffic capacity. *Operation Research*, 7(1) :79–85. [10](#), [58](#), [59](#), [62](#)
- [Greenshields, 1934] Greenshields, B. (1934). A study of traffic capacity. *Proceedings of the Highway Research Board*, 14 :448–477. [10](#), [57](#), [58](#), [62](#), [74](#)
- [Greenwood, 2003] Greenwood, I. (2003). *A New Approach To Estimate Congestion Impacts For Highway Evaluation - Effects On Fuel Consumption And Vehicle Emissions*. PhD thesis, University of Auckland. [112](#)
- [Greenwood and Bennett, 2003] Greenwood, I. and Bennett, C. (2003). Hdm-4 fuel consumption modelling. Technical report, University of Auckland. [105](#)
- [Guensler et al., 1993] Guensler, R., Washington, S., and Sperling, D. (1993). A weighted disaggregate approach to modeling speed correction factors. Technical report, Institute of Transportation Studies, University of California Davis. [114](#)
- [Hall et al., 1992] Hall, F., Hurdle, V., and Banks, J. (1992). A synthesis on recent work on the nature of speed-flow and flow-occupancy (or density) relationships on freeways. *Transportation Research Record*, 1365 :12–18. [57](#)
- [Hallmark et al., 2002] Hallmark, S., Guensler, R., and I.Fomunung (2002). Characterizing on-road variables that affect passenger vehicle modal operation. *Transportation Research Part D : Transportation and Environment*, 7 :81–98. [102](#)
- [Hayward, 1972] Hayward, J. (1972). Near miss determination through use of a scale of danger. *Highway Research Board*, 6(384) :24–34. [85](#), [96](#)

-
- [Helbing and Tilch, 1998] Helbing, D. and Tilch, B. (1998). Generalized force model of traffic dynamics. *Physical Review E*, 58 :133–138. [24](#), [29](#), [30](#)
- [Herty and Klar, 2003] Herty, M. and Klar, A. (2003). Modeling, simulation and optimization of traffic flow networks. *SIAM Journal science computer*, 25(3) :1066–1087. [24](#)
- [Hesher and Harrison, 1987] Hesher, A. and Harrison (1987). Vehicle operating costs : Evidence from developing countries. *World Bank publications, johns hopkins press*, 6 :388. [110](#), [112](#)
- [Heyes and Ashworth, 1972] Heyes, M. and Ashworth, R. (1972). Further research on car following models. *Transportation Research*, 6 :287–291. [28](#)
- [Hidas, 2002] Hidas, P. (2002). Modelling lane changing and merging in microscopic traffic simulation. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 10 :351 – 371. [39](#)
- [Hidas, 2005] Hidas, P. (2005). Modelling vehicle interactions in microscopic simulation of merging and weaving. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 13(1) :37 – 62. [42](#)
- [Hidas and Wagner, 2005] Hidas, P. and Wagner, P. (2005). Modelling vehicle interactions in microscopic traffic simulation of merging and weaving. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 13 :37–62. [39](#)
- [Hirst and Graham, 1997] Hirst, S. and Graham, R. (1997). The format and presentation of collision warnings. In *Ergonomics and safety of Intelligent Driver Interfaces*. [88](#)
- [Hoefs, 1997] Hoefs, D. (1997). Entwicklung einer messmethode uber den bewegungsablauf des kolonnenverkehrs. In *Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. [28](#)
- [Hogema and Janssen, 1996] Hogema, J. H. and Janssen, W. H. (1996). Effects of intelligent cruise control on driving behaviour : a simulator study. *Transport Research Board*, 20 :105–119. [88](#)
- [Holden and Risebro, 1995] Holden, H. and Risebro, N. H. (1995). Model of traffic flow on a network of unidirectional roads. *SIAM mathematical analysis*, 26(4) :999–1017. [24](#)
- [Hoogendoorn and Bovy, 2001] Hoogendoorn, S. and Bovy, P. (2001). State-of-the-art of vehicular traffic flow modeling. In *Institution of mechanical engineers*. [25](#)
- [Ingremeau and er Smadja, 2011] Ingremeau, M. and er Smadja, A. (2011). Ondes de choc dans les équations hyperboliques. Master’s thesis, École Normale Supérieure. [171](#)
- [Ioannou, 1997] Ioannou, P. (1997). *Automated highway systems*. Springer. [19](#)
- [Ioannou and Chen, 1993] Ioannou, P. A. and Chen, C. C. (1993). Autonomous intelligent cruise control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 42(4) :657 – 672. [34](#)
- [IVE, 2008] IVE (2008). *IVE model user manual version 2.0*. International Vehicle Emission. [107](#)
- [Jiang et al., 2001] Jiang, R., Quigson, and Zhu, Z. (2001). Full velocity difference model for car-following theory. *Physical Review E*, 64 :1–4. [30](#), [31](#)
- [Kaempchen et al., 2009] Kaempchen, N., Schiele, B., and Dietmayer, K. (2009). Situation assessment of an autonomous emergency brake for arbitrary vehicle-to-vehicle collision scenarios. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 10(4) :678–687. [79](#)
- [Kerner, 1998] Kerner, S. (1998). Experimental features of self-organization in traffic flow. *Physical Review E*, 81 :3797–3800. [10](#), [24](#)

- [Kesting, 2008] Kesting, A. (2008). *Microscopic modeling of human and automated driving : towards traffic-adaptive cruise control*. PhD thesis, Faculty of Traffic Sciences. Technische Universität Dresden (Germany). [12](#), [24](#), [25](#), [27](#), [39](#), [42](#), [43](#), [44](#), [55](#), [63](#), [64](#), [65](#), [127](#), [129](#), [137](#), [150](#)
- [Kesting et al., 2008] Kesting, A., Treiber, M., M.Schonhof, and Helbing, D. (2008). Adaptive cruise control design for active congestion avoidance. *Transportation research Part C*, 16 :668–683. [38](#)
- [Kharoufeh and Gautam, 2004] Kharoufeh, J. and Gautam, N. (2004). Deriving link travel-time distribution via stochastic speed processes. *Transportation Science*, 38 (1) :97–106. [57](#)
- [Kiencke and L.Nielsen, 2000] Kiencke, U. and L.Nielsen (2000). *Automotive control systems for engine, driveline and vehicle*. Springer. [108](#)
- [Kilpelainen and Summala, 2004] Kilpelainen, M. and Summala, H. (2004). Effects of weather and weather forecasts on driver behavior. In *Third International Conference on Traffic and Transport Psychology*. [103](#)
- [Kita, 1999] Kita, H. (1999). A merging-giveway interaction model of cars in a merging section : a game theoretic analysis. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 33 :305 – 312. [41](#), [42](#)
- [Kleinbaum, 1994] Kleinbaum, D. (1994). *Logistic regression. A self-learning text*. Spinger. [41](#)
- [Kometani and Sasaki, 1974] Kometani, E. and Sasaki, T. (1974). Dynamic behaviour of traffic with a nonlinear spacing-speed relationship. *Transport Research Board*, 211 :105–119. [26](#), [28](#)
- [Krol, 2009] Krol, L. (2009). *The reconstruction of vehicle trajectories with dynamic macroscopic data*. PhD thesis, University of Twente. [25](#)
- [Kwasnoski, 2003] Kwasnoski, J. (2003). *Crash reconstruction basics for prosecutors : targeting hard-core impaired drivers*. Anheuser-Busch Foundation. [82](#)
- [Leclerc and Becarie, 2012] Leclerc, L. and Becarie, C. (2012). Meso lighthill-whitham and richards model designed for network applications. *Transportation Research Part B : Methodological*, page 15. [25](#)
- [Lee et al., 2011] Lee, M., Park, Y., Jung, K., and Yoo, J. (2011). Estimation of fuel consumption using in-vehicle parameters. *International Journal of u- and e- Service, Science and Technology*, 4 :37–46. [111](#)
- [Liebermann and Rathi, 1997] Liebermann, E. and Rathi, A. (1997). Traffic flow theory. Technical report, Oak Ridge National Laboratory. [119](#)
- [Lighthill and Whitham, 1955] Lighthill, M. and Whitham, J. (1955). On kinematic waves : A theory of traffic flow on long crowded road. *Royal society A*, 229 :317–345. [56](#), [171](#)
- [Lomax, 2013] Lomax, T. (2013). Tti reports u.s. traffic congestion statistics in new mobility report. [19](#)
- [Luu, 2009] Luu, H. (2009). Modélisation de la consommation en carburant d’un véhicule léger à partir de données expérimentale. [10](#), [12](#), [99](#), [106](#), [107](#), [111](#), [113](#), [114](#), [117](#), [138](#)
- [Luu, 2011] Luu, H. (2011). *Développement de méthodes de réduction de la consommation en carburant d’un véhicule dans un contexte de sécurité et de confort : un compromis entre économie et écologie*. PhD thesis, Université d’Évry-Val-d’Éssonne. [12](#), [138](#), [148](#), [172](#)
- [Luu et al., 2010] Luu, H., Nouvelière, L., and Mammar, S. (2010). Dynamic programming for fuel consumption optimization on light vehicle. *6th IFAC Symposium Advances in Automotive Control*, 1 :- . [76](#), [105](#)

-
- [MacNicholas and Michael, 2008] MacNicholas and Michael, J. (2008). A simple and pragmatic representation of traffic flow. In *Symposium on The Fundamental Diagram*. 61, 62
- [Mahnke and Kaupuzs, 1999] Mahnke, R. and Kaupuzs, J. (1999). Stochastic theory of freeway traffic. *Physical Review E*, 59 :117–125. 25
- [Mangeas, 2003] Mangeas, M. (2003). Capacité et sécurité d’une file de véhicules. Technical report, IFSTTAR. 84
- [Manner and Wunsch-Ziegler, 2013] Manner, H. and Wunsch-Ziegler, L. (2013). Analyzing the severity of accidents on the german autobahn. *Accident Analysis & Prevention*, 57(0) :40 – 48. 81
- [Massonnet, 2009] Massonnet, F. (2009). Trafic autoroutier : Analyse, gestion et stabilité au niveau microscopique. Master’s thesis, Ecole Polytechnique de Louvain. 12, 44
- [May and Keller, 1967] May, A. and Keller, J. (1967). Non-integer car-following models. *Highway Research Record*, 199 :19–32. 28
- [Mehmood and Easa, 2009] Mehmood, A. and Easa, S. (2009). Modeling reaction time in car-following behaviour based on human factors. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5 :9–16. 33
- [Minderhoud and Bovy, 2001] Minderhoud, M. and Bovy, P. (2001). Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment. *Accident Analysis and Prevention*, 33 :89–97. 87, 88, 92, 96
- [Molina, 2005] Molina, J. M. (2005). *Commande de l’inter-distance entre deux véhicules*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble. 10, 24, 36, 37
- [Mourllion, 2006] Mourllion, B. (2006). *Extension d’un système de perception embarqué par communication. Application à la diminution du risque routier*. PhD thesis, université Paris-Sud XI Faculté des sciences d’Orsay. 78, 83, 84
- [Newell, 1961] Newell, G. (1961). Nonlinear effects in the dynamics of car following. *Operation Research*, 9 :209. 59, 61, 62
- [Nystrom and Kost, 1992] Nystrom, G. and Kost, G. (1992). Application of the nhtsa crash database to pole impact predictions. In *SAE International Congress*. 82
- [Oduyemi and Davidson, 1998] Oduyemi, K. and Davidson, B. (1998). The impacts of road management on urban air quality. *Science of the Total Environment*, 218 (1) :59–66. 103
- [Ozbay et al., 2008] Ozbay, K., Yang, H., Bartin, B., and Mudigonda, S. (2008). Derivation and validation of new simulation-based surrogate safety measure. *Transportation research record*, 2083 :105–113. 92, 93, 97
- [Ozkan et al., 2012] Ozkan, M., Ozener, O., and Yavasliol, I. (2012). Optimization of fuel consumption of a bus used in city line with regulation of driving characteristics. *World academy of science, engineering and technology*, 61 :1074–1080. 100, 101
- [Page, 2013] Page, J. (2013). *Physique et sécurité routière : Quelques applications des lois fondamentales de la physique à la sécurité routière*. Institut Belge pour la sécurité routière. 82
- [Panwai and Dia, 2005] Panwai, S. and Dia, H. (2005). Comparative evaluation of microscopic car-following behavior. *IEEE Transaction Of Intelligent Transportation Systems*, 6 :314–325. 26

- [Paveri-Fontana, 1975] Paveri-Fontana, S. (1975). On boltzmann-like treatments of traffic flow : A critical review of the basic model and an alternative proposal for dilute traffic analysis. *Transportation Research*, 9 :225–235. [25](#)
- [Payne, 1971] Payne, H. (1971). Models of freeway traffic and control. *Mathematical Models of Public Systems*, 1 :51–61. [56](#)
- [Peter, 2012] Peter, T. (2012). Modeling nonlinear road traffic networks for junction control. *Applied math*, 22 :723–732. [24](#)
- [Peter et al., 2011] Peter, T., Fred, L., Dominique, L., and Mohammed, A. (2011). The statistical analysis of highway crash-injury severities : A review and assessment of methodological alternatives. *Accident Analysis & Prevention*, 43(5) :1666 – 1676. [81](#)
- [Pham et al., 2007] Pham, M., Mouzon, O., Chung, E., and Dumont, A. (2007). Applicability of road safety indicators to assess driving risks under swiss road conditions. In *Swiss Transport Research Conference*. [97](#)
- [Pipes, 1967] Pipes, L. (1967). Car following models and the fundamental diagram of road traffic. *Transport Research*, 1 :21–29. [10](#), [57](#), [60](#), [62](#), [73](#)
- [Post et al., 1985] Post, K., Kent, J., J.Tomlin, and N.Carruthers (1985). Fuel consumption and emissions modeling by power demand and a comparaison with other models. *Transport Research A*, 18 :191–213. [99](#), [109](#), [110](#)
- [Prigogine and Herman, 1971] Prigogine, I. and Herman, R. (1971). *Kinetic theory of vehicular traffic*. Elsevier. [25](#)
- [Rakha and Gao, 2008] Rakha and Gao (2008). Calibration of steady-state car-following models using macroscopic loop detector data. *Transportation Research Board Library*, 21 :7–10. [24](#)
- [Rakha et al., 2000] Rakha, H., Aerde, M., Ahn, K., and Trani, A. (2000). Requirements for evaluating traffic signal control impacts on energy and emissions based on instantaneous speed and acceleration measurements. *Transportation Research Record*, 1738 :55–67. [102](#), [110](#)
- [Raymond et al., 2005] Raymond, J., David, J., and Carol, A. (2005). Developing an inverse time-to-collision crash alert timing approach based on drivers last-second braking and steering judgments. *Accident Analysis and Prevention*, 37 :295–303. [86](#)
- [Richards, 1956] Richards, P. (1956). Shock waves on the highway. *Operation Research*, 4 :24–51. [56](#)
- [Samuel et al., 2002] Samuel, S., Austin, L., and Morrey, D. (2002). Automotive test drive cycles for emission measurement and real-world emission levels-a review. *Journal of Automotive Engineering*, 216 :555–564. [99](#), [101](#)
- [Schrank and Lomax, 2005] Schrank, D. and Lomax, T. (2005). The 2005 urban mobility. Technical report, Texas Transportation Institute, Texas A & M University. [19](#)
- [Schutz, 1984] Schutz, R. (1984). *Statistique algèbre de boole numération appliquées au traitement pratique de l'information*. Alpha.DS Ed. [126](#)
- [Smit, 2006] Smit, R. (2006). *An examination of congestion in road traffic emission models and their application to urban road networks*. PhD thesis, Griffith University, Brisbane, Australia. [103](#)
- [Smit et al., 2008] Smit, R., Brown, A., and Chan, Y. (2008). Do air pollution emissions and fuel consumption models for roadways include the effects of congestion in the roadway traffic flow? *Environmental Modelling and Software*, 23 :1262–1270. [103](#)

-
- [Song et al., 2000] Song, B., Delorme, D., and VanderWerf, J. (2000). Cognitive and hybrid model of human driver. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2000. IV 2000. Proceedings of the IEEE*, pages 1–6. [26](#)
- [Soyster and Wilson, 1973] Soyster, A. and Wilson, G. (1973). A stochastic model of flow versus applied to traffic flow on hills. *Highway Research Record*, 456 :28–39. [57](#)
- [Stevens, 2012] Stevens, T. (2012). Nissan nsc-2015 self-driving car with te and smartphone connectivity. [33](#)
- [Sudret, 2007] Sudret, B. (2007). *Uncertainty propagation and sensitivity analysis in mechanical models. Contributions to structural reliability and stochastic spectral methods*. PhD thesis, Université Blaise Pascal-Ecole Nationale des ponts et chaussées. [126](#)
- [Toledo et al., 2000] Toledo, T., Choudhury, C., and Ben-Akiva, M. (2000). Modeling integrated lane-changing behavior. *Transportation Research Record*, 3 :30 – 38. [40](#)
- [Toledo et al., 2005] Toledo, T., Choudhury, C., and Ben-Akiva, M. (2005). Lane-changing model with explicit target lane choice. *Transportation Research Record*, 19 :157–165. [39](#)
- [Tomasch, 2004] Tomasch, E. (2004). Pan-european co-ordinated accident and injury databases. Technical report, Graz University of Technology, AT. [82](#)
- [Treiber and Helbing, 2002] Treiber, M. and Helbing, D. (2002). Realistische mikrosimulation von straßenverkehr mit einem einfachen modell. In *Symposium Simulationstechnik ASIM*. [37](#)
- [Treiber et al., 2004] Treiber, M., Hennecke, A., and Helbing, D. (2004). Microscopic simulation of congested traffic. *Physical Review E*, 62 :1805–1824. [24](#)
- [Treiber et al., 2006] Treiber, M., Hennecke, A., and Helbing, D. (2006). Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models. *Physica A*, 360 :71–88. [26](#)
- [Treiterer and Myers, 1974] Treiterer, J. and Myers, J. (1974). The hysteresis phenomenon in traffic flow models. In *the Sixth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*. [28](#)
- [Underwood, 1961] Underwood, R. T. (1961). Speed, volume and density relationship : quality and theory of traffic flow. *Yale Bureau of Highway Traffic*, 1 :141–188. [58](#), [62](#)
- [Unger and Sandner, 2011] Unger, T. and Sandner, V. (2011). The adac advanced emergency brake system test - a real life based approach for better primary safety. Technical report, ADAC Technical Centre. [79](#)
- [UTAC, 2013] UTAC (2013). Réduire les émissions de CO_2 des véhicules. [76](#)
- [VanDerHorst, 1990] VanDerHorst, A. (1990). A time-based analysis of road user behavior in normal and critical encounters. Master’s thesis, Delft university of technology. [85](#)
- [Vangi, 2009] Vangi, D. (2009). Energy loss in vehicle to vehicle oblique impact. *International Journal of Impact Engineering*, 36 :512–521. [81](#)
- [Varaiya, 1993] Varaiya, P. (1993). Smart cars on smart roads : Problems of control. In *IEEE Transactions on Automatic Control*, volume 38. [19](#)
- [Venglar et al., 2002] Venglar, S., Fenno, D., Goel, S., and Schrader, P. (2002). Managed lanes-traffic modeling. Technical report, Texas Transportation Institute. [25](#)
- [Vlioger et al., 2000] Vlioger, I., Keukeleere, D., and Kretzschmar, J. (2000). Environmental effects of driving behavior and congestion related to passenger cars. *Atmospheric Environment*, 34 :4649–4655. [101](#), [102](#)

- [Voelcker, 2011] Voelcker, J. (2011). 2014 bmw i3 moves us closer to autonomous driving in cities. [33](#)
- [Vogel, 2003] Vogel, K. (2003). A comparison of headway and time to collision as safety indicators. *Accident Analysis and Prevention*, 35 :427–433. [85](#)
- [Wang et al., 2011] Wang, H., D.Ni, Y.Chen, Q., and Li, J. (2011). Stochastic modeling of the equilibrium speed-density relationship. *Advanced Transportation*, 47 :126–150. [57](#)
- [Wang et al., 2009] Wang, H., Li, J., Chen, Q. Y., and Ni, D. (2009). Speed-density relationship from deterministic to stochastic. In *Annual Meeting at Washington D. C.* [57](#)
- [Wasielewski and Evans, 1985] Wasielewski, P. and Evans, L. (1985). Do drivers of small cars take less risk in every day driving? *Risk Analysis*, 5 :25–32. [102](#)
- [Watanatada et al., 1987] Watanatada, T., Tsunomawa, K., Paterson, W., Bhandari, A., and Harral, C. (1987). The highway design and maintenance standards model (hdm iii). Technical report, Transportation Department. [105](#)
- [Wikipedia, 2013] Wikipedia (2013). Organisation des nations unies. [77](#)
- [Woodman, 2007] Woodman, O. J. (2007). An introduction to inertial navigation. Technical report, Université de Cambridge. [160](#)
- [Yang et al., 2010] Yang, H., Ozbay, K., and Bartin, B. (2010). Application of simulation-based traffic conflict analysis for highway safety evaluation. In *12th World Conference Transport Research Society*. [96](#)
- [Yvkoff, 2011] Yvkoff, L. (2011). Gm : Expect self-driving vehicles by 2020. [33](#)

Annexes

Annexe 1 : Résolution de l'équation de [Lighthill and Whitham, 1955]

Cette partie a été reposée sur les travaux de [Bourel, 2003].
Le modèle de Lighthill-Whitham-Richards est résumé dans l'équation suivante :

$$\frac{\partial D(x, t)}{\partial t} + Q'_e(D(x, t)) \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

avec $Q'_e(D(x, t))$ le diagramme fondamental.

La résolution de cette équation permet d'obtenir des lignes de champs qui correspondent à une densité constante D et dont la pente est égale à la tangente au diagramme fondamental en capacité au point D .

Dans le cas où les lignes de champs de la densité se croisent (densité en aval est supérieure à la densité en amont), il se forme une onde de choc qui relie les états amont et aval au point d'intersection. La vitesse de cette onde est donnée par la formule de

$$u = \frac{Q_{amont} - Q_{aval}}{D_{amont} - D_{aval}} \quad (2)$$

D'après [Bourel, 2003], il est intéressant d'étudier la solution du modèle LWR dans le cas du problème de Riemann. En effet, ceci permet de voir la propagation de l'onde de choc dans des cas simples.

Le problème de Riemann consiste à résoudre le modèle dans le cas de conditions initiales particulières. Ce problème est présenté par [Ingremeau and er Smadja, 2011] sous la forme suivante :

$$\begin{cases} u_t + f(u)_x = 0 & \forall x \in \mathbb{R}, t \leq 0, \\ u(x, 0) = \begin{cases} u^- & \text{si } x \leq 0, \\ u^+ & \text{si } x > 0 \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

Dans cette partie, nous allons pas rentrer dans les détails mathématiques. Ce qui nous intéresse est la solution de l'équation du modèle dans le cas d'un trafic routier. Pour plus de détails mathématiques, le lecteur peut se référer à [Ingremeau and er Smadja, 2011].

Considérant, À $t=0s$, une section de route dans lequel la densité est définie par

$$D(x, 0) = \begin{cases} D_{amont} & \text{si } x \leq 0, \\ D_{aval} & \text{si } x > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \text{si } D_{amont} \leq D_{aval} & \text{Ondes de choc,} \\ \text{si } D_{amont} > D_{aval} & \text{éventail ou onde de détente,} \end{cases} \quad (5)$$

Annexe 2 : Graphes d'appel des fonctions « main » et « StringEvolution »

Annexe 3 : Méthode d'interpolation au sens des moindres carrée non linéaire

Dans le chapitre 1, la fonction Matlab « lsqcurvefit » a été utilisé pour l'interpolation des données macroscopiques issues de la simulation microscopique du modèle IDM. Cette fonction utilise l'algorithme à région de confiance (Trust-region reflective) pour la recherche des coefficients de la fonction candidate à l'approximation des données.

Annexe 4 : Paramètres relatifs aux véhicules d'essais

TABLE 1 – Paramètres du véhicule [Luu, 2011]

Paramètre	valeur	unité
Masse du véhicule	1269	kg
Rayon du pneu	0,297	m
inertie du moteur	0,2630	kg.m ²
Inertie de transmission	0,115	kg.m ²
Inertie de la roue	2,8	kg.m ²
Résistance au roulement	0,020	
Couple maximum	145 (à 3000)	N.m (à tr.min ⁻¹)
Puissance maximale	74	K.w (à tr.min ⁻¹)

TABLE 2 – Rapport de transmission pour chaque position de la boîte vitesse [Luu, 2011]

Rapport de la boîte vitesse	1	2	3	4	5
Rapport de transmission	3,7272	2,0476	1,3929	1,0294	0,8205

Annexe 5 : détails sur le simulateur

Le simulateur de trafic mixte comprend les fichiers suivants :

- « Collision » : contient les fonctions relatives à la gestion des éventuelles collisions. Les démarches nécessaires pour la gestion des collisions sont détaillées plus loin.
- « DataRecording » : contient la fonction qui permet l'enregistrement des données, comme les positions, les vitesses et les accélérations des véhicules, durant toute la simulation. Ces données serviront par la suite pour le post-traitement sous Matlab. Ces données sont enregistrées en binaire.
- « Display » : contient les fonctions qui réalisent la génération de l'interface du simulateur à l'aide de la bibliothèque OpenGL.

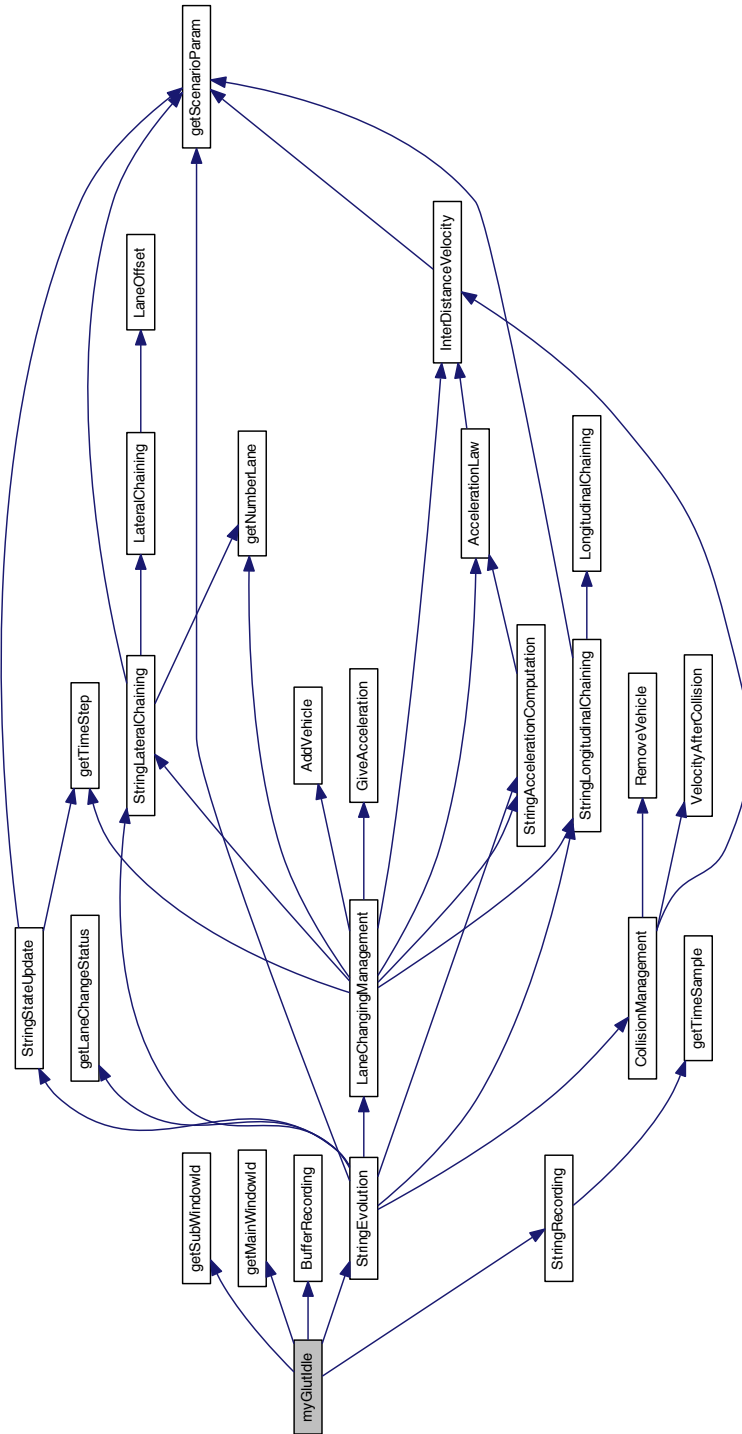


FIGURE 1 – Graphe d’appel de la fonction « main »

- « Scenario » : définit les scénarios développés dans le simulateur comme le mur de brique ou le freeze. Cette fonction fait appel au fichier XML relatif au scénario en question (voir exemple 3.1).
 - « StingEvolution » : contient les lois de commande relatives à chaque type de véhicule utilisé (par exemple : IDM dans le cas du véhicule automatisé et TVDM dans le cas où le véhicule serait régi par l'action du conducteur).
 - « Vehicle » : contient essentiellement les fonctions qui permettent le chaînage latéral et longitudinal. Ce chaînage consiste à chercher, dans le cas du longitudinal, les véhicules prédécesseur et suiveur pour chaque véhicule dans le trafic. Dans le cas du chaînage latéral, pour le cas d'un éventuel changement de voie, une fonction « StringLateralChaining » permet, pour chaque véhicule dans le trafic, la recherche de son nouveau successeur et prédécesseur dans la voie cible.
- Ce fichier contient aussi la fonction « AddVehicle » qui permet de charger une file de véhicule(s) à l'étape de l'initialisation de chaque scénario. La fonction « RemoveVehicle » permet la suppression du véhicule dans le cas d'une collision. Elle est utilisée au niveau de la programmation de la gestion des collisions dans le trafic.
- « VideoRecording » : contient la fonction qui enregistre en vidéo toute la simulation.
 - « Main » : fichier principal du simulateur qui intègre l'ensemble des fonctionnalités.

Listing 3.1 – Exemple de configuration d'un scénario à travers un fichier XML

```

1 <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2 <scenario name="Freeze" model="Scenario_Freeze" recordDescription="false"> <!-- Scenario_Freeze ,
   to add value -->
3
4 <description>Scenario Freeze with PIDM from 0:10:100</description>
5
6 <simulationNumber>
7 100
8 </simulationNumber> <!-- 0 < Integer value -->
9
10 <PercentageIDMMin>
11 0
12 </PercentageIDMMin> <!-- 0 <= Integer value <= PercentageIDMMax -->
13
14 <PercentageIDMMax>
15 100
16 </PercentageIDMMax> <!-- PercentageIDMMin <= Integer value <= 100 -->
17
18 <PercentageIDMDelta>
19 20
20 </PercentageIDMDelta> <!-- PercentageIDMMin <= Integer value <= PercentageIDMMax -->
21
22 <settings load="true"> <!-- load="true" to set values else
   default values -->
23 <Collision>ON</Collision> <!-- ON/OFF value (Collision
   management) -->
24 <LaneChange>ON</LaneChange> <!-- ON/OFF value -->
25 <Duration unit="s">1000</Duration> <!-- Float value -->
26 <InitialVehicleNumber>200</InitialVehicleNumber> <!-- Integer value -->
27 <RoadLength unit="m">8164</RoadLength> <!-- Float value -->
28 <NumberLane>2</NumberLane> <!-- Integer value -->
29 <InitialHeadway>7.3204</InitialHeadway> <!-- Float value -->
30 <PercentageLane2>50.0</PercentageLane2> <!-- Float values -->
31 </settings>
32 <dataFileName>RawData.bin</dataFileName>
33 </scenario>

```

Fonction main

La fonction est évidemment la première fonction exécutée lors du lancement du programme. Le graphe d'appel de la fonction « main » est donné par la figure 1 dans l'annexe. Notons que cette fonction fait appel aux fonctions suivantes :

- « StringInitialisation » : cette fonction est développée pour l'initialisation de la file du véhicule dans chaque voie du trafic.
- « TimeInitialisation » : retourne la structure du temps où on trouve le pas de simulation et le temps initial.
- « DisplayInitialisation » : permet d'afficher l'interface graphique au début de la simulation.
- « GetDisplayParam » : retourne les paramètres de l'interface graphique générée par le simulateur à l'aide de la bibliothèque OpenGL.
- « MyGlutIdle » : cette fonction, appelée quand la tâche d'affichage est oisive, gère l'ensemble de la simulation (gestion de la file de véhicule(s), gestions de l'affichage, gestion des enregistrements).

Évolution des véhicules dans le trafic

La fonction « StringEvolution » (figure 2) gère l'évolution des véhicules dans le trafic. Cette fonction fait appel aux modèles du véhicule automatisé (IDM) qui est défini par l'équation (1.27) dans la page 45, du véhicule régi par l'action du conducteur (TVDM) qui est défini par l'équation (1.8) dans la page 31 ainsi qu'à la loi du changement de voie « MOBIL ». Elle met également à jour le chaînage des véhicules à chaque pas de simulation.

Choix du pas de simulation

Le pas d'échantillonnage est un paramètre très important dans l'étude de la sécurité dans un trafic. Les résultats en termes de nombre de collisions et de la sévérité sont sensible à ce paramètre. En effet, les modèles du conducteur ou du véhicule automatisé sont de déplacement et sont données par l'expression de l'accélération. L'intégration de cette sortie permet d'avoir la vitesse et la position du véhicule par le biais de la méthode d'Euler (voir page 122). Soit $x_1 > 0$ et $x_2 > 0$ les positions du véhicule pour les pas d'échantillonnage T_1 et T_2 . Si $T_1 > T_2$ alors $x_1 > x_2$. Par ailleurs, la détection de la collision entre deux véhicules est fonction de l'interdistance. Par conséquent, à un instant donné et avec un pas d'échantillonnage très grand T_2 , on pourra détecter plus de collisions en comparant avec le cas de T_1 .

La figure 3 présente les positions d'un véhicule (modèle TVDM) avec deux différents pas d'échantillonnage. Cette figure montre qu'avec deux différents pas d'échantillonnage, les positions d'un véhicule pour le même instant sont différentes.

Ce raisonnement est aussi valable pour le calcul de la vitesse du véhicule. Puisque la sévérité du collision dépend des vitesses des deux véhicules, celle-ci se trouve sensible au pas d'échantillonnage.

Dans le cas du scénario « profil de vitesse » sinusoïdale, le pas d'échantillonnage possède une grande importance et dans ce cas on doit prendre en compte du théorème de Shanon.

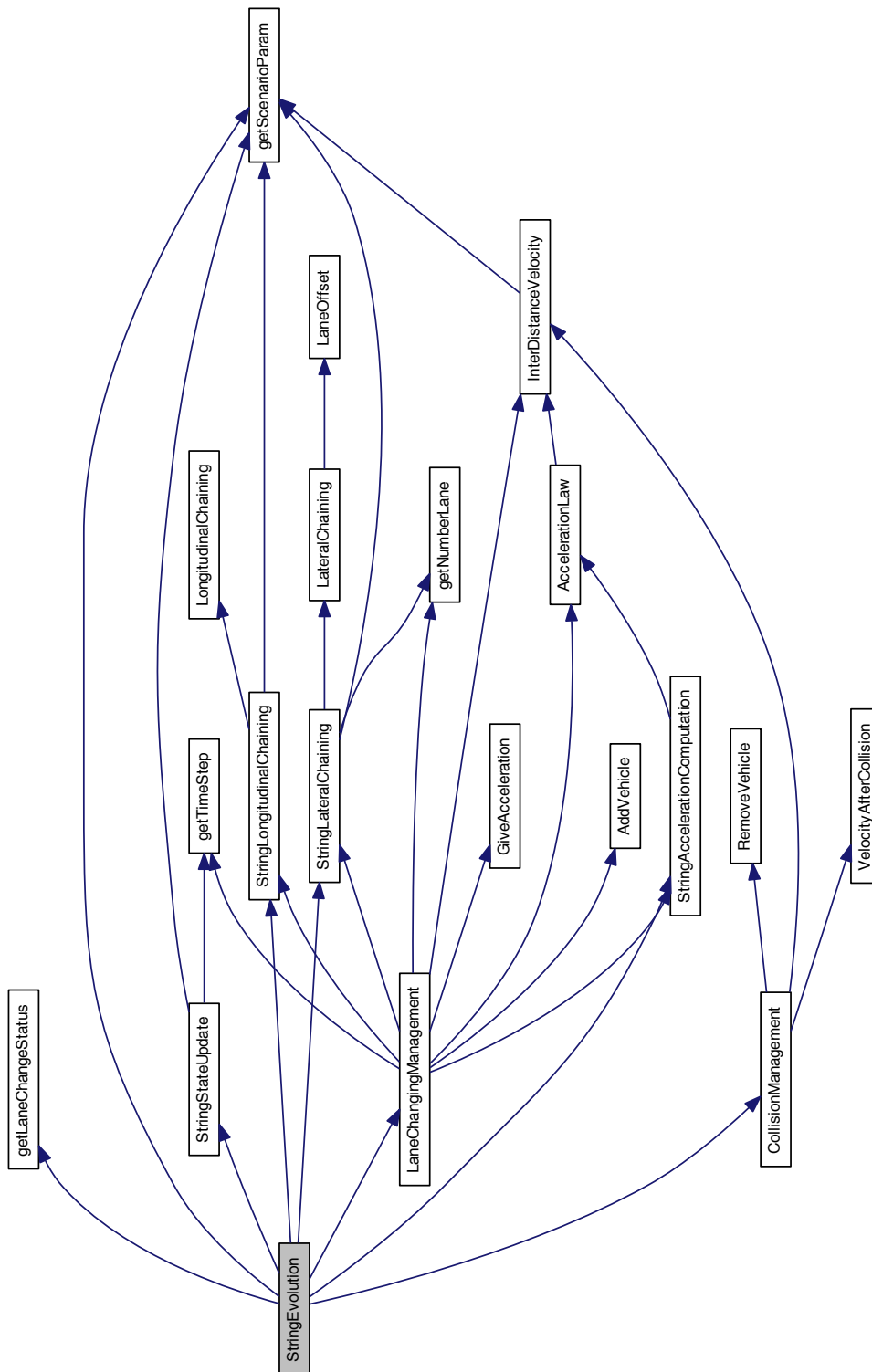


FIGURE 2 – Graphe d'appel de la fonction « StringEvolution »

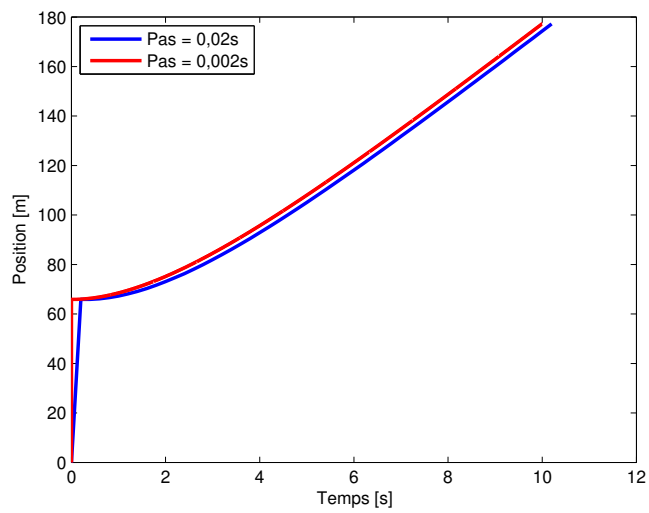


FIGURE 3 – Position d'un véhicule pour deux différents pas de simulation

Résumé

Les travaux présentés dans cette thèse visent à évaluer et quantifier l'impact sur la sécurité du conducteur, de système d'aide pour une conduite automatisée, en fonction de leur taux de pénétration. La modélisation et la simulation sont réalisées à l'échelle du véhicule (dite microscopique) et à partir d'indicateur issus du trafic (échelle macroscopique). Les critères d'évaluation utilisés portent principalement sur la sécurité des passagers ainsi que les aspects de consommation et d'émissions de polluants.

Mots-clés: Modélisation, sécurité, modèle vitesse - densité, systèmes d'aides à la conduite

Abstract

This thesis aims to assess and quantify the driver safety according to the penetration of automated driving in the traffic. Modelling and simulation are performed across the vehicle (called microscopic) and from traffic indicator (called macroscopic). The used criteria are designed to assess the driver safety, fuel consumption and gases emissions.

Keywords: Traffic modeling, driver safety, velocity-density model, Advanced Driver Assistance Systems.

