

**THÈSE DE DOCTORAT DE
L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE**

Spécialité

Informatique

École doctorale Informatique, Télécommunications et Électronique (Paris)

Présentée par

Lancelot SIX

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Sujet de la thèse :

Vers un modèle de comportements de véhicules lourds en utilisant une méthode incrémentale basée sur la vérification et l'hystérésis : le modèle ARCHIPL.

5 novembre 2014

devant le jury composé de :

Mme. Zahia GUESSOUM	Maître de Conférences, UPMC, Paris	Directrice de thèse
M. Flavien BALBO	Professeur, ENS, Saint Etienne	Rapporteur
M. René MANDIAU	Professeur, UVHC, Valencienne	Rapporteur
M. Nadir FARHI	Chargé de recherches, IFSTTAR, Paris	Examinateur
M. Abderraflâa KOUKAM	Professeur, UTBM, Belfort	Examinateur
M. Mikal ZIANE	Maître de conférences, UPMC, Paris	Examinateur
M. Sio-Song IENG	ITPE Chercheur, IFSTTAR, Paris	Encadrant
M. Julien SAUNIER	Maître de Conférences, INSA, Rouen	Encadrant

“Essentially, all models are wrong, but some are useful.”

[Box and Draper, 1987, p. 424]

Remerciements

D'avance, je m'excuse pour toute personne que je vais inévitablement omettre de remercier en rédigeant cette page...

Un grand merci à Julien SAUNIER, Sio-Song IENG et Zahia GUESSOUM. Vous avez su me guider tout au long de ces travaux. Vous avez formé une équipe ayant pu m'apporter différents points de vue et différentes manières d'approcher les problèmes, chacun selon votre personnalité, votre spécialité et votre expérience. Merci à Hocine IMINE d'avoir suivi mes travaux, apportant ta connaissance de la dynamique des véhicules lourds ainsi que différents matériaux bruts que tu as mis à ma disposition. Merci à Stéphane ESPIÉE pour m'avoir guidé dans la découverte d'ARCHISIM, pour les nombreux cafés et tes conseils avisés de motard.

Merci aux équipes du Lip6 et du LEPSIS de m'avoir accueilli durant la réalisation de mes travaux. Merci bien sûr à tous les collègues rencontrés, pour les échanges que nous avons pu avoir. Merci à tous les doctorants (Jyida, Sophie, Véranne, Laurent, Kévin, Karine, Ferhat, Feirouz, Utku, Amine, Cyril, Quentin, Patrick, Kenza, Sabrina et j'en passe) que j'ai côtoyés pour les bons moments passés, ou avec qui j'ai traversé des moments «plus difficiles».

Bien sûr, un immense merci à toute ma famille qui a été fortement mise à contribution pour ces travaux. Merci donc pour le travail acharné de relecture et de corrections (oh combien important), et merci à Joseph d'avoir pris le temps pour m'aider à recueillir des données.

Merci à la société K.S. Transports et à Roland POMMIER d'avoir accepté qu'un véhicule puisse être mis à disposition pour les besoins de cette thèse.

Merci à Thomas FOLEGOT, Dominique CLORENNEC, Robert CHAVANNE et à toute l'équipe de Quiet-Oceans de m'avoir dégagé du temps et poussé pourachever cette thèse en parallèle de mon activité professionnelle.

Merci à Serge pour l'initiation au vimcgolf, jeu aussi intéressant que chronophage.

Merci à Renaud, Doriane, Cyrille, Damien, Aurore pour les «quelques» soirées à refaire le monde, les sorties «bloc» à Fontainebleau et les balades à moto.

Merci à Océane.

Résumé

Les phénomènes de congestion sont dangereux, néfastes pour l'environnement et couteux économiquement. La compréhension de la formation, de l'évolution, du maintien et de l'impact des phénomènes de congestion est un sujet majeur ayant occupé la communauté scientifique depuis la moitié du vingtième siècle. L'approche microscopique, cherchant à reproduire les phénomènes apparaissant au niveau du trafic grâce à la modélisation des comportements individuels des conducteurs, a proposé un grand nombre de modèles de conducteurs. Cependant, alors que la littérature a mis en avant l'impact négatif des véhicules lourds sur l'écoulement, peu se sont intéressés à savoir si les véhicules lourds ont un comportement similaire à celui des véhicules légers. Les principaux modèles considèrent que les comportements sont indifférenciés, et ne prennent en compte qu'un encombrement accru ainsi qu'une dynamique amoindrie. Dans ces travaux, nous proposons de remettre en cause cette hypothèse. Nous proposons une démarche incrémentale, VIM4MAS, au cours de laquelle nous cherchons à identifier les principales différences entre les propriétés du comportement d'un véhicule lourd avec celle d'un véhicule léger. Cette démarche nous permet de construire un modèle de véhicules lourds en se fondant sur un modèle pré-existant de véhicules légers et en n'apportant que les modifications nécessaires. Dans le cadre de cette démarche, nous proposons également une méthode d'analyse des comportements longitudinaux fondée sur l'étude des boucles d'hystéresis. Cette méthode permet de comprendre certaines propriétés des comportements, telles que les capacités d'anticipation, selon une approche boite noire. Le modèle de véhicules lourds produit au cours de ces travaux, ARCHIPL, montre d'une part des comportements de meilleure qualité du point de vue individuel, et d'autre part une cohérence avec la littérature du point de vue des phénomènes émergents.

Abstract

Congestion phenomena are a major issue modern societies have to face. Understanding them, their creation, their evolution and their real impact are major questions addressed by the scientific community since the half of the twentieth century. A large number of simulation models have been developed to reproduce and study the traffic dynamics. Among them, microscopic model are designed to reproduce macroscopic phenomena such as congestion by reproducing individual vehicles' behavior. However, despite the negative influence of large vehicles on the flow, very few models took them into account. Those vehicles are usually dealt with as any other vehicle, except for a few parameters. In this thesis, we reconsider this hypothesis and try to identify how the behavior of large vehicles differs from other vehicles' behavior. We propose the VIM4MAS development methodology to help in this process. This method is used to improve a generic vehicle's behavior model and refine it until it can reproduce the most important aspects of the large vehicles' behaviors. To understand and identify key properties of longitudinal behaviors of vehicles, we have developed an analysis methodology based on the study of hysteresis phenomena. This analysis methodology allows to highlight key properties such as anticipation capabilities of drivers. The outcome of this work is the ARCHIPL model for large vehicles' behaviors. This models shows an improvement of the behaviour quality at the microscopic level, while being consistent with the literature with respect to emergent phenomena.

Sommaire

1	Introduction générale	9
2	La simulation de trafic routier	13
2.1	Introduction	13
2.2	Différentes échelles de simulation	14
2.3	Modèles de simulation microscopique	22
2.4	Prise en compte des véhicules lourds	29
2.5	Conclusion	32
3	Les systèmes à base d'agents	35
3.1	Introduction	35
3.2	L'approche SMA	35
3.3	Les SMA pour le trafic	45
3.4	Conclusion	51
4	Outils et méthodes de travail	53
4.1	Introduction	53
4.2	La plate-forme ARCHISIM	54
4.3	Méthodes de développement	61
4.4	Vers une méthode de développement incrémental : VIM4MAS	70
4.5	Conclusion	75
5	Étude des comportements grâce à l'hystérésis	77
5.1	Introduction	77
5.2	Méthode d'Analyse des comportements par l'hystérésis	78
5.3	Illustration de la méthode d'étude	84
5.4	Hystérésis et émergence	100
5.5	Conclusion	104
6	Le modèle ArchiPL	109
6.1	introduction	109
6.2	La décélération des PL	110
6.3	L'accélération des véhicules lourds	123
6.4	L'architecture finale du modèle ARCHIPL	129

6.5	Étude expérimentale à l'échelle macroscopique	135
6.6	Conclusion	138
7	Conclusion et perspectives	143
7.1	Contributions	143
7.2	Perspectives	145
	Glossaire	151

Table des figures

2.1	Approche macroscopique pour représenter une situation de trafic	14
2.2	Présentation du diagramme fondamental triangulaire.	15
2.3	Approche microscopique pour représenter une situation de trafic routier .	17
2.4	Comparaison des approches microscopiques et macroscopiques	21
2.5	Les deux régimes du modèle de NEWELL	24
3.1	Le phénomène d'émergence	36
3.2	Une relation directe entre les objets du monde et les acteurs modélisés telle que présentée dans [Galán et al., 2009]	37
3.3	Cycle «perception-décision-action»	43
3.4	Découpage de l'environnement entourant le conducteur en zones cohérentes	46
3.5	Perseptoin ego-centrée et adaptée à la tâche courante	47
3.6	Exemples de règles de gestion des interactions proposées par [Saad, 1994], mises en oeuvre par [El Hadouaj, 2004]	49
3.7	Différentes approches pour la gestion des conflits en zone d'intersection .	50
4.1	Un conducteur réel peut piloter un véhicule impliqué dans une simulation ARCHISIM	55
4.2	Architecture d'ARCHISIM autour d'un serveur de vision. Exemple de déploiement sur trois machines reliées par un réseau.	57
4.3	Déroulement simplifié des communications entre le serveur de vision et les agents pour un pas de temps	58
4.4	Processus de conception d'un système multi-agents	65
4.5	Schéma général d'un développement dirigé par les tests. Schéma issu de https://en.wikipedia.org/wiki/File:Test-driven_development.PNG	67
4.6	Le modèle de développement en spirale [Boehm, 1988]	69
4.7	Déroulement général d'une itération de développement dans VIM4MAS .	71
4.8	Déroulement de la phase d'implémentation dans VIM4MAS	74
5.1	Un véhicule doit adapter sa vitesse de déplacement sur l'infrastructure en fonction de 1) la vitesse qu'il souhaite atteindre et 2) l'espace le séparant de son prédecesseur afin de voyager en sécurité.	79

5.2	Figures extraites de la littérature observant l'apparition de boucles d'hystérésis dans le comportement des conducteurs quand il est étudié dans le plan créneau / vitesse.	81
5.3	Étude de l'état du véhicule dans le plan créneau / vitesse	83
5.4	Deux systèmes \mathcal{S}_1 et \mathcal{S}_2 se trouvant dans des états symétriques l'un de l'autre par rapport au point de coordonnées $(\frac{1}{2}v_{\text{desir}}, \frac{1}{2}v_{\text{desir}}\tanh(2))$	86
5.5	Comparaison des équilibres théoriques et simulés des modèles ARCHISIM IDM et OV.	92
5.6	Profil de vitesse du véhicule leader utilisé dans les scénarios d'étude des véhicules OV, IDM et ARCHISIM	94
5.7	Comportement d'un véhicule OV soumis à une contrainte dont la vitesse varie entre 4 et $22m.s^{-1}$	95
5.8	Comportement d'un véhicule IDM	96
5.9	Comportement d'un véhicule ARCHISIM	97
5.10	Découpage du comportement en couches selon la durée des actions concernées. Figure issue de [Michon, 1985].	99
5.11	Évolution de la boucle d'hystérésis dans une population d'agents OV (véhicules n° 1, 2, 6, 10, 14, 18, 22, 26).	105
5.12	Évolution de la boucle d'hystérésis dans un population d'agents IDM.	106
5.13	Évolution de la boucle d'hystérésis dans une population d'agents ARCHISIM (agent n° 1, 2, 6, 10, 14, 18, 22, 26).	107
5.14	Diagramme temps/position montrant la réaction d'un peloton OV, IDM et ARCHISIM subissant une insertion à basse vitesse.	108
6.1	Vues aériennes des sites d'enregistrement des trajectoires utilisées.	111
6.2	Vitesse moyenne des véhicules sur l'I-80 en fonction de la voie de circulation (figure issue du rapport d'analyse du trafic enregistré entre 16h00 et 16h15).	113
6.3	Estimation des états d'équilibres des VL comparés à ceux des PL.	116
6.4	Comparaison de deux comportements de véhicules se suivant lors de l'entrée dans une vague de sur-congestion. Le prédecesseur est un véhicule léger et le suivant est un véhicule lourd.	118
6.5	Comparaison du comportement de décélération proposé par le modèle original à celui proposé par le modèle ARCHIPL	121
6.6	Débits estimés suite à l'insertion à basse vitesse devant un véhicule ARCHIPL.	122
6.7	Accélération d'un véhicule ARCHISIM avec le jeu de paramètres correspondant à un véhicule lourd	124
6.8	Bilan des forces appliquées à un véhicule sur la route.	125
6.9	Comparaison entre le profil d'accélération d'un véhicule ArchiPL et le profil d'accélération mesuré d'un véhicule réel. Le véhicule réel utilisé est un ensemble semi-remorque / tracteur IVECO Stralis, d'une puissance de 440 chevaux. L'ensemble roulant pèse 39 tonnes.	128
6.10	Architecture générale de la gestion du suivi dans le modèle ARCHIPL	130

6.11 États désirables pour un véhicule ARCHIPL avec $v_d = 25m.s^{-1}$ et $\alpha = 0.28$	132
6.12 Apparition d'un attracteur du plan gap / vitesse en cas de contrainte de courte durée	134
6.13 Diagrammes fondamentaux pour différentes concentrations de PL à 2500m	137
6.14 Diagrammes fondamentaux pour différentes concentrations de PL à 1500m	138
6.15 Diagrammes fondamentaux pour différentes concentrations de PL à 1700m	139
6.16 Forme schématique du diagramme fondamental pour différentes concentrations de PL.	140
6.17 Diagramme fondamental multi-classes en fonction de la concentration des PL. Diagramme extrait de [Chanut, 2005]	141

Liste des tableaux

2.1	Paramètres proposés pour le modèle IDM	28
5.1	Résumé des paramètres utilisés pour les modèles ARCHISIM, Intelligent Driver Model (IDM) et Optimal Velocity (OV)	93
5.2	Lien entre les couches du comportement décrites par [Michon, 1985] et les propriétés mises en avant par l'étude des phénomènes d'hystérésis dans les comportements.	100
6.1	Composition du trafic dans les données « <i>Next Generation SIMulation</i> » (NGSIM)	112
6.2	Répartition des différentes catégories de décélération observées chez les véhicules lourds de l'I-80 et de l'US-101.	119
6.3	Extrait des paramètres applicables aux différents types de véhicules dans la plate-forme de simulation ARCHISIM	125
6.4	Variation du débit entrant de véhicules sur l'infrastructure de deux voies simulée	136

Chapitre 1

Introduction générale

Les phénomènes de congestion sont dangereux pour les usagers, néfastes pour l'environnement et couteux. Ils représentent une surconsommation en carburant et donc une sur-émission d'éléments polluants dans l'atmosphère. Ils représentent également énormément de temps perdu aussi bien pour le transport de marchandises que pour le transport de personnes. Pour l'année 2006, une étude estime à 160 millions d'euros le coût social des congestions rien que sur le périphérique parisien [Koning, 2009]. Il est donc primordial de comprendre les processus conduisant à la création de ces congestions ainsi que leurs évolutions pour mieux les prévenir et les résorber. Par exemple, il est reconnu que la présence de véhicules de type poids lourd dans la circulation favorise l'apparition des congestions d'une part, et les rend plus durables d'autre part [Chanut, 2005].

Pour répondre à ces enjeux économiques, sociaux et environnementaux, de nombreux travaux de recherche ont, dès les années 50, essayé de comprendre, d'analyser et de prévoir le trafic routier. Les travaux ont été foisonnantes, permettant l'émergence de nombreux modèles [Brackstone and McDonald, 1999, Hoogendoorn and Bovy, 2001]. L'étude des phénomènes routiers est un sujet d'étude particulièrement abondant dans la mesure où il s'articule autour d'un grand nombre de disciplines académiques apportant chacune une approche originale à la compréhension du problème. Ainsi, concernant l'étude de la formation des congestions sur une section routière, différentes disciplines, *a priori* indépendantes, ont pu apporter des outils complémentaires : la physique des fluides a fourni des outils de modélisation des flux de véhicules [Lighthill and Whitham, 1955, Richards, 1956] ; la psychologie cherche à analyser le comportement des conducteurs individuels dans ces flux de véhicules [Saad, 1994, Espié et al., 1994] ; les techniques d'intelligence artificielle cherchent à reproduire les comportements de conducteurs ainsi que ceux des populations de véhicules qu'ils conduisent [Champion et al., 2003, El Hadouaj, 2004, Ketenci, 2013, Ksontini, 2013]. Les travaux menés à l'IFSTTAR, au sein de l'unité LEPSIS, s'inscrivent pleinement dans cette interdisciplinarité : ils utilisent les connaissances produites par les travaux en psychologie de la conduite afin de proposer et d'enrichir continuellement des modèles de simulation des comportements des conducteurs.

Les modèles proposés par cette démarche d'enrichissement continu, intégrés au sein de la plate-forme de simulation ARCHISIM, permettent aujourd'hui d'arriver à des outils de

compréhensions matures. L'utilisation de systèmes multi-agents comme cadre conceptuel pour concevoir ces outils a permis d'adopter une méthode de travail incrémentale. La modélisation d'un flux de véhicules est atteinte grâce à la modélisation du comportement des véhicules le composant. La modélisation du comportement d'un véhicule est elle-même découpée en plusieurs sous-aspects : la perception de l'environnement et de l'état routier autour du véhicule, la représentation mentale de l'environnement extérieur, l'interaction ou la coopération avec les véhicules avoisinants... Chacun de ces aspects a pu faire l'objet d'études indépendantes, en utilisant les éléments préexistants pour fournir une base de travail.

Cependant, malgré l'aboutissement actuel des modèles ainsi produits, la tâche de conduite est généralement considérée comme indifférenciée quel que soit le type de véhicule conduit. Les véhicules lourds, malgré leur encombrement important et leurs capacités de manœuvrabilité réduite, sont modélisés d'une manière presque indifférenciée par rapport aux véhicules légers. La prise en compte de ce type de véhicules est usuellement limitée à l'utilisation de véhicules plus imposants, aux capacités d'accélérations et de décélérations réduites. Par exemple [Treiber et al., 2000b] propose un jeu de paramètres par catégorie de véhicule influençant l'accélération, la décélération, le temps inter-véhiculaire souhaité... Des réglementations particulières leurs sont éventuellement appliquées, principalement via l'utilisation de limitations de vitesses qui leurs sont propres. Certains modèles incorporent des réglementations de conduites plus subtiles, telle que l'interdiction de circuler sur la voie la plus rapide des autoroutes françaises, mais sans jamais chercher à savoir si la tâche de conduite de tels véhicules est différente de la tâche de conduite d'un véhicule léger, toujours utilisées comme base de simulation.

Il apparaît donc particulièrement important de chercher à savoir si l'approche usuelle selon laquelle un véhicule lourd est modélisé comme un véhicule léger, à l'adaptation de quelques paramètres près, est pertinente ou si au contraire les caractéristiques de ces véhicules imposent à leurs conducteurs des stratégies de conduite particulières. Une identification des différences comportementales entre les conducteurs de véhicules légers et lourds doit donc être effectuée. En complément de l'identification d'éventuelles spécificités, il faut aborder la question de savoir si celles-ci ont un impact significatif sur l'écoulement du trafic. Cette question est directement liée au lien qui peut exister entre comportements individuels et phénomènes émergents à l'échelle du trafic. Une telle réflexion est nécessaire à l'élaboration de modèles de comportements de véhicules lourds utilisables dans le contexte de la simulation de trafic routier. Une spécificité du comportement des véhicules lourds n'est pertinente à prendre en compte dans ces modèles que si elle permet d'améliorer la précision des résultats de simulations obtenus. Cette question est incontournable pour proposer des modèles permettant une analyse, une prédiction et finalement une aide à la décision fiable.

Notre thèse s'intéresse à ces questions. Elle propose dans un premier temps une méthode de développement incrémental, VIM4MAS, destinée à guider le développement d'un modèle d'agents impliqués dans des simulations. Cette méthode suppose l'existence d'un modèle approximatif qui est raffiné par itération afin de proposer un nouveau modèle répondant aux exigences de simulation. Nous proposons ensuite une méthode d'anal-

ysé des conducteurs permettant de différencier les comportements longitudinaux des véhicules lourds de celui des véhicules légers. Enfin, nous proposons le module ARCHIPL, évolution du modèle ARCHISIM, permettant de reproduire les comportements longitudinaux des véhicules lourds.

Le travail est structuré de la manière suivante. Le chapitre 2 présente les grandes familles de modèles de simulation de trafic routier. Une présentation plus approfondie des modèles microscopiques est faite. Nous nous concentrons enfin sur l'analyse de la prise en compte des véhicules lourds dans les modèles de simulation et montrons en quoi leur prise en compte est limitée, allant jusqu'au détournement de paramètres de modèles pour palier à la non adaptation de ces derniers.

Le chapitre 3 présente les concepts liés aux systèmes multi-agents. Il montre en quoi l'approche multi-agents est intrinsèquement adaptée à la simulation microscopique du trafic routier. Il présente l'apport du cadre théorique des systèmes multi-agents aux travaux portant sur la simulation microscopique du trafic. Enfin, les principales contributions du domaine des systèmes multi-agents au domaine de la simulation du trafic routier sont présentées, notamment le modèle ARCHISIM. Ce modèle sera utilisé comme base pour les travaux présentés dans cette thèse.

Le chapitre 4 présente les outils et méthodes de travail élaborés pour cette thèse. La plate-forme supportant le modèle de simulation ARCHISIM est présentée ainsi que les différents outils de modélisation qu'elle met à disposition des utilisateurs. Ce chapitre présente également la méthode VIM4MAS qui guide le travail des chapitres suivants.

Le chapitre 5 présente une méthode d'analyse des comportements de conducteurs basée sur l'étude des phénomènes d'hystérésis. Cette méthode, développée au cours de cette thèse, permet l'étude des comportements longitudinaux des conducteurs par une approche de type «boîte noire». Cette approche permet de développer une méthode utilisable aussi bien dans le cadre d'une analyse expérimentale d'un modèle de simulation que dans le cadre de l'observation de comportements de conducteurs réels. Elle permet principalement de mettre en avant les capacités d'anticipation dans les comportements observés. Cette méthode est validée grâce à une analyse faite sur des modèles de la littérature. Elle est ensuite confrontée à une analyse de type «boîte blanche» de ces modèles. Une attention particulière est portée au lien existant entre les capacités d'anticipation observées chez les conducteurs et l'apparition de phénomènes émergents. Ainsi nous montrons l'importance d'une prise en compte correcte de tels phénomènes dans la réalisation de modèles de simulation exploitables.

Enfin le chapitre 6 présente le modèle de comportement longitudinal de véhicules type poids lourd développé durant cette thèse : le modèle ARCHIPL. La méthode d'analyse présentée dans le chapitre 5 est utilisée pour identifier des particularités dans les comportements de véhicules lourds observables dans le cadre du projet NGSIM. Ces particularités sont utilisées afin d'identifier les faiblesses du modèle ARCHISIM dans la reproduction des comportements de véhicules lourds. Nous présentons ainsi différents enrichissements apportés au modèle de simulation ARCHISIM ayant abouti à l'élaboration du modèle ARCHIPL. Ce chapitre s'attache enfin à étudier le comportement de flux de véhicules comprenant des véhicules simulés avec le modèle ARCHIPL, et à s'assurer de

la cohérence de ces résultats avec ceux déjà présents dans la littérature.

Chapitre 2

Contexte applicatif : la simulation de trafic routier

Sommaire

2.1	Introduction	13
2.2	Différentes échelles de simulation	14
2.2.1	L'approche macroscopique	14
2.2.2	L'approche microscopique	17
2.2.3	Autres approches	19
2.2.4	Synthèse	21
2.3	Modèles de simulation microscopique	22
2.3.1	Le modèle de NEWELL	23
2.3.2	Les modèles dynamiques simples	24
2.3.3	Les modèles comportementaux	25
2.4	Prise en compte des véhicules lourds	29
2.4.1	Capacités intrinsèques	29
2.4.2	Une réglementation spécifique	30
2.4.3	Spécificité de la conduite d'un poids lourds	31
2.4.4	Impact des poids lourds sur leur voisinage	32
2.5	Conclusion	32

2.1 Introduction

La compréhension des phénomènes routiers est un enjeu sociétal majeur. La communauté scientifique s'est donc naturellement intéressée à l'étude du trafic depuis les années 50. La littérature relative à ce sujet est aujourd'hui abondante et regorge de modèles ayant chacun ses caractéristiques et spécificités [Hoogendoorn and Bovy, 2001, Helbing, 2001, Brackstone and McDonald, 1999, Ben-Akiva et al., 2006].

Nous exposons dans un premier temps un panorama général des familles de modèles existants, en présentant les points forts et faibles de chaque approche.

Nous commençons donc par exposer les principes généraux de l'étude et de la simulation du trafic au niveau macroscopique avant de nous concentrer sur l'approche microscopique, branche dans laquelle nos travaux s'inscrivent. Nous présentons un panorama des modèles microscopiques de simulation ordonnés par niveau de complexité. Nous montrons ainsi l'enrichissement continu des comportements individuels décrits pour enfin montrer en quoi le domaine, *a priori* indépendant, de l'intelligence artificielle peut aider à l'amélioration des modèles existants en fournissant différents outils et cadres conceptuels qui peuvent être utilisés pour la modélisation de comportements de conducteurs.

Enfin, nous dressons un panorama des différents travaux relatifs à la simulation des véhicules lourds et comment ils se positionnent dans le reste de la littérature. Nous montrons ainsi en quoi la maturité des modèles de véhicules légers permet maintenant de se poser la question de la spécificité du comportement des véhicules lourds.

2.2 Différentes échelles de simulation

Deux grandes approches existent pour modéliser et simuler le trafic routier. Bien que ne recouvrant pas la totalité des modèles, ces deux approches en contiennent une large majorité [Hoogendoorn and Bovy, 2001, Helbing, 2001]. Il s'agit des modélisations macroscopiques et microscopiques.

2.2.1 L'approche macroscopique

Dans l'approche macroscopique, l'objectif est d'étudier et de modéliser l'évolution spatio-temporelle des grandeurs du trafic qui peuvent être mesurées au niveau du flux de véhicules.

Afin de mieux comprendre les modèles macroscopiques, nous commençons par présenter les principes fondamentaux de l'étude d'un flux de véhicules. Les éléments exposés ici ont vocation à présenter les principes de l'approche macroscopique et à introduire les différentes notions qui seront ensuite réutilisées tout au long de cet exposé. Cette présentation de l'approche macroscopique n'est donc en aucun cas exhaustive. Une présentation plus approfondie est disponible dans [Cohen, 1990] et [Buisson and Lesort, 2010].

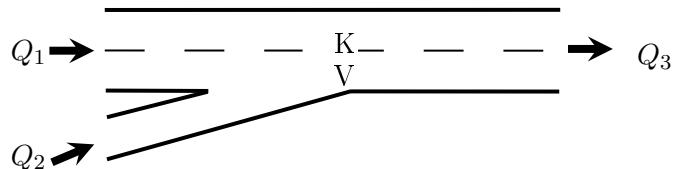


FIGURE 2.1 – Approche macroscopique pour représenter une situation de trafic

Comme illustré sur la figure 2.1, les grandeurs d'intérêt pour l'étude macroscopique des flux de véhicules sont généralement :

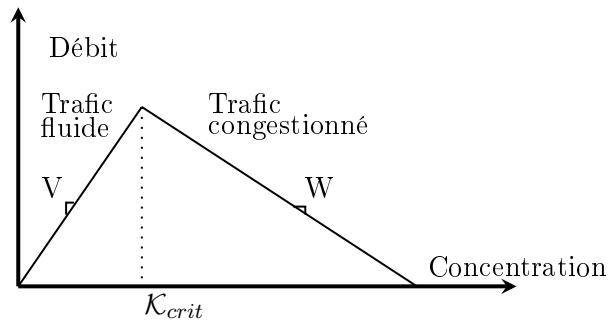
- la densité de véhicules (nombre de véhicules présents sur un espace donné) notée \mathcal{K} ,

- la vitesse moyenne des véhicules généralement notée \mathcal{V} ,
- le débit de véhicules (nombre de véhicules franchissant une section routière en un temps donné) noté \mathcal{Q} .

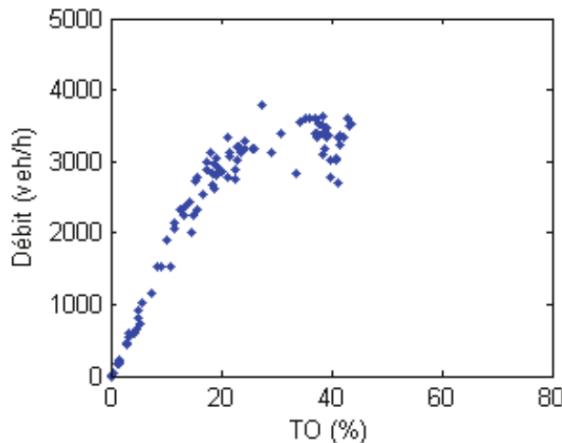
Dans un trafic stable, une relation particulière existe entre ces trois grandeurs :

$$\mathcal{Q} = \mathcal{K} * \mathcal{V} \quad (2.1)$$

Étant donnée cette relation, la connaissance de deux de ces grandeurs permet de déduire la troisième. Ainsi, pour caractériser le flux empruntant une infrastructure, il est généralement fait usage du diagramme fondamental. Ce diagramme est une projection de la relation décrite dans l'équation 2.1 sur un plan.



(a) Diagramme fondamental triangulaire théorique



(b) Diagramme fondamental du trafic enregistré par la boucle électromagnétique située à 140m en amont de l'entrée du tunnel de Fourvière, sur l'autoroute A6 au nord de Lyon. Le diagramme donne le débit en fonction du taux d'occupation de la chaussée. Figure extraite de [Buisson and Lesort, 2010]

FIGURE 2.2 – Présentation du diagramme fondamental triangulaire.

La figure 2.2 illustre une version simplifiée de la projection d'un diagramme fon-

damental sur le plan *concentration / débit* sous la forme d'un diagramme fondamental triangulaire donnant le débit (\mathcal{Q}) en fonction de la concentration (\mathcal{K}). Ce diagramme permet de distinguer deux états possibles du trafic :

le trafic fluide : Pour des concentrations inférieures à \mathcal{K}_{crit} , le débit s'accroît linéairement avec la concentration. Dans cette configuration, l'accroissement du nombre de véhicules empruntant l'infrastructure s'accompagne d'un accroissement du débit. La vitesse adoptée par les véhicules est donnée par la pente V du diagramme fondamental.

le trafic congestionné : Pour des concentrations supérieures à \mathcal{K}_{crit} , le débit décroît au fur et à mesure que la concentration augmente. L'infrastructure est saturée et cela se traduit par une augmentation de la congestion (réduction de la vitesse) quand le nombre de véhicules augmente. La pente W correspond à la vitesse de propagation des ondes de choc (ou ondes de Stop & Go) dans le trafic¹. La pente négative est la conséquence du fait que dans le régime congestionné, le débit est une fonction décroissante de la densité. La pente W correspond à la vitesse de propagation des vagues de sur-congestion le long du trafic [Buisson and Lesort, 2010].

Les modèles de simulation macroscopiques cherchent à représenter l'évolution dans le temps et l'espace de ces grandeurs, et ce en fonction d'un trafic d'entrée. Entre autres points intéressants, ils permettent donc de déterminer le trafic à la sortie d'une infrastructure en fonction du (ou des) trafic(s) en entrée.

Le modèle le plus répandu dans cette approche est le modèle LWR, du nom de ses auteurs LIGHTHILL, WHITHAM[Lighthill and Whitham, 1955] et RICHARDS[Richards, 1956]. La majorité des modèles macroscopiques est issue de l'approche introduite par ce modèle [Helbing, 2001].

Le modèle LWR ainsi que ses dérivés sont fondés sur le principe de conservation des véhicules :

$$\frac{\partial \mathcal{K}(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial \mathcal{Q}(x, t)}{\partial x} = 0 \quad (2.2)$$

Si nous considérons la relation donnée par le diagramme fondamental $\mathcal{Q} = \mathcal{Q}^{eq}(\mathcal{K})$ nous pouvons écrire

$$\frac{\partial \mathcal{K}}{\partial t} + \frac{d\mathcal{Q}^{eq}}{d\mathcal{K}} \frac{\partial \mathcal{K}}{\partial x} = 0 \quad (2.3)$$

et ainsi étudier la propagation des états du trafic dans le temps et l'espace.

Cette approche permet donc d'étudier l'évolution des caractéristiques d'un flux de véhicules (débit, concentration et vitesse) parcourant un réseau routier. Ceci permet entre autre à un exploitant d'étudier la capacité de son réseau à absorber un trafic donné. Cependant, ces modèles supposent que le trafic est à l'équilibre (i.e. tous les véhicules du trafic adoptent la même vitesse), ce qui n'est pas nécessairement le cas et ce notamment

1. Une vague de Stop & Go correspond à une vague de sur-congestion se déplaçant le long du trafic d'aval en amont (dans le sens inverse de l'écoulement du trafic). Elle se caractérise par une zone dans laquelle la vitesse de circulation est localement réduite. Les conducteurs subissent cette onde de choc sous la forme d'un ralentissement ponctuel apparemment inexplicable de la circulation.

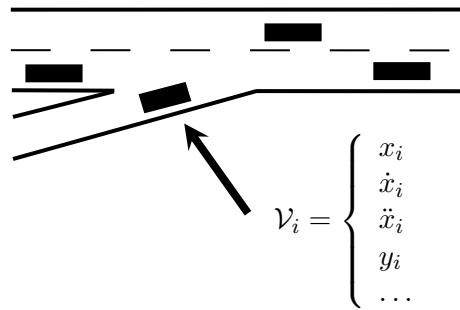


FIGURE 2.3 – Approche microscopique pour représenter une situation de trafic routier. Chaque véhicule est caractérisé par un vecteur d’informations pouvant contenir sa position longitudinale (x_i), sa vitesse (\dot{x}_i), son accélération (\ddot{x}_i), sa position latérale (y_i) . . .

à proximité des zones de conflits². De plus, ces modèles étudient le trafic le long d’une seule route. La question des propagations des congestions d’une route à une autre est difficile et fait l’objet de travaux dédiés.

2.2.2 L’approche microscopique

L’autre niveau usuellement utilisé dans le domaine de l’étude du trafic est le niveau microscopique. À cette échelle, l’étude et la simulation s’intéressent à l’évolution des variables permettant de caractériser chacun des véhicules évoluant sur l’infrastructure.

Les grandeurs généralement prises en compte pour caractériser chacun des véhicules sont leurs positions, leurs vitesses et éventuellement leurs accélérations comme l’illustre la figure 2.3. Les positions sont généralement décrites selon deux composantes :

- le positionnement longitudinal. Il s’agit de l’avancement du véhicule le long de la route. Il est usuellement caractérisé par la distance x séparant le véhicule du début de la route. Le début d’une route correspond à l’une de ses extrémités généralement choisie de manière à ce qu’un véhicule se déplace sur la route en allant du début de la route vers sa fin. Ainsi, $x(t)$ est une fonction croissante. Il est également courant de désigner cette notion comme un point kilométrique (pk) analogie aux bornes kilométriques utilisées le long des routes.
- le positionnement latéral sur la chaussée. Dans les cas les plus simples, il peut s’agir du numéro de la voie empruntée par le véhicule, ou dans des cas plus précis de la mesure de l’écart du véhicule par rapport au bord de la route.

Les modèles de simulation opérant à ce niveau cherchent donc, pour chaque véhicule, à déterminer l’évolution de la position longitudinale et latérale de chaque véhicule au cours du temps. Étant donné que le positionnement des véhicules possède deux composantes, il

2. Nous appelons dans ce manuscrit zone de conflit une zone dans laquelle différents véhicules peuvent entrer en conflit dans le partage de l’espace routier. Une zone d’insertion correspond à cette description dans le sens où dans ces endroits particuliers, les véhicules déjà présents sur l’infrastructure et ceux désirant y entrer doivent se partager l’espace routier. Les vitesses en ces points peuvent se montrer très hétérogènes et l’équilibre du flux de véhicules s’en trouve perturbé.

est d'usage d'utiliser conjointement deux modèles d'ordre microscopique pour déterminer le déplacement d'un véhicule :

Un modèle de suivi servant à déterminer l'évolution de la composante longitudinale de la position des véhicules. Ces modèles sont souvent exprimés par des systèmes non linéaires donnant l'accélération d'un véhicule à un instant donné (notée $\ddot{x}_i(t)$, la seconde dérivée de la position x_i par rapport au temps t du véhicule i) en fonction de la situation dans laquelle se trouve le véhicule :

$$\ddot{x}_i(t) = D(\text{Env}_i) \quad (2.4)$$

L'équation 2.4 illustre la forme générale que prennent les modèles de suivi en exprimant la décision (D) du couple véhicule/conducteur i (généralement exprimée sous la forme de l'accélération adoptée par le véhicule \ddot{x}_i) en fonction de l'état de son environnement (Env_i).

Dans les cas les plus simples, la situation du véhicule est caractérisée par la distance le séparant de son prédecesseur. Cette distance est notée $\Delta x(t) = x_{i+1}(t) - x_i(t)$ où x_{i+1} est la position longitudinale du véhicule précédent le véhicule considéré et x_i la position longitudinale du véhicule simulé.

Un modèle de changement de voie servant à déterminer la stratégie de positionnement latéral du véhicule. Ce problème est généralement discrétisé et se limite à déterminer la voie de circulation adoptée par un véhicule dans une situation où il circule sur une infrastructure disposant de plusieurs voies.

Le processus de changement de voie est lui-même fréquemment subdivisé en deux sous processus distincts : 1) la prise de décision de changer de voie et 2) la recherche d'un créneau permettant ce changement de voie. Dans la première phase (décision), le conducteur décèle un gain à changer de voie et dans la seconde, il met en œuvre cette volonté de changer de voie et sélectionne le moment le plus propice pour le faire.

La plupart du temps, et tout particulièrement lorsque le positionnement latéral du véhicule se limite au numéro de la voie empruntée, l'action de changement de voie est instantané (ce qui suppose une accélération latérale infinie).

Contrairement aux modèles macroscopiques, les modèles microscopiques permettent de simuler des phénomènes très localisés dans le trafic. Ils ne font pas de supposition quant à l'état d'équilibre du trafic et ne dépendent donc pas de l'estimation du diagramme fondamental.

Cependant, alors que les modèles macroscopiques ne nécessitent que peu de paramètres (estimation du diagramme fondamental), les modèles microscopiques nécessitent un travail de calibration plus important. En effet, avec ces modèles, chaque véhicule dispose d'un jeu de paramètres propres qu'il faut déterminer. Cette limitation est usuellement résolue de deux manières :

- soit en disposant d'un jeu de paramètres uniformes commun à l'ensemble des véhicules,

- soit en utilisant une loi de probabilité guidant la génération de chacun des paramètres individuels. Par exemple il est possible de considérer que sur l'ensemble des vitesses désirées — vitesse à laquelle un véhicule souhaite évoluer sur l'infrastructure — des véhicules empruntant une infrastructure suivent une loi de probabilité gaussienne de moyenne V_{moy} avec un écart type de E . Le problème se résume donc dans ce cas à estimer la loi de probabilité à utiliser ainsi que ses paramètres plutôt que les paramètres individuels, ce qui restreint l'espace de recherche durant la phase de calibration.

L'étude des modèles microscopiques se concentre essentiellement sur l'étude des phénomènes émergents résultant des interactions entre les différents véhicules se partageant l'espace routier. L'une des propriétés fréquemment recherchée est donc de savoir si les modèles étudiés sont en mesure de reproduire les phénomènes de Stop & Go en plus de vérifier s'ils permettent de générer des valeurs cohérentes des propriétés du trafic (vitesse, concentration et débit).

Ces modèles permettent ainsi d'étudier en détail les phénomènes se produisant dans les zones de conflits de l'infrastructure, ce qui n'est pas possible avec les modèles macroscopiques. Par exemple, les modèles microscopiques sont tout particulièrement adaptés à l'étude de zones d'insertion et d'intersection.

Enfin, du fait du nombre très important d'entités dont il faut simuler le déplacement, les simulations microscopiques ne sont généralement pas utilisées pour l'étude de grands réseaux.

2.2.3 Autres approches

Bien que les approches macroscopiques et microscopiques soient de loin les plus utilisées, d'autres propositions ont été faites dans la littérature.

2.2.3.1 Les approches mésoscopiques

Différentes contributions scientifiques ont proposé des modèles mésoscopiques, d'un niveau intermédiaire entre l'échelle microscopique et l'échelle macroscopique comme présenté dans [Hoogendoorn and Bovy, 2001].

Certains de ces modèles d'ordre intermédiaire adoptent une modélisation s'approchant du macroscopique mais distinguent les différentes voies d'une infrastructure routière [Hoogendoorn, 2009]. La granularité de la simulation n'est donc plus l'infrastructure mais la voie de circulation, positionnant donc le modèle entre le macroscopique et le microscopique. Cela permet entre autre d'envisager la question de la répartition du trafic selon les voies de circulation qui n'est pas uniforme comme le souligne [Duret, 2010].

D'autres simulent l'évolution de groupes d'individus cohérents tels que des pelotons de véhicules. L'objectif de ce type de modélisation est de profiter des forces de chaque classe de modèles. La simulation de groupe permet de simuler aisément un grand nombre d'individus tout en gardant une certaine richesse des comportements décrits.

2.2.3.2 L'approche multi-niveau

L'approche mixte, ou «multi-niveau», bien que n'étant pas une classe de modèles à part entière, consiste à utiliser conjointement des modèles microscopiques et macroscopiques au sein du même environnement de simulation [Treuil et al., 2008].

Dans cette approche, le trafic parcourant la majorité du réseau est modélisé à l'aide de modèles macroscopiques. Des modèles microscopiques sont utilisés pour simuler des zones d'intérêts et de difficultés telles que des intersections. Ainsi les modèles microscopiques et macroscopiques sont inter-connectés de telle sorte que l'un fournit un trafic d'entrée à l'autre et *vice-versa*. Cependant l'interfaçage entre les différents modèles (et donc les différentes échelles) est un problème complexe.

2.2.3.3 Les approches à base d'automates cellulaires

Une approche singulière utilise des automates cellulaires, comme [Nagel et al., 1992] par exemple. Dans ces automates, une cellule correspond à une portion de la route, celle-ci étant occupé ou non par un (ou des) véhicule(s). Quand une cellule de l'automate a pour valeur 0, cela signifie qu'aucun véhicule n'est sur la cellule, et toute autre valeur correspond à la vitesse du (ou des) véhicule(s) présent(s) sur la portion.

Ce modèle étudie l'évolution de l'état des cellules au fil du temps. Usuellement, lors de l'usage de tels modèles, la taille des cellules modélisées est de l'ordre de la taille d'un véhicule. Dans ce cas, il est en général considéré que le modèle est d'ordre microscopique. Cependant, nous présentons cette approche de modélisation en marge des modèles microscopiques pour des raisons de fluidité du discours. Ces modèles à base d'automates n'ont pas directement vocation à reproduire les processus de prise de décisions des humains, classe de modèles vers laquelle notre étude se concentre.

2.2.3.4 L'approche nanoscopique

Enfin, des modèles dit «nanoscopiques» rejoignent la littérature du trafic avec par exemple le modèle COSMODRIVE [Tattegrain-Veste et al., 1996, Bornard, 2012]. Ils s'intéressent à des phénomènes d'une granularité inférieure à celle de l'évolution d'un véhicule. Généralement, ces modèles s'attachent à reproduire le processus cognitif des conducteurs en modélisant les différentes mémoires présentes chez les conducteurs (mémoire immédiate, mémoire de travail...), l'interaction entre ces mémoires, la prise d'information dans l'environnement...

Cette approche nanoscopique dispose de deux atouts : 1) elle permet une étude et une mise en oeuvre de modèles cognitifs et 2) elle permet d'alimenter les travaux microscopiques car en reproduisant les processus de prise de décision des conducteurs elle permet de reproduire le comportement sur l'infrastructure de leurs véhicules.

Cette approche relève également de la modélisation de l'interaction entre le conducteur et le véhicule. Ceci comprend principalement la modélisation des commandes des véhicules et de leurs effets. Cependant, l'intérêt est porté sur la reproduction des processus cognitifs et non sur l'*opérationnalisation*.

Ainsi, si la finalité de tels modèles est de reproduire le déplacement des véhicules via l'action des conducteurs, il peut être pertinent de considérer que ces modèles entrent dans la catégorie des modèles microscopiques.

2.2.4 Synthèse

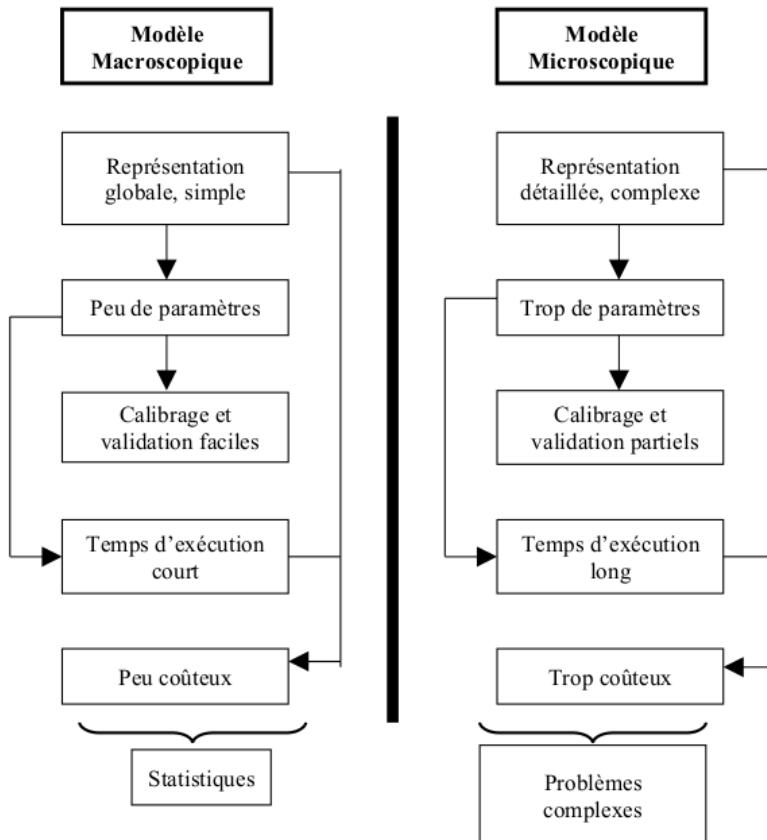


FIGURE 2.4 – Comparaison des approches microscopiques et macroscopiques par [El Hadouaj, 2004]

Chacune des approches discutées précédemment dispose d'avantages et d'inconvénients. La figure 2.4, extraite de [El Hadouaj, 2004], résume la comparaison des approches microscopiques et macroscopiques.

La simulation macroscopique se montre adaptée à la simulation de réseaux importants, car elle permet pour un moindre coût opérationnel d'obtenir des résultats utilisables par des exploitants d'infrastructures.

Les modèles microscopiques, eux, se montrent plus coûteux sur différents points : ils nécessitent une description du réseau et de sa géométrie plus précise, des données d'entrée considérables, demandent un processus de calibration conséquent et requièrent

un temps de calcul important. Ils montrent donc leurs limites pour la simulation de réseaux étendus et sur lesquels circule un nombre très important d'entités. Malgré ces limitations, les modèles microscopiques offrent des possibilités non atteignables avec les modèles macroscopiques, surtout quand il s'agit d'étudier et comprendre des phénomènes localisés. Ainsi, ils se montrent particulièrement adaptés à l'étude des points de difficultés et de conflits sur les réseaux tels que les intersections ou les insertions.

De plus, les simulations microscopiques sont fondées sur le principe d'émergence, et permettent donc de faire apparaître des situations complexes, et non anticipées par le modélisateur, au niveau du trafic généré. Cet aspect est la force principale de ce type d'outils et une raison importante pour laquelle les modèles microscopiques occupent une place significative dans la littérature.

Les modèles microscopiques sont ainsi, par nature, plus adaptés à la réalisation de simulations explicatives et prospectives tandis que les modèles macroscopiques sont adaptés pour des simulations à visées reproductive et prédictives.

Les modèles mesoscopiques et les modèles multi-niveaux (faisant intervenir des modèles macroscopiques sur les sections ne nécessitant pas un haut niveau de détail et des modèles microscopiques aux points difficiles) cherchent à tirer le meilleur profit des deux approches. Ils permettent de conjuguer la simulation précise des modèles microscopiques tout en offrant de bonnes perspectives de passage à l'échelle, mais la modélisation des interfaces macroscopiques/microscopiques est difficile.

La présente étude se focalise tout particulièrement sur l'étude et l'élaboration de modèles individuels de comportements, donc des modèles microscopiques. Nous présentons donc ici plus en détail cette catégorie ainsi que les principaux modèles issus de la littérature la composant.

2.3 La simulation microscopique des comportements longitudinaux

La simulation microscopique trouve une place grandissante dans la littérature relative à l'étude et à la simulation du trafic routier [Brackstone and McDonald, 1999]. Ceci est notamment dû à l'évolution de l'informatique offrant la puissance de calcul nécessaire à l'exécution de simulations impliquant un grand nombre d'entités. Nous nous concentrerons dans un premier temps sur l'étude des modèles microscopiques de suivi, sans prendre en compte les spécificités des véhicules poids lourds.

Cet exposé présente différents modèles de suivi (ou parfois appelés modèles de «*car-following*» issus de la littérature de trafic. Ces modèles sont utilisés pour déterminer quelle est la position longitudinale des véhicules sur la chaussée au cours du temps.

Nous les présentons par ordre croissant de complexité des comportements décrits. Nous observerons que, de manière conjointe à l'enrichissement des comportements, les techniques de modélisation utilisées évoluent.

2.3.1 Le modèle de NEWELL

Le modèle de NEWELL [Newell, 1993] est un modèle destiné à offrir un lien simple entre les comportements microscopiques et leurs implications au niveau macroscopique. Il décrit des comportements longitudinaux dont les paramètres sont fortement liés à ceux du diagramme fondamental présenté en partie 2.2.1. Ce modèle simple permet donc, sous la condition d'étudier une population homogène, de générer un trafic reproduisant les propriétés macroscopiques décrites par le diagramme fondamental.

Pour ce modèle, un véhicule peut évoluer sur une infrastructure selon deux régimes distincts :

Le régime libre. Dans cette situation, le véhicule n'est pas contraint par d'autres véhicules dans son comportement et peut donc se mouvoir librement. La vitesse de ce véhicule est sa vitesse désirée (notée v_f^i , i désignant le véhicule). Dans un diagramme temps position, la trajectoire du véhicule est une ligne droite de pente v_f^i . Dans le cas de l'étude de populations de véhicules homogènes, l'ensemble des véhicules a la même vitesse désirée, généralement égale à la vitesse maximale autorisée sur l'infrastructure modélisée. Pour l'étude d'une population diversifiée, la vitesse désirée est propre à chaque véhicule.

Le régime constraint. Dans cette situation, le véhicule ne peut pas circuler à sa vitesse désirée du fait de la présence d'un véhicule devant lui. Il maintient alors un espace inter-véhiculaire entre lui et son prédecesseur, lequel circule à une vitesse v , donnée par $s = d + v \cdot \tau^i$ avec $\tau^i = \frac{d^i}{\omega}$. Le modèle accepte deux paramètres : d^i qui est la distance inter-véhiculaire entre deux véhicules à l'arrêt et ω l'opposé de la vitesse de propagation des ondes dans le trafic. En régime constraint, un véhicule adoptera donc la même trajectoire que son prédecesseur, mais avec un décalage dans le temps et un décalage dans l'espace.

Les paramètres du modèle, v_f et ω , sont directement liés aux paramètres du diagramme fondamental du trafic. v_f est la vitesse maximale sur l'infrastructure, elle est généralement égale à la vitesse désirée de chacun des véhicules. ω , l'opposé de la vitesse de propagation des ondes de choc, est l'un des paramètres du diagramme fondamental triangulaire.

La figure 2.5 montre une représentation graphique du modèle de NEWELL sous la forme d'un diagramme (x, t) montrant la trajectoire de deux véhicules, l'un forçant l'autre à entrer en régime constraint. Elle montre que quand le véhicule est constraint, il adopte le même comportement que son prédecesseur avec un décalage dans le temps et l'espace donné par le vecteur ω .

Ce modèle permet d'étudier des comportements microscopiques simples tout en gardant un lien très fort avec les propriétés macroscopiques du trafic.

Il est important de noter que dans ce modèle, il est implicitement accepté qu'un véhicule puisse adopter des accélérations infinies. Ainsi, en passant du régime libre au régime constraint (et *vice-versa*), la vitesse du véhicule est modifiée instantanément, ce qui suppose une accélération infinie. Ce modèle trouve donc ses faiblesses dans les phases de transition où la dynamique réelle du véhicule prend de l'importance.

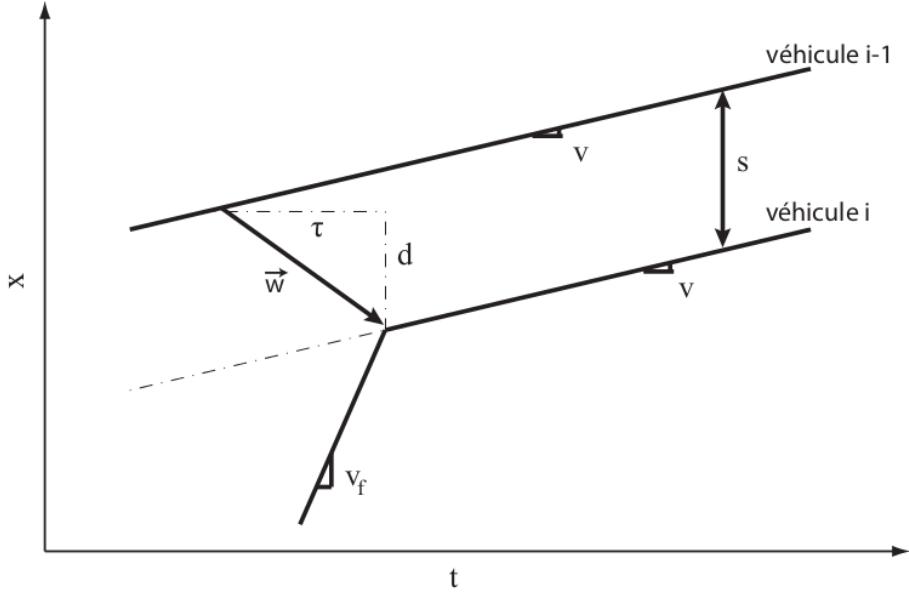


FIGURE 2.5 – Les deux régimes du modèle de NEWELL. En régime libre, le véhicule i circule à la vitesse v_f , quand il est contraint par le véhicule $i-1$, le véhicule i adopte la vitesse v de son prédécesseur et adopte un gap $s = d + v \cdot \tau$. Figure extraite de [Duret, 2010].

Ce type de limitation existe également dans les modèles macroscopiques comme le souligne [Papageorgiou, 1998] et renforce la proximité existante avec ce modèle.

2.3.2 Les modèles dynamiques simples

Après l'approche de NEWELL, qui s'intéresse à la trajectoire d'un véhicule, nous nous concentrerons sur des modèles reproduisant l'action des véhicules, c'est à dire leurs changements de vitesses. Ces accélérations peuvent ensuite être intégrées afin de déterminer la vitesse puis la position des véhicules au fil du temps.

2.3.2.1 Le modèle de GAZIS et ses dérivés

Les premiers modèles de suivi remontent aux années 1950-60. L'une des premières familles de modèles de suivi est issue des modèles de GAZIS, HERMAN et ROTHERY en 1961 [Gazis et al., 1961]. La forme générale du modèle et de ses dérivés est la suivante :

$$a_n(t + \tau) = l_n \frac{(\Delta v_n(t))^k}{(\Delta x(t))^m}$$

Dans ce modèle, $a_n(t + \tau)$ représente l'accélération adoptée par le véhicule numéro n à l'instant $t + \tau$, $\Delta x_n(t) = x_{n-1}(t) - x_n(t)$ l'espace libre entre le véhicule n et son prédécesseur (le véhicule $n-1$) également appelé gap, $\Delta v_n(t) = v_{n-1}(t) - v_n(t)$ la différence

de vitesse entre le véhicule suiveur et son prédecesseur et l_n , k et m des paramètres du modèle à déterminer.

Cette méthode de modélisation part de l'intuition que le gap et la différence de vitesse entre les deux véhicules influent sur le comportement du suiveur. Elle se fonde sur une calibration pour savoir quelle proportion permet de reproduire le mieux un flux de véhicules. Bien que donnant de bons résultats, ce type de modèle a été critiqué du fait de la difficulté de paramétrisation. En effet, les différents paramètres l_n , k et m ne se rapportent à aucune grandeur physique observable et leur identification ne peut donc être obtenue que par des méthodes de calibration relativement lourdes. L'estimation de ces paramètres a d'ailleurs été l'objet de nombreuses productions scientifiques comme le montre [Brackstone and McDonald, 1999]. De plus, le calcul de l'accélération au temps t requiert une connaissance du passé du véhicule, ce qui s'est montré (à l'époque) un facteur limitant.

À partir de ce point, nous identifions deux courants qui se distinguent. D'une part une branche souvent qualifiée de « mathématique » qui propose des modèles relativement simples et les étudie en profondeur à l'aide d'outils d'analyse mathématique ; et d'autre part la branche que nous qualifierons de «nanoscopique» ou «comportementale» qui cherche à reproduire le processus de décision menant à un comportement. Nous présentons maintenant deux modèles, chacun appartenant à l'une des familles sus-citée.

2.3.2.2 Le modèle «Optimal Velocity» (OV)

L'un des modèles les plus représentatifs de la branche dite mathématique est le modèle OV [Bando et al., 1994]. Ce modèle simple propose de définir une fonction donnant, pour un gap donné, la meilleure vitesse à adopter pour le conducteur. Toute déviation de cet état optimal entraîne une accélération proportionnelle à la différence avec la vitesse courante. Ce modèle s'exprime de la façon suivante :

$$\ddot{x}_n = a_n (OV(\Delta x_n) - \dot{x}_n) \quad (2.5)$$

où x_n est la position du véhicule n ; \dot{x}_n la dérivée de la position par rapport au temps ; \ddot{x}_n l'accélération du véhicule ; Δx_n le gap disponible devant le véhicule et a un paramètre du modèle.

Les auteurs proposent la fonction de vitesse optimale suivante :

$$OV(\Delta x) = \tanh(\Delta x - 2) - \tanh(2) \quad (2.6)$$

La relative simplicité de l'expression du modèle permet aux auteurs de conduire une analyse poussée du comportement décrit notamment via une analyse de stabilité linéaire. Il leur est ainsi possible de déterminer analytiquement quelles perturbations engendrent une congestion dans une population, et quelles perturbations sont absorbées.

2.3.3 Les modèles comportementaux

À l'opposé de cette approche analytique, et en réaction aux limites des modèles dits «mathématiques» (notamment celui de GAZIS et ses dérivés), GIPPS a proposé un

modèle plus intuitif ne faisant intervenir que des grandeurs ayant une réalité physique [Gipps, 1981].

Ce modèle essaie de reproduire un comportement de conducteur en se fondant sur une décision similaire à celle d'un conducteur réel. L'objectif annoncé par l'auteur est donc de produire un modèle ne prenant en entrée que des éléments perceptibles et compréhensibles par un conducteur. Plutôt que de faire intervenir des paramètres dénués de sémantique, il utilise des grandeurs qu'il considère comme entrant en compte dans le processus de décision du conducteur telles que les capacités maximales d'accélération et de décélération du véhicule ou la vitesse désirée par le conducteur. Il a donc en ce sens ouvert la branche des modèles cherchant à reproduire un processus de décision menant à un comportement plutôt que le comportement lui-même.

Notons d'ores et déjà que la complexité introduite dans l'expression du modèle rend la conduite d'études analytiques impossible. Ce modèle est donc étudié expérimentalement, en s'intéressant principalement aux phénomènes macroscopiques émergents de l'interaction des différents conducteurs mis en situation.

2.3.3.1 Le modèle de GIPPS

Le modèle de suivi de GIPPS [Gipps, 1981] est l'un des premiers à s'éloigner de la branche «mathématique» dans la perspective de produire un modèle plus simplement compréhensible puisque fondé sur approche explicative. Il cherche donc à produire un modèle n'utilisant que des grandeurs perceptibles par les conducteurs, telles que la distance au prédécesseur, vitesse courante, vitesse du prédécesseur par exemple. En plus de faire apparaître des termes interprétables par un expert, le grand avantage qu'offre cette approche est que la calibration devient plus aisée. Plutôt que d'approcher des paramètres via des techniques d'optimisation qui sont très coûteuses en temps de calcul, il est possible d'utiliser des valeurs mesurées ou estimées. Bien sur, si les données mesurées sont une source fiable d'informations, les valeurs estimées, elles, font intervenir les *a priori* du modélisateur, que ce soit dans le choix des variables retenues autant que dans l'estimation de leur valeurs.

Le modèle propose de déterminer la vitesse d'un véhicule sachant qu'il cherche à atteindre une vitesse désirée V_n et qu'il cherche à maintenir une distance de sécurité de sorte que si son prédécesseur freine il puisse s'arrêter derrière lui.

$$\dot{x}_n(t + \tau) = \min \left(\dot{x}_n(t) + 2.5a_n\tau \left(1 - \frac{\dot{x}_n(t)}{V_n} \right) \left(0.025 + \dot{x}_n \frac{\dot{x}_n(t)}{V_n} \right)^{\frac{1}{2}}, b_n\tau + \sqrt{b_n^2\tau^2 - b_n \left[2[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - \dot{x}_n(t)\tau - \frac{\dot{x}_{n-1}(t)^2}{\hat{b}} \right]} \right) \quad (2.7)$$

L'équation ci-dessus détermine la vitesse du véhicule n à l'instant $t + \tau$, t étant l'instant présent. Les paramètres de l'équation sont les suivants :

a_n : l'accélération maximale que le conducteur n accepte.

b_n : la décélération maximale que le conducteur n accepte.

s_n : la longueur du véhicule n , incluant une marge que le véhicule suiveur ne désire pas pénétrer, même à l'arrêt.

V_n : la vitesse que le véhicule n souhaite atteindre.

$x_n(t)$: la position longitudinale du véhicule n au temps t .

$v_n(t)$: la vitesse du véhicule n au temps t .

τ : le temps de réaction apparent des conducteurs, supposé constant pour tous les véhicules.

Le modèle de GIPPS se décompose en deux aspects du comportement :

- La première partie de l'équation

$$\dot{x}_n(t) + 2.5a_n\tau \left(1 - \frac{\dot{x}_n(t)}{V_n}\right) \left(0.025 + \dot{x}_n \frac{\dot{x}_n(t)}{V_n}\right)^{\frac{1}{2}}$$

réflète la prise de vitesse d'un véhicule seul. Cette partie de l'équation est obtenue en approchant des données obtenues à l'aide de véhicules spécialement instrumentés pour l'occasion.

- La seconde partie présente dans l'équation

$$b_n\tau + \sqrt{b_n^2\tau^2 - b_n \left[2[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - \dot{x}_n(t)\tau - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{b}} \right]}$$

représente la vitesse que le véhicule doit adopter pour se maintenir en sécurité derrière son prédecesseur. Elle tient compte de la distance qu'il faudrait au véhicule précédent pour s'arrêter s'il le souhaitait, et considère que le suiveur réagit après un temps de réaction τ et doit lui aussi immobiliser son véhicule tout en garantissant une distance de sécurité suffisante.

Comme indiqué ci-dessus, l'équation 2.7 ne fait intervenir que des grandeurs mesurables. Une légère exception existe cependant : \hat{b} qui est l'estimation que le véhicule n fait de la décélération maximale que le véhicule $n-1$ (son prédecesseur) est prêt à tolérer.

Beaucoup de travaux récents se fondent sur ce type d'approche, dont notamment le modèle «Intelligent Driver Model» [Treiber et al., 2000b] ainsi que ses dérivés (tels que [Treiber et al., 2006, Luo and Böllöni, 2012] par exemple). La validation de ces différents modèles est similaire à celle de GIPPS, s'intéressant principalement à des indicateurs macroscopiques obtenus en simulation.

2.3.3.2 Le modèle «Intelligent Driver Model» (IDM)

Le modèle IDM est un modèle largement répandu dans la littérature. Il est construit de manière analogue au modèle de GIPPS.

À la différence du modèle de GIPPS, le modèle IDM est un modèle dynamique du second ordre. Son expression cherche à déterminer l'accélération adoptée par un véhicule

Type	v_0	T	a	b	s_0	s_1	l
Voiture	120km/h	1.2s	$0.8m.s^{-2}$	$1.25m.s^{-2}$	1m	10m	5m
Poids lourds	80km/h	1.7s	$0.4m.s^{-2}$	$0.8m.s^{-2}$	1m	10m	8m

TABLE 2.1 – Valeurs des paramètres du modèle IDM par catégorie de véhicule comme proposé par [Treiber et al., 2000b]

à un pas de temps donné en fonction de son environnement, et non sa vitesse comme le fait le modèle précédemment présenté dans la section 2.3.3.1.

Cette distinction permet de mieux tenir compte de la dynamique des véhicules. Il permet d'exprimer les valeurs d'accélération maximales et minimales que peut adopter un véhicule selon sa catégorie. Ceci est tout particulièrement utile quand il est question de différencier le comportement des véhicules lourds et légers, cas qui fait l'objet de notre étude.

De manière similaire au modèle de GIPPS, le modèle IDM est construit comme la superposition de deux sous comportements complémentaires : un comportement d'accélération qui cherche à maximiser la vitesse (et donc à se rapprocher de la vitesse désirée sur l'infrastructure), et un comportement de décélération qui vise à maintenir le véhicule dans un état de sécurité vis à vis de son prédecesseur.

Le modèle est exprimé de la manière suivante :

$$\ddot{x}_n = a_n \left[1 - \left(\frac{\dot{x}_n}{v_0^n} \right)^\delta - \left(\frac{s_n^*(\dot{x}_n, \Delta v_n)}{\Delta x_n} \right)^2 \right] \quad (2.8)$$

où a_n est l'accélération maximale du véhicule n , v_0^n sa vitesse désirée, δ l'exposant d'accélération et $\Delta v_n = \dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}$ la vitesse de rapprochement du véhicule leader. s^* est une fonction donnant le *gap* à maintenir pour le couple (vitesse, vitesse d'approche) donné :

$$s_n^*(\dot{x}_n, \Delta v_n) = s_0^n + s_1^n \sqrt{\frac{\dot{x}_n}{v_0^n}} + T_n \dot{x}_n + \frac{\dot{x}_n \Delta v_n}{2\sqrt{a_n b_n}} \quad (2.9)$$

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

L'équation 2.8 est bien construite autour de deux sous-comportements :

$$a_n \left(1 - (\dot{x}_n / v_0^n)^\delta \right)$$

correspond à la situation où le véhicule accélère pour atteindre sa vitesse désirée, et

$$-a_n (s_n^*(\dot{x}_n, \Delta v_n) / \Delta x_n)^2$$

générant un comportement de freinage pour respecter une distance de sécurité.

L'introduction des paramètres a_n et b_n dans ce modèle permet de différencier le comportement qu'adoptent les différents véhicules selon leurs caractéristiques propres. Ainsi, l'auteur propose des valeurs typiques à utiliser selon le type de véhicule comme indiqué dans la Table 2.1.

2.3.3.3 Les modèles avec perception étendue

Tous les modèles de suivi que nous avons présentés jusqu'ici supposent que le comportement d'un véhicule n'est influencé que par son prédecesseur direct. Les évolutions récentes tendent à réfuter ce parti pris et supposent que le comportement d'un véhicule est lié à un ensemble (de taille variable) de véhicules présents devant lui.

Ainsi [Lenz et al., 1999] développent un modèle basé sur le modèle OV qui combine les accélérations qu'entraînent chacun des m véhicules perceptibles le long de la route :

$$\ddot{x}_n = \sum_{j=1}^m a_j \left\{ V \left(\frac{x_{n+j} - x_n}{j} \right) - \dot{x}_n \right\} \quad (2.10)$$

où m est le nombre de véhicules pris en compte, a_j un paramètre spécifiant le poids dans la décision de chaque véhicule perçu, et V la même fonction de vitesse optimale que celle utilisée par OV.

Une approche similaire est utilisée pour le modèle Human Driver (meta-)Model (HDM) [Treiber et al., 2006] qui somme les accélérations induites par les différents prédecesseurs présents sur la route. Outre la capacité à tenir compte de plusieurs prédecesseurs, ce modèle cherche à incorporer une estimation d'erreurs (faites par le conducteur) et une capacité d'anticipation.

2.4 Prise en compte des véhicules lourds

Jusqu'ici, notre revue de littérature a couvert les différentes approches de modélisation du comportement du conducteur sans s'attarder sur les différentes spécificités engendrées par la présence de véhicules poids lourds. Cependant, il est reconnu que la présence de ce type de véhicule a un impact sur le trafic [Chanut, 2005]. Nous présentons donc ici les principaux travaux ayant cherché à caractériser l'impact des véhicules poids lourds sur l'écoulement du trafic.

2.4.1 Capacités intrinsèques

Comme nous l'avons montré dans la partie 2.3, l'enrichissement croissant des modèles individuels de véhicules, fondé sur l'usage de paramètres reliés à des grandeurs physiques quantifiables permet d'envisager la distinction des comportements entre véhicules légers et poids lourds.

Cet enrichissement des modèles permet de prendre en compte les spécificités physiques des véhicules lourds. Ainsi, pour intégrer des véhicules lourds, la majorité des auteurs utilise des modèles de véhicules «classiques» à la distinction que ceux-ci ont :

- une longueur supérieure à celle des véhicules légers (donc un encombrement plus important sur l'infrastructure),
- une dynamique significativement limitée comparée aux véhicules légers due à la masse très importante des véhicules lourds. Les capacités d'accélérations maximales et minimales sont donc fortement réduites pour reproduire cet effet.

Le modèle IDM présenté dans en 2.3.3.2 est une illustration intéressante de cette approche. Pour l'auteur de ce modèle, les camions sont des véhicules longs capables de faibles accélérations et décélérations.

Afin de proposer une approche plus précise, et de pouvoir évaluer plus finement les capacités d'accélérations des véhicules lourds, [Rakha et al., 2001] se sont livrés à une modélisation des capacités d'accélérations maximales des véhicules lourds. Nous ne présentons pas le détail de modélisation, ceci sera fait dans la partie 6.3.

Pour obtenir ce résultat, un bilan des forces qui s'exercent sur un véhicule est réalisé. Il comprend :

- la force motrice du véhicule (force du moteur dépendant de la puissance de celui-ci),
- le poids du véhicule, jouant un rôle non négligeable lorsque le véhicule se trouve sur un pan incliné,
- les forces de résistance aérodynamiques freinant l'avancée du véhicule dans l'air,
- l'adhérence des pneumatiques sur la chaussée, limitant la puissance effectivement exploitable du véhicule.

À l'aide de ce bilan l'accélération maximale du véhicule est déterminée grâce à la seconde loi de NEWTON ($F = ma$).

Cette approche permet d'obtenir une estimation des capacités dynamiques des véhicules. En particulier, elle est utilisée par l'auteur pour déterminer la vitesse maximale que peut atteindre un véhicule dans une zone pentue. En effet, contrairement aux véhicules légers, sur un pan incliné, un véhicule lourd ne parvient pas nécessairement à atteindre sa vitesse désirée. Ces travaux permettent de reproduire ce phénomène.

2.4.2 Une réglementation spécifique

Outre les aspects dynamiques distinguant les véhicules lourds des véhicules légers, une réglementation spécifique leur est appliquée. Certaines de ces distinctions sont fréquemment introduites dans les modèles de simulation.

L'élément réglementaire le plus marquant est la limitation de vitesse spécifique appliquée aux véhicules lourds. En France, par exemple, et sur section autoroutière, les véhicules lourds sont limités à 90km/h tandis que les autres usagers peuvent circuler à 130km/h . La liste des paramètres proposés pour le modèle IDM reflète la prise en compte de cette particularité dans les simulations microscopiques, de manière analogue à ce qui est généralement pratiqué.

Outre les limitations spécifiques appliquées à la vitesse, le code de la route français impose également des contraintes spécifiques de respect d'inter distances entre des véhicules lourds [PLInfra, 2010] :

Hors agglomération, lorsque des véhicules ou des ensembles de véhicules,

dont le poids total autorisé en charge dépasse 3.5 tonnes ou dont la longueur dépasse 7 mètres, se suivent à la même vitesse, la distance de sécurité (...) est d'au moins 50 mètres.

Ce type d'aspect est peu présent dans la littérature relative aux modèles de simulation microscopique car il est étroitement lié à la réglementation spécifique de chaque pays. Cependant, comme nous l'évoquerons dans la partie 2.4.3, la distance inter-véhiculaire peut se trouver spécifiquement adaptée, via la spécialisation de paramètres.

Le reste des aspects réglementaires concerne essentiellement des restrictions d'accès particulières (interdiction de traverser certaines zones urbaines, interdiction de franchir certains ouvrages d'art...). Ces aspects sont importants à considérer lorsqu'il est question d'étudier les répartitions de flux de véhicules sur un réseau, mais est hors du champ de cette étude.

2.4.3 Spécificité de la conduite d'un poids lourds

Les approches présentées jusqu'ici se concentrent sur le fait qu'un poids lourd est différent d'un véhicule léger dans sa dynamique. Malgré cela, il est supposé que le conducteur prenne ses décisions globalement de la même manière quel que soit le type de véhicule conduit.

La question de savoir en quoi conduire un véhicule lourd se distingue de la conduite de véhicules légers n'est que très peu abordée.

Les paramètres proposés pour le modèle IDM montrent que la question est jusqu'ici au mieux effleurée. Le paramètre T associé à ce modèle (le temps de réaction des conducteurs) prend une valeur significativement plus importante pour les camions que pour les voitures ($1.7s$ au lieu de $1.2s$ soit une hausse de $0.5s$). Or les conducteurs de camions sont en général plus expérimentés que les conducteurs de véhicules de tourisme (car ils sont en majorité conducteurs de profession). Il semble incohérent que l'expérience entraîne une hausse du temps de réaction.

Une valeur plus importante de T entraîne automatiquement une valeur plus importante s^* (la distance de sécurité idéalement adoptée par le conducteur). L'équation 2.9 montre que cette distance contient un composant $T_n \dot{x}_n$ qui correspond à la distance parcourue par le véhicule durant le temps de réaction du conducteur.

Il semblerait donc que la hausse du paramètre correspondant au temps de réaction du conducteur ne soit présente que pour obtenir une distance de sécurité accrue pour les véhicules lourds. Cette hausse sert à compenser en partie les capacités limitées de freinage.

La paramétrisation du modèle IDM montre donc qu'il est important de considérer des spécificités dans la manière de conduire des chauffeurs de poids lourds. Cependant, ces différences ne sont pas prises en compte dans les modèles microscopiques actuels.

Par ailleurs, le détournement d'un paramètre pour exprimer tout autre chose que ce qu'il est censé représenter montre une limite de l'approche microscopique où chaque paramètre doit être lié à une grandeur réelle mesurable. La capacité expressive des modèles tels qu'ils sont conçus ne permet pas de capturer tous les aspects du comportement.

2.4.4 Impact des poids lourds sur leur voisinage

Une partie de la littérature relative à l'étude du trafic et aux poids lourds se penche sur l'effet que les véhicules lourds peuvent avoir sur les conducteurs les entourant.

En ce qui concerne les comportements de suivi, [Green and Yoo, 1999] montre qu'un conducteur, quand il suit un véhicule encombrant, laisse une distance de sécurité plus importante que lorsqu'il suit un véhicule léger.

La littérature suggère que cela pourrait être dû à plusieurs effets :

- Les véhicules lourds occupent une place plus importante du champ visuel des suiveurs, donc les variations d'inter-distance (rapprochement) se perçoivent plus facilement.
- Les véhicules encombrants limitent la perception en aval du trafic, limitant ainsi les capacités d'anticipation et induisant ainsi une plus grande marge de sécurité.

Cependant, une autre étude mesurant les inter-distance adoptées par les conducteurs arrive à des observations opposées [Sayer, 2000]. Il semblerait que quand l'état du trafic ne peut être perçu en aval d'un véhicule encombrant, il soit simplement ignoré. Ainsi le conducteur du véhicule suiveur n'anticipe pas de comportements anormaux devant le poids lourd et ne s'adapte qu'à ce dernier. Enfin, les véhicules ayant de meilleures capacités de freinage que les poids lourds, un gap réduit ne semble pas perçu comme une baisse de la sécurité. La question de l'inter-distance adoptée par les suiveurs n'est donc pas clairement tranchée par la littérature.

Enfin, certains travaux se sont concentrés sur l'impact des véhicules lourds sur les stratégies de changement de voie des véhicules les entourant. Ainsi, [Peeta et al., 2005] cherche à quantifier le niveau de gêne induit par un véhicule lourd sur les véhicules le suivant. Quand ce niveau devient trop important pour le conducteur (niveau qui est fonction du conducteur lui-même, sa classe socio-professionnelle, son niveau d'expérience de la conduite...), celui-ci cherche à dépasser le véhicule pour réduire son inconfort.

Rappelons que, même si l'aspect latéral du positionnement des véhicules n'est pas notre principal intérêt dans cette étude, la présence de véhicules lourds a un impact certain sur d'une part les taux d'occupations des voies et d'autre part sur le nombre de changements de voies observés comme cela est rappelé par [Chanut, 2005].

2.5 Conclusion

Dans cette première partie nous avons dressé un panorama très général des activités d'étude et de simulation du trafic routier. Nous avons présenté les deux grandes approches (macroscopiques et microscopiques) et présenté les points forts de chacune d'elles.

Nous avons ensuite présenté l'évolution des modèles de simulation microscopiques. Nous observons un enrichissement continu des comportements décrits faisant de plus en plus apparaître des aspects délibératifs des conducteurs. La continuité naturelle est donc d'étudier les apports que peuvent apporter des champs disciplinaires distincts comme la psychologie ou l'intelligence artificielle à la simulation microscopique du trafic routier. Ces domaines cherchent à étudier et reproduire les propriétés de l'intelligence humaine. Il

semble donc adéquat d'utiliser les apports de ces disciplines à l'étude et la reproduction des comportements de conducteurs. Nous présenterons donc dans le chapitre suivant les Systèmes Multi-Agents (SMA) qui permettent de faire une synthèse entre les études psychologiques des conducteurs et l'intelligence artificielle.

La partie 2.4 laisse entrevoir que bien que s'approchant du comportement des conducteurs de véhicules légers, les conducteurs de véhicules lourds doivent être modélisés de façon spécifique et explicite. Ceux-ci doivent adopter des stratégies de conduites particulières pour compenser les limitations intrinsèques de leurs véhicules.

Chapitre 3

Les Systèmes Multi-Agents : outils de simulations

Sommaire

3.1	Introduction	35
3.2	L'approche SMA	35
3.2.1	Une façon de modéliser le monde	37
3.2.2	Approche microscopique ou Système Multi-Agents (SMA) ?	39
3.2.3	Classification des agents	44
3.3	Les SMA pour le trafic	45
3.3.1	Perception et représentation de l'environnement	46
3.3.2	Processus de décision	48
3.4	Conclusion	51

3.1 Introduction

Les systèmes multi-agents sont en partie issus de l'intelligence artificielle distribuée dont l'application à la simulation montre de grandes similarités avec la simulation microscopique. Nous présentons le cadre général de cette approche puis nous nous concentrerons sur les différents apports que ce domaine a pu avoir sur le domaine de la simulation, et tout particulièrement sur la simulation microscopique du trafic routier. Nous montrerons ainsi une convergence entre les besoins d'outils de modélisation pour les simulations microscopiques du trafic présentés dans le chapitre 2 et les possibilités offertes par l'approche multi-agents.

3.2 L'approche SMA

Le domaine des systèmes multi-agents est issu principalement de l'intelligence artificielle distribuée. Un système multi-agents est un système dans lequel évoluent plusieurs

entités appelées agents. Les agents du système interagissent et s'organisent de manière dynamique et adaptative. Un ensemble d'agents est appelé système multi-agents. Son objet est l'étude des systèmes dans lesquels l'intelligence (au sens le plus large, comprenant la capacité délibérative, la connaissance ou l'intelligence collective) n'est généralement pas concentrée en un endroit unique mais répartie entre ses différents agents. L'étude des systèmes multi-agents porte donc un grand intérêt aux interactions se produisant entre les différentes entités le composant, ainsi qu'aux phénomènes résultant de ces interactions.

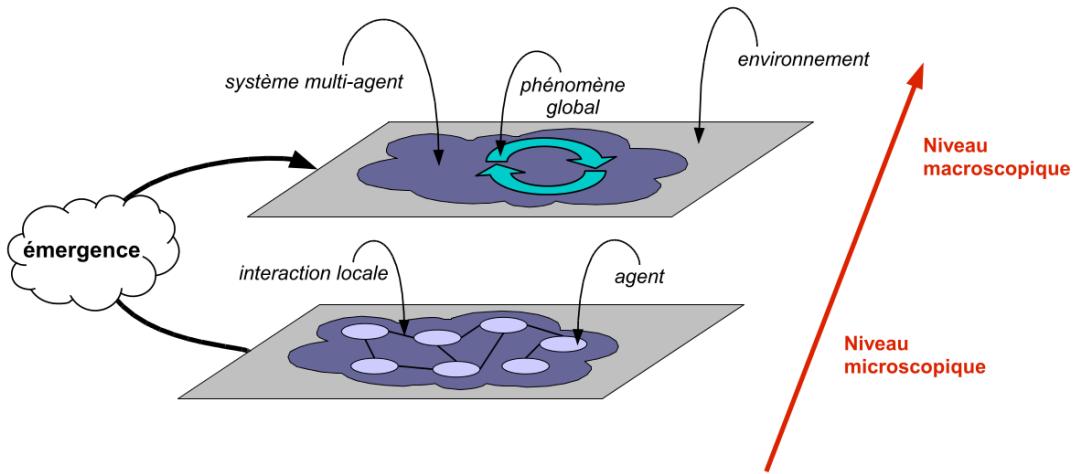


FIGURE 3.1 – Le phénomène d'émergence. Illustration extraite de [Doniec, 2006]

Nous appellerons ici phénomènes émergents l'ensemble des phénomènes qui sont observables au niveau macroscopique lors de l'étude d'un système multi-agents comme l'illustre la figure 3.1. Ces phénomènes sont la conséquence des actions et des interactions des acteurs présents dans le monde simulé. Une discussion plus approfondie de ce qu'est l'émergence et comment la caractériser peut être trouvée dans [Deguet et al., 2006]. Ces phénomènes macroscopiques ne sont en général pas anticipés ni modélisés dans les modèles des agents impliqués dans la simulation.

L'exemple le plus courant est la colonie de fourmis. Cet exemple a été étudié par [Dorigo and Gambardella, 1997], ou encore par [Drogoul, 1993] avec le système MANTA. Une fourmi seule ne dispose que de capacités mentales limitées, de l'ordre du réflexe. Cependant, érigé au niveau de la société (colonie de fourmis), le tout est une entité capable de s'auto-organiser (le rôle de chaque membre se spécialise selon le besoin), et de s'adapter à son environnement (collecte de nourriture, défense...). L'intelligence collective est donc « supérieure » à l'intelligence de chacun des membres, et même à la somme de l'intelligence des membres.

Dans les propos qui vont suivre, nous nous intéresserons tout particulièrement à l'utilisation des systèmes multi-agents dans le cadre de la modélisation et de la simulation.

3.2.1 Une façon de modéliser le monde

Revenons sur l'exemple de la fourmilière. Afin d'étudier un tel système, l'une des approches possibles est l'utilisation de la simulation (l'autre approche étant bien sûr l'étude *in-situ* d'une fourmilière, les deux étant complémentaires).

Pour ce faire, il est nécessaire d'utiliser un modèle, qui a pour vocation de reproduire tout ou partie des propriétés que l'on cherche à étudier sur la fourmilière. Dans le cadre de ce discours, nous utilisons la définition d'un modèle donnée par [Minsky, 1965] : « *To an observer \mathcal{B} , an object \mathcal{A}^* is a model of an object \mathcal{A} to the extent that \mathcal{B} can use \mathcal{A}^* to answer questions that interest him about \mathcal{A} .* »¹. Ainsi nous pouvons imaginer des modèles de l'évolution de la population de la fourmilière (de sa taille etc.) qui serviraient à mener l'étude. Un modèle est utilisé pour répondre à une question particulière.

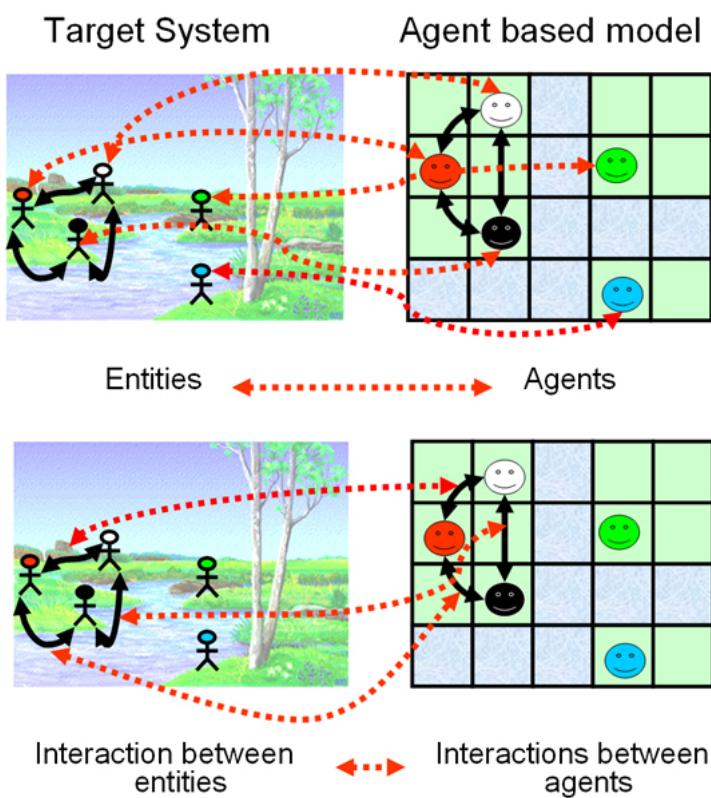


FIGURE 3.2 – Une relation directe entre les objets du monde et les acteurs modélisés telle que présentée dans [Galán et al., 2009]

Dans cette approche «classique», telle que pratiquée dans beaucoup de domaines, comme la macro-économie, la démographie, l'objet modélisé est l'objet étudié. Dans

1. Pour un observateur \mathcal{B} , l'objet \mathcal{A}^* est un modèle de l'objet \mathcal{A} dans la mesure où \mathcal{B} peut utiliser \mathcal{A}^* pour répondre aux questions qui l'intéressent à propos de \mathcal{A}

l'approche multi-agents, au contraire, l'objet d'étude n'est pas directement modélisé. Chaque composant de l'objet d'étude ainsi que chacune des interactions existant entre ces composants sont modélisés indépendamment comme l'illustre la figure 3.2.

Ainsi, ce qui peut être considéré comme le modèle de l'objet d'étude est en fait le système contenant une multitude de modèles individuels, de relations et d'échanges. La modélisation de l'environnement dans lequel ces entités évoluent et interagissent fait donc également partie du système.

Cette distinction a des impacts à plusieurs niveaux :

La modélisation L'activité de modélisation est particulièrement affectée. Il est aisément de déterminer quelles sont les entités à modéliser du fait du lien direct qui existe entre les agents et les entités du monde observé. Il en va de même des relations entre ces agents qui sont directement reproduites. Malgré cette simplification de l'analyse, la modélisation réelle de chacun des agents est, elle, une tâche non triviale. En effet les acteurs modélisés ont un comportement qui n'est pas nécessairement bien connu, pas plus que la nature exacte de leurs relations. L'environnement dans lequel doivent évoluer les agents doit également être modélisé et être l'objet d'une réelle attention.

La validation Si la réalisation d'un système à base d'agents n'est pas triviale, la vérification et la validation de ce dernier le sont encore moins. Dans l'approche classique, et dans la lignée de la définition de MINSKY, la validation d'un modèle consiste à vérifier qu'il permet de répondre à une question que l'on se pose sur l'objet d'étude, et ce, avec une marge d'erreur acceptable. Dans le cas de simulations basées sur une approche multi-agents, cette vision ne s'applique pas directement. L'objet d'étude étant le système, et les questions d'intérêt portant sur le système dans son ensemble, seul celui-ci peut être validé. L'objet d'étude n'étant pas l'agent lui-même, la notion de validation de celui-ci, et ce, indépendamment du reste du système n'existe pas. C'est donc la conjonction de nombreux modèles qui est étudiée comme un tout et non chacun de ses composants. Chacun des composants — c'est à dire les modèles d'agents, leurs communications ainsi que l'environnement — ne peut être validé indépendamment au regard de la question originale, celle-ci portant sur le système.

L'approche multi-agent semble donc déplacer les difficultés liées à la validation des modèles vers la validation du système. Cela montre toutefois un intérêt certain : alors que dans l'approche «classique» un modèle est construit dans un but bien précis, les modèles d'agents sont conçus pour faire partie d'un tout. Le but de la simulation n'influence qu'indirectement la conception : les entités impliquées dépendent avant tout des composants du système réel et seulement ensuite de l'aspect du système qui est étudié.

Ainsi, nous pouvons faire l'hypothèse suivante : si un modèle à base d'agents est validé dans son ensemble pour répondre à une question, ses composants doivent pouvoir être ré-utilisés (ou tout au moins former une base solide) dans un autre système impliquant les mêmes entités servant à répondre à une autre question. Si nous disposons d'un modèle à base d'agents servant à étudier l'expansion d'une fourmilière, il est probable qu'il puisse également être utilisé pour étudier l'évolution de la population de cette même fourmil-

ième. S'il n'est pas suffisant, seuls des aspects de la modélisation des agents doivent être améliorés ou complétés, et non le système dans son ensemble.

L'approche multi-agents permet donc d'obtenir une plus grande robustesse des modèles utilisés car ils peuvent, de par leur nature, être utilisés dans différents contextes.

3.2.2 Approche microscopique ou SMA ?

La présentation de l'approche agent faite jusqu'ici montre de très fortes similitudes avec l'approche microscopique de la simulation de trafic présentée dans le chapitre 2. Cette ressemblance est d'autant plus prononcée que des systèmes à base d'agents sont utilisés pour effectuer des simulations microscopiques de trafic routier comme nous le montrerons dans la partie 3.3. Nous cherchons donc maintenant à déterminer en quoi l'approche SMA est une approche microscopique particulière et ainsi en quoi cette approche est adaptée à la réalisation d'outils de simulation de situations routières.

Afin de répondre à cette question, nous nous basons sur les travaux présentés dans [Ferber and Perrot, 1995] et [Chevrier and Fates, 2010] qui permettent de souligner les propriétés importantes que les agents doivent, pour nos besoins applicatifs, respecter :

- chaque agent dispose de sa propre perception de l'environnement,
- chaque agent est autonome et a ses propres objectifs,
- chaque agent dispose de connaissances propres, imperceptibles pour les autres agents.

Nous détaillons maintenant chacune de ces propriétés et montrons leur cohérence avec la littérature existante.

3.2.2.1 Les agents et leur environnement

Afin de souligner la singularité de l'approche à base d'agents parmi l'ensemble des approches microscopiques, nous utilisons d'abord la définition d'agent qui est donnée par [Ferber and Perrot, 1995] :

On appelle agent une entité physique ou virtuelle

1. *qui est capable d'agir dans un environnement,*
2. *qui peut communiquer directement avec d'autres agents,*
3. *qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),*
4. *qui possède des ressources propres,*
5. *qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,*
6. *qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),*
7. *qui possède des compétences et offre des services,*
8. *qui peut éventuellement se reproduire,*

9. *dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit.*

Cette définition fait apparaître plusieurs points d'intérêts, même si tous les aspects ne sont pas applicables à notre étude.

Tout d'abord les points (1) et (5) font apparaître le lien fort entre agent et environnement. L'environnement peut être soit une abstraction de l'environnement réel dans lequel évoluent les agents (la route sur laquelle se déplacent des véhicules par exemple), soit la plate-forme qui permet aux agents d'interagir entre eux, soit les deux à la fois. Dans les deux cas, il s'agit de l'élément faisant le lien entre les différentes entités impliquées dans le système. Dans le cas où l'environnement représente le monde physique dans lequel évoluent les agents, ces derniers peuvent, via des senseurs, avoir une perception (usuellement partielle) de cet environnement, des autres agents qui sont présents à proximité. Ils peuvent agir sur l'environnement via des effecteurs afin de satisfaire leurs buts. Nous appelons donc senseur tout moyen qui permet à un agent d'obtenir des informations sur son environnement (par exemple un système de vision), et effecteur tout moyen qui permet à un agent de modifier l'état du monde (par exemple un bras).

3.2.2.2 Des agents autonomes et indépendants

Les points (3) et (9) de la définition de FERBER font apparaître le point fondamental d'autonomie de chaque agent. Un agent n'agit pas dans le but de satisfaire l'objectif de la simulation ni un optimum global, mais bien dans le but de satisfaire ses propres objectifs. Les objectifs de différents agents peuvent donc être soit partagés soit individuels. Un groupe d'agents peut donc partager un objectif commun, par exemple l'ensemble des fourmis souhaitent défendre la fourmilière. A l'opposé, il est possible que l'ensemble des agents impliqués dans un groupe soient en compétition. Ils disposent alors d'objectifs propres et antagonistes les uns avec les autres. Ainsi, dans une simulation de marchés boursiers, chaque agent cherche à maximiser la valeur de son portefeuille. Nous retrouvons donc ici que l'approche agent est particulièrement ego-centrée, pouvant éventuellement reposer sur des comportements égoïstes. Il est d'ailleurs intéressant de constater que des comportements égoïstes peuvent aboutir à une répartition optimale des ressources. Par exemple, [Blanchette et al., 2012] modélise le comportement des pingouins qui se regroupent dans la tempête pour se protéger du vent et montre que le fait que chaque pingouin cherche à atteindre le centre de l'amas pour profiter du plus de chaleur aboutit au fait que la chaleur et la protection sont répartis de manière équitable entre les membres.

De plus, le concept d'autonomie des agents ouvre la voie à celui de variabilité. Dans le cas présenté de marchés boursiers, tous les agents ont un même but, mais si nous regardons plus en détail l'exemple de la fourmilière abordé plus tôt, certaines fourmis sont ouvrières et doivent donc remplir des objectifs de constructions tandis que d'autres sont nourrices et doivent prendre soin des larves.

Un système peut donc être composé d'entités hétérogènes, chacune ayant ses capacités propres ainsi que ses objectifs propres.

Notons que cette notion d'autonomie des agents permet déjà de distinguer l'approche SMA de certaines approches présentées dans la partie 2.3. Si nous considérons le modèle de NEWELL, il est explicitement construit de manière à faire intervenir dans les comportements individuels les paramètres macroscopiques que l'on cherche à observer. Une telle approche pose donc comme hypothèse de modélisation le résultat macroscopique désiré et n'admet ainsi aucune autonomie propre à chaque agent.

Pour aller plus loin dans ce qui peut caractériser un agent, et un système d'agents, nous nous basons sur la formalisation faite par [Chevrier and Fatès, 2010]. Dans cette approche, un système multi-agents est décrit par un système dynamique discret. Il est décrit par un quadruplet :

\mathcal{E} représente l'état de l'environnement. Dans le cas d'un environnement discrétilisé en un ensemble de cellule, il s'agit de l'ensemble des états de chacune des cellules composant l'environnement.

\mathcal{P} représente l'ensemble des positions des agents présents dans l'environnement.

\mathcal{O} représente l'ensemble des états observables des agents qui sont présents dans la simulation.

\mathcal{I} représente l'ensemble des états internes (non observables) des agents qui sont présents dans la simulation.

Dans le formalisme utilisé, les lettres calligraphiques désignent un ensemble (par exemple \mathcal{E} représente l'ensemble des états que peut prendre une cellule de l'environnement) alors que les lettres calligraphiques grasses représentent un vecteur d'élément appartenant à l'ensemble désigné par la même lettre mais non grasse. \mathcal{E} est donc un vecteur contenant pour chaque cellule de l'environnement son état, décrit par un élément appartenant à \mathcal{E} .

Le processus de décision de chaque agent est décomposé en trois étapes : la perception, la décision et la mise à jour des connaissances de l'agent. La décision se caractérise par une influence sur l'environnement.

La perception : La perception est le processus par lequel un agent a donné extrait de la connaissance depuis son environnement. Ce processus est donné par une fonction de perception (propre à chaque agent) :

$$\text{PERCEIVE}_a : \mathcal{E} \times \mathcal{P} \times \mathcal{O} \rightarrow \text{Perc}$$

PERCEIVE_a est la fonction de perception de l'agent a qui, en fonction de l'état de l'environnement, de la position des autres agents et de leurs états observables, retourne une perception. La perception d'un agent est décrite comme étant un élément de Perc qui est l'ensemble des perceptions possibles.

La décision : La décision est le processus par lequel un agent a agit sur son environnement. L'action sur l'environnement d'un agent est décrite comme étant l'influence que cet agent a a sur l'environnement. Le concept d'influence utilisé dans cette approche est celui présenté par [Ferber and Müller, 1996].

$$\text{DECIDE}_a : \mathcal{I} \times \text{Perc} \rightarrow \text{Infl}$$

DECIDE_a est la fonction de décision de l'agent a qui, étant donné l'état interne de l'agent (sa mémoire) et sa perception, influence l'évolution de l'environnement. Une influence est ici décrite comme un élément de Infl , l'ensemble des influences possibles. L'influence est ici entendue au sens de [Ferber and Müller, 1996], c'est à dire que chaque agent présent dans l'environnement produit des influences ayant pour objet de changer l'environnement, et le changement effectif que subit l'environnement est la synthèse de l'ensemble des influences auxquelles il est soumis. Par exemple, considérons une simulation dans laquelle un agent pousse sur une porte pour l'ouvrir et qu'un autre tire sur cette même porte pour la fermer et ce, avec une intensité égale, les deux agents se tenant du même côté de la porte. La réaction finale de l'environnement sera nulle : l'influence de l'un des agents annulant celle de l'autre. Cette approche permet de distinguer l'effet qu'un agent souhaite avoir sur l'environnement et l'effet effectivement obtenu.

La mise à jour de la connaissance : La mise à jour est le processus par lequel un agent a met à jour son état interne, qui est une façon de représenter sa mémoire.

$$\text{AGENTUPDATE}_a : \mathcal{I} \times \text{Perc} \rightarrow \mathcal{I}$$

AGENTUPDATE_a est la fonction de mise à jour de la connaissance de l'agent a qui, étant donné l'état interne de l'agent et sa perception (valeur obtenue grâce à la fonction PERCEIVE_a), met à jour l'état interne de l'agent.

L'utilisation de ce formalisme illustre le second point de différenciation entre l'approche microscopique et l'approche agent : l'autonomie. Chaque agent dispose de connaissances propres (notés \mathcal{I}) à la fois sur le monde et sur les autres (ces connaissances pouvant éventuellement être erronées). Aucune entité autre que l'agent lui-même ne peut accéder directement à cette connaissance ni l'altérer.

Ainsi, nous notons que l'état caractérisant un agent est décomposé en trois éléments dans cette approche : \mathcal{P} représentant la position d'un agent, \mathcal{O} l'ensemble des propriétés d'un agent qui sont observables et \mathcal{I} le reste des éléments qui caractérisent l'agent, mais qui ne sont pas perceptibles par les autres agents.

Cette notion de propriété d'un acteur non observable par les autres se retrouve dans le modèle de GIPPS présenté dans la partie 2.3.3.1. Dans ce modèle le conducteur ne peut percevoir la capacité de décélération maximale du prédecesseur et a recours à une estimation de cette grandeur (notée \hat{b}) dans son processus de décision.

3.2.2.3 État du monde, perception et connaissance sur le monde

La formalisation de [Chevrier and Fatès, 2010] permet également de souligner la distinction qu'il faut faire entre l'état observable de l'environnement (le triplet $\{\mathcal{E}, \mathcal{P}, \mathcal{O}\}$) et la connaissance qu'un agent peut en avoir (\mathcal{I}). L'acquisition de connaissances se fait donc en deux étapes :

- La perception (par la fonction PERCEIVE_a) qui fournit un ensemble d'informations sur l'environnement qui sont généralement partielles et parfois entachées d'erreurs.

- La mise à jour de la connaissance (par la fonction UPDATEAGENT_a) qui met à jour la connaissance dont l'agent dispose du monde en fonction de ce qu'il en sait déjà et de ce qu'il en a perçu. Ce processus est celui qui permet de reproduire l'oubli d'informations qui ne sont plus pertinentes ainsi que l'estimation de l'évolution d'éléments connus mais non perçus récemment.

Ce schéma dans lequel le monde n'est connu que via le prisme de la perception permet aux simulations à base d'agents reproduisant le comportement humain (simulations de conduite par exemple) de fonder la décision sur une connaissance partielle de l'environnement et non sur une connaissance absolue. Nous illustrerons des applications concrètes dans la partie 3.3.1.

Ainsi, chaque agent présent dans l'environnement peut évoluer selon un schéma classique de «perception-décision-action» comme illustré par la figure 3.3.

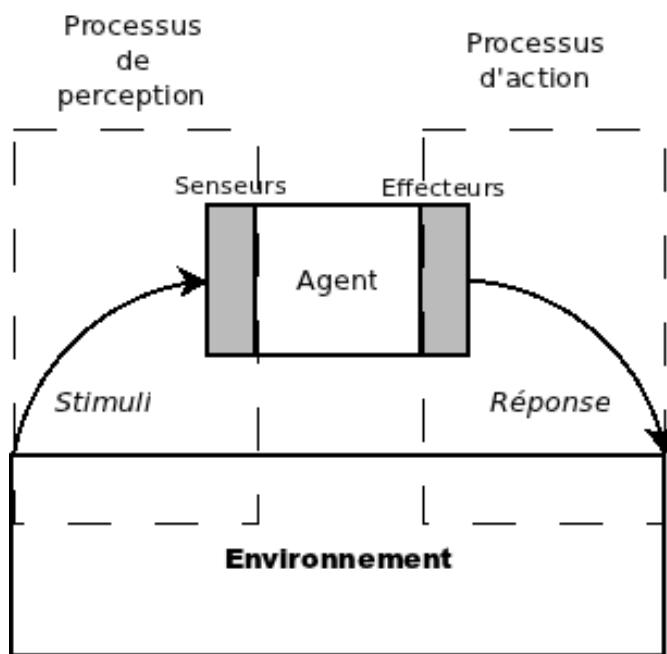


FIGURE 3.3 – Cycle perception décision action. Un agent perçoit son environnement à l'aide de senseurs, effectue une délibération et agit sur son environnement à l'aide d'effecteurs.

Étant donné cette approche, nous voyons qu'avec l'approche multi-agents il est exclu d'avoir une approche supervisée dans laquelle une intelligence centralisée serait en mesure de guider chacune des entités impliquées dans la simulation, scénario tout à fait envisageable (et, comme nous le présenterons dans la partie suivante, envisagé) dans l'approche microscopique stricte.

En résumé, l'approche multi-agents est une approche particulière appartenant aux approches microscopiques. Elle se distingue dans le sens où :

- elle impose de s'intéresser aux interactions qui existent entre les entités modélisées

- (agents) et leur environnement (via leurs capacités de perception et d'action),
- elle impose un cloisonnement strict entre les agents, rendant hors champ toute utilisation d'intelligence centralisée ou omnisciente.

3.2.3 Classification des agents

La partie précédente a cherché à montrer en quoi l'approche agent se distingue de l'approche microscopique largement utilisée dans la littérature du trafic. Nous nous intéressons maintenant à identifier dans quel cadre de la littérature des systèmes multi-agents nous évoluons. La notion d'agent, et par extension de système multi-agents, est très large et couvre à ce titre des scénarios hors de notre champ d'utilisation.

Les éléments de classifications que nous retenons ici sont largement inspirés de ceux présentés par [Ferber and Perrot, 1995].

3.2.3.1 Agents situés ou agents communicants

Le premier aspect sur lequel peuvent se distinguer différentes sortes d'agents est leur mode de communication. D'un côté, nous pouvons citer les agents échangeant de l'information via des messages. Dans cette situation, l'environnement sert de plate-forme de communication aux différents agents.

De l'autre côté, nous avons les agents incapables de communiquer directement, mais qui sont en revanche en mesure de percevoir les agents et les objets proches d'eux dans l'environnement. Dans ce scénario, l'environnement est utilisé pour localiser les agents, ce qui permet de définir une notion de proximité d'un agent à un autre. De plus l'environnement peut être utilisé comme moyen de communication et d'échange indirect à la manière d'un «tableau noir». Dans cette approche, le tableau noir est un espace sur lequel toute entité est en mesure de déposer de l'information (usuellement des objets, des ressources ou des phéromones dans le cas des fourmis) et de récupérer l'information (percevoir ou acquérir les éléments présents dans l'environnement). Les agents de ce type sont dits situés ou localisés.

Entre ces deux extrêmes, tout une gradation est possible. Nous pouvons avoir des agents localisés dans un environnement échangeant des messages.

En ce qui concerne le cas de la simulation de trafic routier, cas d'étude qui nous intéresse, nous nous situons très clairement dans le cas d'agents situés non communicants. En effet, les conducteurs sur l'infrastructure ne sont pas en mesure d'échanger de l'information directement, mais se synchronisent plutôt via leur position ou en affichant des indicateurs perceptibles localement (tels que les clignotants).

3.2.3.2 Agents réactifs ou agents délibératifs

Le second aspect selon lequel les agents peuvent être classifiés est leur degré de délibération. Même si les SMA sont une branche de l'intelligence artificielle distribuée, elle-même issue de l'intelligence artificielle, cela ne signifie pas que les agents simulés doivent nécessairement être dotés de capacités délibératives évoluées. Le postulat est que

l'intelligence émerge de la multitude des agents, chacun d'eux étant en mesure de traiter une partie du problème.

Ainsi, nous pouvons avoir des agents dits «réactifs», qui ne disposent pas de représentation symbolique de leur environnement, et qui ne réagissent qu'à des *stimulis* externes. Ces agents sont les plus simples et disposent des capacités délibératives les plus limitées.

A l'opposé, nous trouvons les agents délibératifs. Ces derniers disposent d'une représentation symbolique de leur environnement et sont généralement en mesure d'effectuer des communications avec d'autres agents. Ils disposent de capacités décisionnelles importantes. De plus, ces agents n'entrent pas nécessairement dans un cadre «perception--décision-action» strict. Ils peuvent être amenés à initier des actions de leur propre chef sans que pour autant celles-ci ne soient en réaction à un stimuli externe où un élément perçu. Ils sont alors dits proactifs.

Ainsi, dans le cadre de la simulation microscopique de trafic routier, il est possible d'utiliser différents types d'agents. Bien qu'il semble évident que les agents utilisés seront des agents localisés, le niveau de cognition qui leur est associé peut évoluer grandement d'un système à un autre. Alors qu'il est possible de considérer bon nombre des modèles présentés dans la partie 2.3 comme des modèles d'agents réactifs simples, les outils fournis par la littérature des SMA et de l'intelligence artificielle permettent de concevoir des modèles d'agents plus complets comme nous allons le montrer dans la section suivante.

3.3 L'apport des SMA à la simulation du trafic routier

Comme nous venons de le présenter, l'approche de la simulation basée sur les SMA est une forme particulière de simulation microscopique. Les modèles à base d'agents ou microscopiques sont donc naturellement utilisés dans des situations similaires. Il est ainsi possible d'utiliser les modèles microscopiques que nous avons présentés dans la partie 2.3 pour concevoir des systèmes multi-agents. Bien que cette approche soit envisageable, elle ne tirera que peu parti des possibilités offertes.

Par ailleurs, notons que l'approche multi-agents se focalisant sur la description de comportements d'agents autonomes, elle est tout particulièrement adaptée pour effectuer des simulations ayant pour vocation de reproduire et d'étudier les comportements de conducteurs réels. En effet, les conducteurs réels modélisés ne partagent aucun but en commun, et chacun d'entre eux cherche à satisfaire ses propres objectifs (atteindre sa destination en un minimum de temps), et ce en exploitant au mieux l'information qu'il est en mesure de percevoir localement. Ces simulations n'ont donc pas vocation à développer des comportements optimums (c'est à dire permettant de maximiser l'utilisation des infrastructures étudiées) mais bien de reproduire les comportements tels qu'ils peuvent être observés sur la route.

Nous présentons maintenant différentes avancées que les SMA ont permis d'apporter à la simulation du trafic routier, et en quoi elles ont permis d'améliorer et de dépasser ce que permet l'approche microscopique usuelle.

3.3.1 Perception et représentation de l'environnement

Nous nous concentrerons dans un premier temps sur les travaux relatifs au processus de perception d'agents conducteurs. La perception fournissant l'information qui sera ensuite traitée par la décision, il est important de commencer par ce point.

3.3.1.1 Vision égocentré

Un pas important permettant de reproduire le processus de prise de décision des conducteurs réels est de pouvoir aboutir à une représentation de l'environnement similaire à celle qu'ils manipulent.

Deux façons qu'un humain a de se représenter son environnement sont généralement retenues [Gomez, 2009]. Il y a la représentation «égocentré» dans laquelle la position des objets est repérée de manière relative à celle de l'observateur et la représentation «allocentré» dans laquelle la position des objets est exprimée indépendamment de celle de l'observateur. Les modèles de comportement de véhicules microscopiques que nous avons présentés jusque là utilisent une représentation allocentrale. La position des véhicules est donnée de manière absolue par son avancement sur la route (son «pk», généralement noté x_i). Or, la représentation humaine des objets proches est de type ego-centrée.

Dans cette optique, [Espié et al., 1994] a utilisé des travaux issus du domaine de la psychologie de la conduite afin d'identifier les éléments pertinents pris en compte par les conducteurs afin de reproduire leur perception et représentation. Ces travaux sont à l'origine du modèle ARCHISIM dont nous reparlerons ultérieurement.

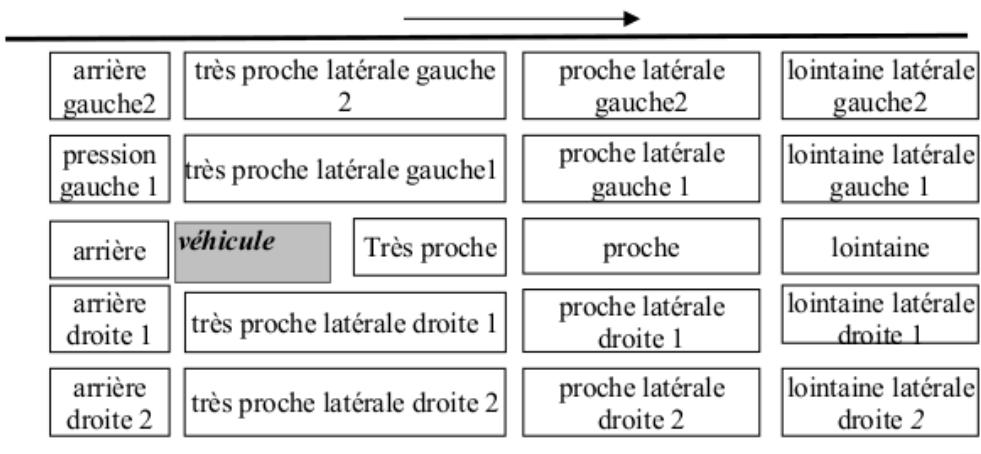


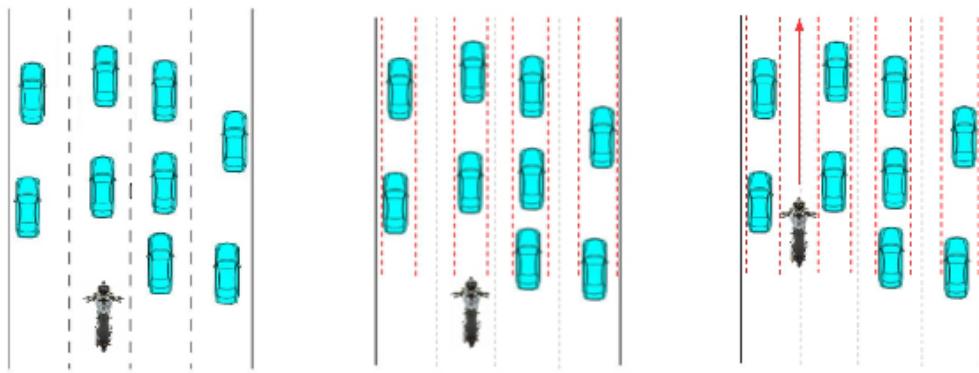
FIGURE 3.4 – Découpage de l'environnement entourant le conducteur en zones cohérentes.
Extrait de [El Hadouaj, 2004]

Les travaux de [Saad, 1994] ont ainsi permis d'aboutir à une représentation de l'environnement centrée sur le conducteur se découplant en zones autour de lui selon les axes longitudinaux et latéraux (droite, gauche et arrière, avant proche, avant, avant loin-

tain etc.). Ceci est illustré dans la figure 3.4, extrait de [El Hadouaj, 2004] et étend la perception à deux voies à droite et à gauche.

Plutôt que de percevoir un ensemble de véhicules, le conducteur peut ainsi percevoir des propriétés concernant chacune des zones d'intérêt telles que la vitesse du flux de véhicules, la stabilité du flux, la densité etc. et se servir de ces informations de haut niveau pour fonder sa décision (principalement de changement de voie dans le cas présenté ici). Ceci permet d'introduire la notion d'imergence. Il s'agit de l'influence que les phénomènes émergents peuvent avoir sur les comportements individuels. Ici les conducteurs perçoivent des propriétés du trafic sur des zones (donc des phénomènes émergents puisque observés au niveau macroscopique) et peut en prendre compte dans son comportement individuel.

Cette introduction d'informations agrégées et relatives à l'agent permet de simplifier la description de ses comportements.



(a) Vision ego-centrée conventionnelle de l'environnement routier
(b) Identification de voies virtuelles possibles
(c) Sélection d'une voie virtuelle pour remonter entre les voitures

FIGURE 3.5 – Perceptoin ego-centrée et adaptée à la tâche courante. L'identification de voies virtuelles entre les voies conventionnelles permet aux motos de se faufiler entre les autres véhicules.

Un autre avantage à utiliser une perception ego-centrée est qu'elle peut être adaptée à la tâche en cours. Cela est illustré par [Ksontini et al., 2012, Ksontini et al., 2013]. Dans cette approche, la perception de l'environnement est spécialisée afin de pouvoir faire apparaître des éléments non conventionnels. Alors que les véhicules sont usuellement répartis par voies de circulation, il est fréquent que les conducteurs de deux roues identifient des voies intermédiaires leurs permettant de se faufiler (pratique connue sous le nom de «remontée de files»).

3.3.1.2 Perception incomplète

Dans la plupart des approches que nous avons présentées jusqu'ici, l'agent conducteur dispose d'une perception exacte et complète de son environnement proche. Cependant, un conducteur réel ne peut percevoir l'ensemble de ce qui se passe autour de lui.

Pour reproduire cette limitation, [Ketenci et al., 2010] introduit la notion de perception limitée. Dans cette approche, un conducteur ne peut percevoir à un instant donné qu'un nombre limité de percepts. Un percept est l'élément atomique qui peut être perçu, il représente une connaissance. L'auteur étudie donc principalement en quoi une perception restreinte dégrade la prise de décision. Il s'intéresse tout particulièrement au processus de sélection d'information qui peut

- soit être orienté par les buts (dite «*top-down*») : le conducteur cherche à détecter l'information qui lui sera utile dans sa tâche. Par exemple, il cherche les véhicules pouvant entrer en conflit avec lui sur la trajectoire qu'il va suivre,
- soit être dû à la saillance de l'information (dite «*bottom-up*») : un conducteur perçoit un obstacle dangereux apparaissant dans son champ de vision (par exemple un piéton surgissant sur la chaussée).

Les éléments perçus par le conducteur sont donc un sous ensemble des percepts issus de ces deux catégories.

3.3.2 Processus de décision

Le second aspect de la modélisation d'agents conducteurs ayant largement profité de contributions issues des systèmes multi-agents est le processus de décision. L'introduction de différentes méthodes de conception permet de passer d'agents réactifs simples tels que peuvent l'être les modèles classiques à base d'équations à des modèles d'agents délibératifs capables d'analyser une situation de conduite et d'anticiper son évolution future.

3.3.2.1 De nouvelles façons de décrire le comportement

L'un des premiers apports que nous soulignons pour la description des processus de prise de décision des conducteurs est l'élargissement des langages utilisables. Nous pouvons effectivement remarquer que dans la partie 2.3, les équations dynamiques sont presque exclusivement utilisées pour décrire les comportements de suivi. La rencontre avec d'autres domaines et notamment celui de l'intelligence artificielle permet donc d'utiliser l'ensemble des outils associés à cette discipline pour décrire des comportements. Ceci ouvre donc la voie à l'utilisation de tout langage de description d'algorithmes ou de processus de prise de décision.

Ainsi, pour tenter de modéliser des comportements d'agents conducteurs, et en se fondant sur une description à base de règles des comportements qu'ils doivent avoir, [Kikuchi and Chakroborty, 1992] proposent une approche utilisant la logique floue. Cette approche permet d'introduire de la variabilité des comportements des conducteurs allant au delà de l'utilisation d'un jeu de paramètres différents.

Une autre approche à base de règles est celle prise par [Espié et al., 1994]. Nous avons

déjà rapidement présenté cette contribution via l'aspect perception du modèle ARCHISIM. Nous présentons maintenant la gestion des interactions entre les conducteurs. De manière analogue à la modélisation de la perception, celle de la décision est faite depuis les observations de [Saad, 1994]. Dans ce contexte, une interaction correspond au fait qu'un conducteur doit prendre d'autres conducteurs en considération dans sa conduite (ce qui peut être assimilé au régime constraint du modèle de NEWELL). Quand un conducteur subit une interaction, il la caractérise en contrainte courte ou longue selon le temps qu'il estime qu'elle va durer. Une contrainte courte sera amenée à disparaître prochainement tandis qu'une contrainte longue est pérenne. Enfin, le conducteur évalue s'il dispose d'un moyen de supprimer l'interaction notamment en effectuant un changement de voie. Selon ces différents éléments d'analyse, l'une des règles de conduite présentée dans la figure 3.6 est appliquée.

- Suppression d'interaction
 1. Interaction + longue durée + Possibilité de suppression => suppression de l'interaction
- Adaptation
 2. Interaction + courte durée + possibilité de suppression => adaptation de courte durée
 3. Interaction + courte durée + impossibilité provisoire de suppression => adaptation de courte durée
 4. Interaction + longue durée + impossibilité durable de suppression => adaptation de longue durée

FIGURE 3.6 – Exemples de règles de gestion des interactions proposées par [Saad, 1994], mises en oeuvre par [El Hadouaj, 2004]

L'introduction de ces règles simples et de haut niveau permet alors de décrire des comportements riches et complexes fortement dépendants du contexte de chaque agent.

3.3.2.2 Gestion de conflits

Outre cet aspect formel, l'approche multi-agents permet l'étude et la simulation de tâches de conduites complexes telles que la gestion de conflits à la traversée des intersections. Dans une approche microscopique classique, il est possible de contourner la difficulté en utilisant une forme d'intelligence centrale régulant la traversée de l'intersection. Par exemple, un système de jetons, assurant que seul un véhicule peut traverser l'intersection, permet d'assurer une politique de gestion (non optimale) du carrefour. Il est également envisageable d'utiliser un ordonnanceur plus fin pour permettre de résoudre le problème de manière globale, solution qui serait plutôt optimiste par rapport à ce que des conducteurs réels peuvent réussir à obtenir.

Or, si l'objectif est de simuler la tâche de conduite, la solution ne peut être globale. Chacun des conducteurs doit prêter attention aux autres et s'assurer une trajectoire sans

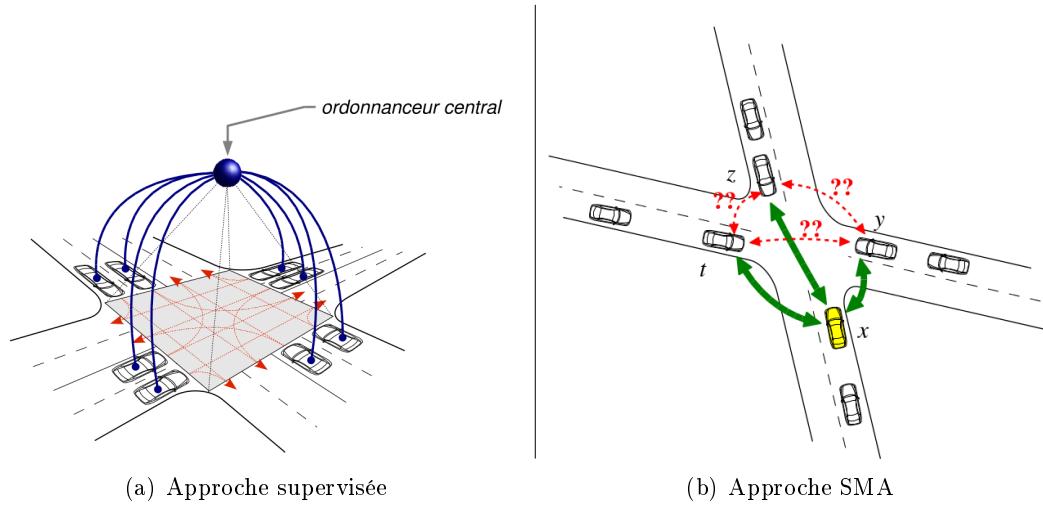


FIGURE 3.7 – Différentes approches pour la gestion des conflits en zone d’intersection. Une microscopique simple (3.7(a)) consiste à utiliser un ordonnanceur central disposant de suffisamment d’informations pour résoudre les conflits globalement et guider les véhicules dans la zone d’intérêt. Dans l’approche SMA (3.7(b)) chaque véhicule ne dispose que d’une vision limitée de l’environnement (état de la route, véhicules avec lesquels il est en conflit...) et doit élaborer une stratégie sans savoir comment les autres véhicules envisagent de traverser l’intersection. Figures extraites de [Doniec, 2006].

collision vers la sortie du carrefour. La solution globale peut être envisagée afin d’assurer une résolution des conflits (optimale ou non) mais ne reflétera en aucun cas l’utilisation que des conducteurs réels pourraient faire de l’intersection.

Certains auteurs ont donc utilisé différentes techniques issues de la littérature de l’intelligence artificielle pour simuler le comportement de conducteurs intelligents placés dans une situation de conflit :

- [Champion, 2003] a ainsi utilisé la théorie des jeux pour déterminer quelle stratégie est gagnante pour un conducteur (étant donné qu’il ne connaît pas la stratégie des autres acteurs entrant en conflit avec lui).
- [Doniec, 2006] s’est intéressé à la même problématique mais a utilisé des techniques basées sur la résolution de réseaux de contraintes pour obtenir des agents capables d’anticipation et d’opportunisme.

Ces approches de modélisation permettent ainsi de rendre compte de la complexité de la tâche de traversée de carrefour. Elles proposent des solutions reflétant l’utilisation qui pourrait être réellement faite d’une infrastructure par des conducteurs réels.

3.4 Conclusion

Dans cette partie, nous avons tout d'abord présenté l'approche multi-agents. Nous avons ensuite exposé comment celle-ci permet d'appréhender et de mettre en œuvre des modèles de comportement de conducteurs adaptés à la simulation microscopique du trafic routier. Il apparaît ainsi que cette approche vient dans le prolongement et en complément de l'approche microscopique « classique » présentée dans le chapitre 2.

Nous avons présenté différents apports issus du domaine des systèmes multi-agents qui ont permis d'enrichir les simulations de trafic, et plus particulièrement le comportement des véhicules simulés. Ces apports portent sur deux principaux aspects : la modélisation du processus de perception des conducteurs ainsi que la modélisation de leur processus délibératif, ce qui permet une description riche des comportements et des interactions existants entre les différents agents. De plus, cette approche s'intéresse tout particulièrement à la reproduction de comportements observables et non à la conception de comportements idéalisés permettant d'aboutir à la reproduction de phénomènes macroscopiques anticipés. Cette approche, selon laquelle une reproduction adéquate des comportements permet d'aboutir à l'émergence de phénomènes cohérents à l'échelle de la population, permet d'assurer une meilleure robustesse des modèles individuels produits.

Nous avons également évoqué en quoi l'approche multi-agent est particulièrement adaptée au développement incrémental de modèles. Pour un système donné, il est possible d'améliorer les comportements individuels afin de les spécialiser, et ce, tout en gardant les acquis du modèle existant. Ainsi, les propriétés du groupe peuvent être améliorées sans pour autant perdre les capacités descriptives initiales des modèles.

Nous souhaitons donc utiliser ces propriétés et identifier si dans notre cas applicatif il est possible de tirer profit des avancées existantes afin de concevoir un modèle de comportement particulier : celui d'un véhicule poids lourd. Aucun des modèles présentés n'est suffisant pour représenter le comportement de ces véhicules particuliers. Cependant, certains aspects de leur conduite sont similaires à la conduite de véhicules légers. Nous allons donc présenter comment nous améliorons et spécialisons un modèle existant.

Chapitre 4

Outils et méthodes de travail

Sommaire

4.1	Introduction	53
4.2	La plate-forme ARCHISIM	54
4.2.1	Objectifs de la plate-forme ARCHISIM	54
4.2.2	La gestion du temps	56
4.2.3	Architecture basée sur un serveur de vision	57
4.2.4	Outils associés	60
4.3	Méthodes de développement	61
4.3.1	Limites des méthodes généralistes pour le développement des SMA	61
4.3.2	Méthodes de développement de système à base d'agents	63
4.3.3	Méthodes de conception itératives	66
4.4	Vers une méthode de développement incrémental : VIM4MAS	70
4.4.1	Présentation générale	70
4.4.2	Facette du comportement et système	71
4.4.3	Implémentation dirigée par la vérification	73
4.4.4	Planification	75
4.5	Conclusion	75

4.1 Introduction

Les chapitres 2 et 3 ont été l'occasion de présenter d'une part le contexte applicatif et d'autre part le contexte théorique dans lequel s'inscrivent les travaux présentés dans ce document. Comme nous l'avons précédemment évoqué, l'objectif de ces travaux est de proposer un modèle permettant de prendre en compte les spécificités des véhicules lourds dans les simulations de trafic routier réalisées à l'aide de systèmes à base d'agents. Nous cherchons donc à proposer une solution venant améliorer une base pré-existante, ou au moins pouvant interagir avec elle. Cette solution de base doit permettre d'une part de fournir un contexte d'exécution permettant la mise en oeuvre d'un nouveau modèle

de véhicules lourds, et d'autre part permettre de mettre en oeuvre le trafic dans lequel évolueront les véhicules nouvellement modélisés. Nous présentons donc dans ce chapitre, dans la partie 4.2, la plate forme de simulation que nous avons retenue pour mettre en oeuvre et simuler des déplacements de véhicules. Cette plate-forme sera utilisée tout au long des travaux présentés, que ce soit pour les différentes expérimentations liées au développement de la méthode d'étude de comportements que nous présenterons dans le chapitre 5 ou bien pour permettre la mise en oeuvre du modèle de véhicule lourd que nous proposons dans le chapitre 6.

Par ailleurs, nous avons pu entrevoir dans le chapitre précédent qu'il est possible d'envisager le développement de modèles d'agents de manière incrémentale¹. Bon nombre de modèles sont construits sur la base de travaux antérieurs, et peuvent ainsi se focaliser sur l'ajout, l'amélioration ou la spécialisation des comportements. Nous proposons de nous inscrire dans cette lignée et de tirer le meilleur parti des travaux déjà menés. Nous discutons dans la partie 4.3 des méthodes de conception logicielles appliquées aux systèmes multi-agents, avant de proposer en section 4.4 une méthode incrémentale de conception fondée sur la vérification qui servira à guider le déroulement de nos travaux.

4.2 La plate-forme de simulation «ARCHISIM»

Afin de servir de base à l'implémentation de nos travaux, nous avons choisi d'utiliser la plate-forme de simulation ARCHISIM. Cette plate-forme dédiée à la simulation du trafic routier, est développée au sein de l'IFSTTAR, et a été le support de nombreux travaux de recherche tels qu'illustrés dans [Espié, 2004].

La plate-forme ARCHISIM est, depuis sa création, une plate-forme de simulation microscopique permettant de faire interagir différents acteurs indépendants sur une même infrastructure routière. Cette approche a permis à bon nombre des travaux présentés dans le chapitre 3 d'être développés sur cette plate-forme.

4.2.1 Objectifs de la plate-forme ARCHISIM

La plate-forme de simulation ARCHISIM a été développée afin de répondre à deux besoins de simulateurs différents.

Tout d'abord, la plate-forme peut être utilisée à des fins de simulation usuelles du trafic routier. Elle peut faire interagir un grand nombre d'entités autonomes simulées dans l'objectif de reproduire un flux de véhicules cohérent. Cette approche de simulation se situe donc directement dans la lignée de la simulation microscopique qui stipule que des comportements individuels pertinents sont suffisants pour faire émerger les phénomènes macroscopiques d'intérêts.

1. L'approche incrémentale est à distinguer des approches itératives. Dans une approche incrémental, chaque cycle de développement a pour objet l'ajout ou la modification d'une fonctionnalité alors que dans un processus itératif, une itération correspond au déroulement d'un cycle de développement comprenant analyse, conception, implantation et tests, sans pour autant nécessairement modifier le comportement du logiciel produit.

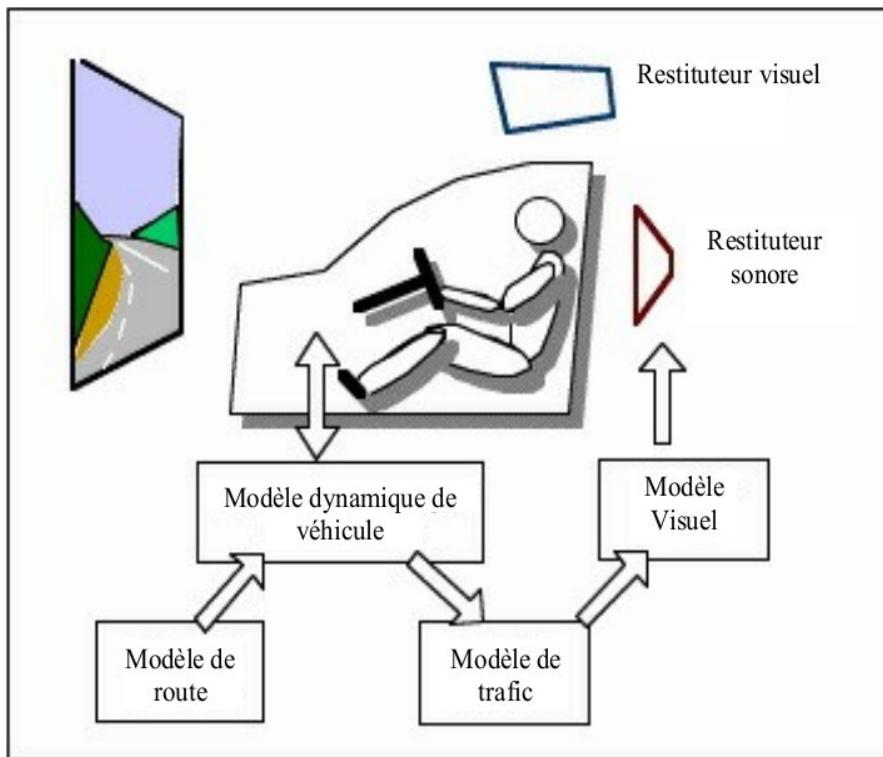


FIGURE 4.1 – Un conducteur réel peut piloter un véhicule impliqué dans une simulation ARCHISIM. Figure issue de [El Hadouaj, 2004]

Outre cette première facette de simulation de la conduite, la plate-forme ARCHISIM est également conçue pour permettre la réalisation d'un simulateur de conduite. Dans cette configuration, un (ou plusieurs) des acteurs engagés dans la simulation peut être dirigé par un (ou des) conducteur(s) humain(s). À l'aide d'un dispositif permettant de projeter l'environnement routier dans lequel se situe le véhicule et d'un dispositif permettant de connaître les actions de la personne immergée dans le simulateur (généralement à l'aide d'un volant et un pédalier), il est possible de faire conduire un véhicule virtuel à un conducteur humain comme illustré par la figure 4.1. L'objectif d'un tel dispositif est principalement de pouvoir étudier les comportements de conduite de conducteurs réels dans un environnement contrôlé. Ce type de dispositif est tout particulièrement utilisé par les psychologues de la conduite cherchant à comprendre le processus cognitif des conducteurs réalisant une tâche de conduite.

La mise en place d'un tel dispositif a pour objectif principal de permettre la synergie de deux domaines, les avancées de l'un enrichissant l'autre et *vice-versa*. En effet, l'amélioration des comportements des véhicules simulés permet de reproduire plus fidèlement les situations de conduite dans lesquelles un utilisateur réel peut être immergé. Plus les situations simulées font intervenir des entités dont les comportements sont proches de ceux d'entités réelles, plus les simulations des tâches de conduite peuvent être crédibles.

pour l'utilisateur. Ceci permet ainsi de faciliter l'étude de sujets humains dans des situations de conduite. Dans l'autre sens, les études des comportements de conducteurs réels permettent d'obtenir une meilleure connaissance de la tâche de conduite et permettent donc d'améliorer les modèles de comportement utilisés.

Sous réserve de la véracité du postulat selon lequel des comportements individuels justes permettent de faire émerger un trafic macroscopique juste, cette approche permet un processus d'amélioration continue des modèles microscopiques utilisés. Cette approche de la modélisation peut donc être vue comme les prémisses de la méthode de conception que nous présenterons dans la seconde partie de ce chapitre. Les études réalisées avec des conducteurs humains permettent, par analogie, d'identifier des lacunes des modèles de conducteurs simulés qu'il faut par la suite corriger.

Cette propriété qu'a la plate-forme ARCHISIM de pouvoir être utilisée dans différents cas d'études a un impact sur les propriétés des modèles utilisés dans celle-ci. En particulier, nous avons évoqué le fait que la plate-forme pouvait être utilisée afin d'étudier un conducteur humain plongé dans une situation routière contrôlée et reproductible. Afin de pouvoir assurer la reproductibilité des comportements des véhicules simulés, le parti a été pris d'utiliser des modèles de comportement déterministes. Ainsi, dans deux situations identiques (obtenues grâce au re-jeux d'une situation), les acteurs impliqués doivent adopter le même comportement. Cette contrainte n'est donc pas une contrainte forte imposée aux modèles développés dans cette plate-forme, mais impacte grandement l'usage qui peut être fait des modèles proposés pour cette plate-forme.

4.2.2 La gestion du temps

Le premier point important à aborder est la gestion de l'écoulement du temps tel qu'opéré par ARCHISIM. Les choix présents ici sont particulièrement importants puisqu'ils limitent l'utilisation de la plate-forme à l'exécution d'une classe de modèles réduite.

ARCHISIM est une plate-forme de simulation à temps discret. Ainsi, chaque simulation est décomposée en une séquence d'étapes faisant évoluer le système complet d'un état à un autre. La durée d'un pas de temps est paramétrable par l'utilisateur de la plate-forme selon son besoin. Cependant, la plate-forme étant conçue pour pouvoir intégrer en temps réel les actions effectuées par un conducteur présent dans un simulateur, la durée usuelle d'un pas de temps est inférieure à 0.01s. En conséquence, les modèles de comportement implantés dans la plate-forme supposent l'utilisation de pas de temps de cet ordre. Par ailleurs, pour pouvoir effectuer des simulations en temps réel, la plate-forme est capable d'ajuster la durée de chaque pas de temps simulé. Ceci permet à la plate-forme d'assurer que le temps de calcul nécessaire pour déterminer le déplacement des véhicules durant un pas de temps donné n'excède pas le temps simulé.

Nous pouvons utiliser la plate-forme ARCHISIM pour exécuter tout modèle à temps discret. Cette classe de modèles est la plus rependue dans la littérature. L'intégration d'autres types de modèles, ne fonctionnant pas sur un principe de temps discret, est possible avec la plate-forme ARCHISIM. Par exemple, mécanisme d'interfaçage au serveur de vision permet de «connecter» un agent humain au système.

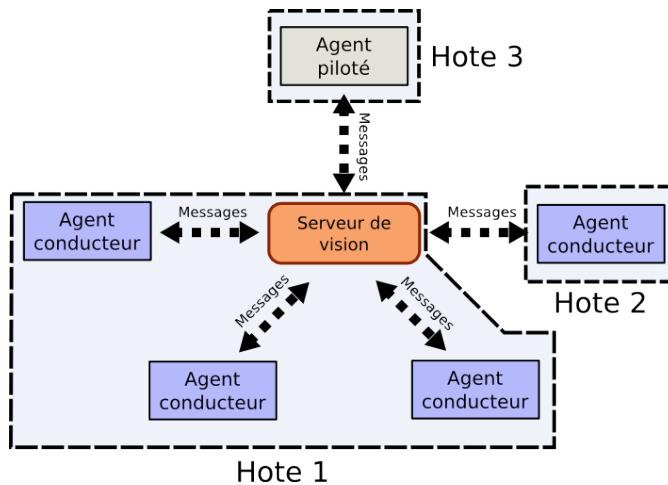


FIGURE 4.2 – Architecture d’ARCHISIM autour d’un serveur de vision. Exemple de déploiement sur trois machines reliées par un réseau.

4.2.3 Architecture basée sur un serveur de vision

Le modèle sous-jacent à la plate-forme de simulation ARCHISIM est organisé autour d'un serveur de vision. Ce serveur concentre l'ensemble des informations relatives à l'état du monde ainsi que l'ensemble des éléments perceptibles par chacun des agents impliqués dans la simulation. Pour chacun des pas de temps que composent la simulation, chacune des entités va ainsi pouvoir contacter cette entité centrale afin d'obtenir une vision ego-centrée de son environnement.

Ce type d'architecture, dont un exemple de déploiement envisageable est proposé en Figure 4.2 dispose de plusieurs points forts.

4.2.3.1 Interface de communication

Le premier avantage à utiliser une telle infrastructure est que les échanges entre les entités impliquées dans la simulation et son cœur — le serveur de vision — se limitent à une quantité limitée d'envoi de messages.

La figure 4.3 présente le déroulement d'un pas de temps impliquant deux agents.

Un pas de simulation se déroule donc selon trois phases distinctes :

- Dans un premier temps chaque agent adresse au serveur de vision une requête de vision. En réponse à cette requête il reçoit une liste des objets perceptibles autour de lui en réponse. La perception de chaque agent est «ego-centrée», c'est à dire qu'elle est propre à chaque agent et l'information qu'elle contient est exprimée en fonction de sa localisation.
- Ensuite, chaque agent peut, selon tout moyen qui lui est propre, décider des actions qu'il entreprend durant le pas de simulation. Cette décision peut être réalisée de manière totalement réactive si l'agent réagit simplement à des *stimuli* présents dans les éléments reçus du serveur de vision. Au contraire, l'agent peut se servir d'une

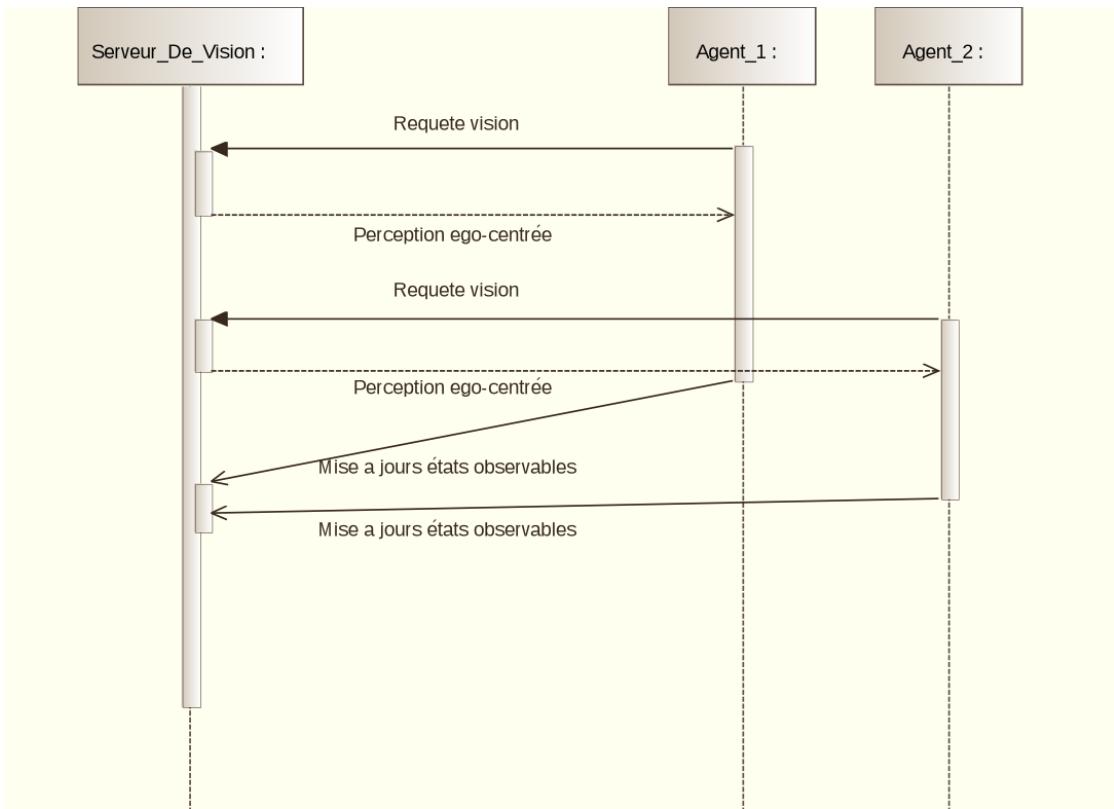


FIGURE 4.3 – Déroulement simplifié des communications entre le serveur de vision et les agents pour un pas de temps. À chaque pas de temps de la simulation, chaque agent contacte le serveur de vision pour obtenir les éléments qu'il est en mesure de percevoir, et en fonction de cela ainsi que de son état interne retourne au serveur de vision ses nouveaux états observables (position, clignotants...). Dans le déroulement réel, la requête de vision du pas de temps n est fusionnée avec l'envoie de la mise à jours des états observables du pas de temps $n - 1$.

mémoire propre pour prendre sa décision ou exécuter un plan d'action qu'il aurait préalablement élaboré.

- Enfin, l'agent envoie un message au serveur de vision le notifiant de la conséquence de ses actions sur l'environnement et ses états observables. En particulier, si l'agent pilote un véhicule dans la simulation, ce message contient des informations relatives au déplacement effectué par son véhicule durant le pas de simulation ainsi que le changement d'informations perceptibles par d'autres usagers telle que l'activation de clignotants indiquant une volonté de changer de voie.

Cette architecture est donc simplement extensible et ne fait que peu de pré-supposés sur la nature des agents présents. Entre autre, cette propriété permet de concevoir un agent particulier dont le fonctionnement consiste à afficher à un conducteur les informations perçues et à retourner le résultat des actions de l'utilisateur, celle-ci étant le résultat

de l'action des commandes du conducteur sur un modèle de dynamique de véhicule conduit.

Cette même interface peut également être utilisée pour implémenter des contrôleurs n'effectuant aucune tâche de conduite. Par exemple, un contrôleur de feu ne nécessite aucune perception des véhicules à son alentour et retourne pour chaque pas de temps son influence sur un feu tricolore (changement d'état ou non). À l'opposé du contrôleur de feu, des contrôleurs n'influencant aucunement le monde existent. Ainsi des contrôleurs «capteurs» peuvent recevoir à chaque pas de temps les informations concernant les véhicules le franchissant et ainsi les compter comme le ferait des boucles électromagnétiques installées sur une infrastructure réelle.

Un agent intéressant à cet égard est l'agent de re-jeux. Cet agent est utilisé pour reproduire l'ensemble des actions précédemment enregistrées d'un conducteur, généralement humain. Ainsi, pour reproduire une simulation ayant impliqué un conducteur humain et pouvoir l'étudier a posteriori, il est suffisant d'utiliser un agent reproduisant la séquence d'action enregistrée lors de l'expérimentation avec le sujet pour reconstruire entièrement la simulation. Cette technique permet, en reproduisant le flux de messages précédemment observé, d'obtenir un outil permettant à un sujet d'observer sa prestation et de la commenter. L'utilisation fréquente de cette technique par les utilisateurs de la plate-forme ARCHISIM est la seconde raison pour laquelle les modèles implantés dans cette plate-forme doivent être déterministes.

4.2.3.2 Ordonnancement et «balises fantômes»

Le mode de communication présenté ci-dessus tel quel peut présenter des risques d'incohérence si par exemple lors d'un pas de temps un véhicule modifie sa position et son état avant d'être perçu par un autre véhicule. Dans ce cas, le second véhicule pourrait prendre sa décision en fonction d'une action que le premier véhicule n'aurait virtuellement pas encore effectué. Ceci poserait entre autre un problème de dépendance de la simulation à l'algorithme d'ordonnancement utilisé pour exécuter l'action de chacun des agents. Ce type de dépendance à l'ordonnancement entraverait l'objectif d'obtenir des simulations totalement reproductibles.

Afin de palier à cela, le concept de «balise fantôme» a été introduit dans la plate-forme ARCHISIM. Au début de chaque pas de simulation, et avant de commencer à recevoir les requêtes de perception des agents, le serveur de vision sauvegarde l'état du monde sous la forme d'un ensemble de traces fantômes des différents objets présents sur l'infrastructure. Suite à cela, à chaque requête de perception, l'information renvoyée est extraite de cette ensemble de traces et le résultat des actions envoyées par les acteurs peuvent directement être appliqués au monde.

4.2.3.3 Parallélisation naturelle

L'architecture organisée autour d'un serveur de vision que nous venons de présenter permet de simplement répartir la charge de traitement liée à l'exécution des agents. En effet, rien n'empêche l'utilisation d'un ensemble de ressources distinctes pour chacun des

agents simulés étant donné que leurs interactions se limitent à des envois et des réceptions de messages au serveur de vision.

De plus, ceci permet d'envisager des dispositifs de déploiement tels que présentés dans la figure 4.2 où une partie des messages sont envoyés via un réseau et où donc différents ordinateurs peuvent être utilisés simultanément.

Il est cependant important de noter que cette organisation comporte un noeud de congestion. L'ensemble des messages est adressé au serveur de vision qui a une forte charge de travail :

- il concentre l'ensemble des informations concernant les positions et les états observables de l'ensembles des entités présentes dans le monde,
- il doit produire une vision égo-centrée pour chaque requête de perception qui lui est adressée,
- il doit maintenir la cohérence de l'état du monde en fonction de l'ensemble des actions que les acteurs peuvent y apporter.

Bien que l'approche apporte de grandes facilités de montée en charge pour effectuer des simulations impliquant un grand nombre d'entités, il apparaît évident que celui-ci sera limité. A notre connaissance, le seuil critique à partir duquel l'ajout de nouvelles entités dégrade les performances du système n'a pas été étudié. Malgré cela, l'ensemble des travaux que nous avons eu à mener impliquant un nombre mesuré d'entités, ce goulot d'étranglement n'a pas été atteint. Lorsque l'a plate-forme est utilisée en mode «temps réel» (par exemple lorsqu'un sujet humain pilote un avatar), la charge critique du système est plus basse. N'ayant pas eu besoin d'un tel fonctionnement durant nos travaux, nous n'avons pas évalué ce seuil.

4.2.4 Outils associés

Notre choix d'utiliser la plate-forme ARCHISIM afin de supporter notre modèle de simulation est également lié à l'ensemble d'outils qui l'accompagnent. Ces outils permettent entre autre d'assister l'utilisateur dans la description des réseaux utilisés ainsi que dans la description du trafic évoluant sur celui-ci. L'objet de la majorité de ces outils sortant largement du cadre de notre étude, nous ne présenterons donc ici que ceux ayant été un atout dans nos travaux.

La plate-forme permet de gérer un ensemble de véhicules dits «asservis». Le comportement de ces véhicules n'est pas déterminé par un modèle de comportement mais par un scénario pré-établi par le modélisateur. Ceci permet de faire circuler sur les infrastructures des véhicules dont le comportement est explicitement décrit par l'utilisateur grâce à un langage dédié. Ce langage permet de spécifier chacune des caractéristiques observables du véhicule à tout instant comme par exemple sa vitesse, son accélération ou la voie de circulation sur laquelle il évolue. Ces véhicules sont utilisés afin de générer des situations de trafic particulières. Par exemple, des véhicules lents sont utilisés pour reproduire l'effet d'une congestion dans laquelle la vitesse des véhicules est faible, chacun des véhicules suivant les véhicules asservis devant s'adapter à l'obstacle qu'ils représentent sur la route. Bien sur, le comportement de ces véhicules ne dépendant pas de leur

environnement, ils sont «aveugles» et leur utilisation doit donc être précautionneusement anticipée.

La plate-forme de simulation est également munie d'un outil de génération de trafic permettant de créer un fichier décrivant la demande associée à une infrastructure. Cet outil est utilisé afin de générer un trafic pouvant répondre à différentes critères tels que :

- une génération d'une population dont les paramètres suivent une loi donnée,
- un débit constant sur toute la période de simulation,
- un débit variable au cours de la simulation.

4.3 Méthodes de développement

Nous présentons dans cette section un état des lieux concernant les méthodes de développement de logiciels. Nous présentons et discutons les méthodes dédiées au développement de systèmes multi-agents ainsi que certaines méthodes généralistes dont nous nous inspirons.

Le développement incrémental est particulièrement adaptée à l'élaboration de systèmes multi-agents. Un cycle de développement incrémental est un cycle dans lequel la solution logicielle est bâtie par étapes, en ajoutant une ou des fonctionnalités (incrément(s)) à chacune de ces étapes. Une partie des modèles présentée dans le chapitre 3 tire avantage de cette propriété et sont construits sur la base d'un modèle existant, en se concentrant sur le développement d'un des aspects qui intéresse le modélisateur². Ainsi [Luo and Bölöni, 2012] proposent un modèle basé sur le modèle IDM [Treiber et al., 2000b], en se concentrant sur les aspects stratégiques des conducteurs. Les bases offertes par le modèle d'origine (capacité de suivi d'un véhicule) ne sont pas remises en cause et le modèle peut être enrichi.

Cependant, les méthodes de conception de solutions logicielles usuelles ne sont en général pas applicables dans leur ensemble au développement des systèmes de simulation à base d'agents. Il en va donc de même pour les cycles de développement incrémentaux, et ce, pour différentes raisons. Malgré ces difficultés que nous évoquerons ci-dessous, l'utilisation de procédures de développements assurant la qualité et l'exactitude des codes produits est particulièrement critique, comme le souligne [Hayden, 2013]. La qualité des résultats scientifiques obtenus à l'aide de codes informatiques produits en dehors de cadres de développement suffisamment rigoureux est fortement affectée. Le processus de conception et d'implémentation de modèles à base d'agents ne déroge pas à cette règle, et s'assurer de l'utilisation de méthodes adaptées à leurs spécificités montre donc tout son intérêt.

4.3.1 Limites des méthodes généralistes pour le développement des SMA

Les méthodes de génie logiciel s'intéressent à savoir comment produire un logiciel répondant aux besoins de ses utilisateurs. Les méthodes étudiées par cette discipline se

2. Acteur ayant la charge l'activité de modélisation

regroupent approximativement dans les quatre grandes phases du développement que sont l'*analyse*, la *conception*, l'*implantation*, le *test* et le *déploiement*. L'*analyse* est la phase durant laquelle les besoins de l'application à produire sont identifiés. Dans le cas du développement d'outils de simulation, cette phase identifie quelle est la question à laquelle l'outil de simulation doit permettre de répondre sur l'objet simulé. Le résultat de la phase d'*analyse* est une spécification de l'application à produire qui peut prendre diverses formes pouvant aller jusqu'à la description formelle du comportement du système. La phase de *conception* cherche à proposer un modèle conceptuel permettant de répondre aux besoins formulés dans l'*analyse*. Cette phase propose donc une architecture abstraite en s'appuyant sur différents outils de modélisation comme par exemple UML. La phase d'*implantation* a pour objectif de produire un modèle exécutable correspondant au modèle abstrait établi lors de la phase de conception. La phase de *tests* traite des questions de vérification et de validation. La question de la vérification cherche à savoir «si le modèle opérationnel a bien été produit», et donc s'il est en adéquation avec le modèle abstrait proposé et qu'il ne comporte pas d'erreur. L'activité de validation cherche à savoir si «le modèle opérationnel produit est le bon», donc s'il permet de répondre aux besoins identifiés dans la phase d'*analyse*. Enfin, dans la phase de *déploiement*, le logiciel est installé sur son architecture cible et est prêt à être utilisé.

Le principal point de difficulté de l'utilisation de méthodes de génie logiciel pour la conception de systèmes de simulation multi-agents est lié au principe d'émergence qui est recherché par de tels systèmes. Cette approche postule, comme nous l'avons déjà évoqué dans le chapitre 3, que la modélisation des comportements des composants individuels du système est suffisante pour faire émerger le comportement du tout. Ceci est particulièrement vrai dans le cas du développement d'outils de simulation du trafic routier à base d'agents, où seuls les véhicules sont modélisés, jamais le trafic lui-même. Or, les processus de développement usuels sont, eux, dirigés par les buts. Ils sont généralement fondés sur une première étape de capture des besoins, donc l'objectif est de déterminer quel est le comportement attendu du système à produire. Ces comportements correspondent généralement à un besoin applicatif (produire un simulateur permettant de reproduire une ou des propriétés d'un objet d'étude et répondre à une question sur cet objet d'étude) ou plus généralement à un besoin de conception ou d'évolution exprimé par un client ou utilisateur futur de la solution logicielle produite.

Or, il y a une fracture entre une approche où le développement est orienté par le but recherché d'un côté et un développement où le résultat final n'est pas nécessairement anticipé par le modélisateur. Quand le comportement final n'est pas anticipé, et ce intentionnellement, il apparaît contradictoire d'appliquer des méthodes faites pour aboutir à un résultat souhaité.

De plus, comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, une difficulté supplémentaire apparaît. Dans le cas de simulations à base d'agents, seuls les comportements des agents sont spécifiés (généralement par une analogie au comportement d'une entité du monde réel qui est observable). Or, Les agents ne sont pas l'objet de l'outil de simulation à produire. Il n'est donc pas possible de parler de validation du modèle d'un agent. L'activité de validation est en charge, comme nous l'avons rappelé plus haut, d'assurer l'adéquation

entre le modèle produit et le modèle désiré. En ce qui concerne la simulation à base d'agents, le modèle final désiré est l'agrégation de différents modèles d'agents, de modèles d'interactions, d'un modèle d'environnement... Seul cet agrégat peut être validé du point de vue des besoins des utilisateurs. Il ne peut donc pas être validé à proprement parlé. Il peut cependant être mené une activité de vérification sur les modèles d'agents, dans le but de vérifier que les comportements modélisés montrent bien les propriétés attendues dans le cadre du système. De ce point de vue, les systèmes de simulation à base d'agents ne peuvent être traités comme n'importe quel système d'information par les méthodes de génie logiciel.

4.3.2 Méthodes de développement de système à base d'agents

De nombreux travaux se sont intéressés aux méthodes de réalisation de modèles multi-agents. Une revue de différentes méthodes ainsi que de nombreuses références peuvent être trouvées dans [Gómez-Sanz et al., 2004]. Ainsi, une grande quantité de méthodes est disponible dans la littérature afin de guider le développement de systèmes à base d'agents. Nous pensons notamment aux méthodes Gaia [Zambonelli et al., 2001], Tropos [Bresciani et al., 2004], MaSE hfill[DeLoach et al., 2001], INGENIAS [Pavón et al., 2005], Prometheus [Padgham and Winikoff, 2003] ou AESEME [Spanoudakis, 2009] pour n'en citer que quelques-unes. Ces méthodes proposent des outils et démarches applicables dans le cadre de la capture des besoins, de l'analyse, de la conception et éventuellement de l'implantation. Gaia propose ainsi un cadre conceptuel permettant l'analyse et la conception d'un système à base d'agents centré sur le concept d'organisation. Cette méthode propose de décrire le système en terme d'agents, environnement, rôles, responsabilités, autorisations, règles et organisations. MaSE propose d'analyser le système par ses buts, et de définir les rôles servant à atteindre ces buts. Tropos lui se base sur la spécification de modèles grâce à *i** [Yu, 1995] afin de dériver un modèle concret exécutable sur la plate-forme Jack [Busetta et al., 1999]. *i** se base sur les concepts d'acteurs, de croyances, d'engagements et de buts pour décrire la structure d'une organisation et son système d'information. Ingenias ré-utilise des concepts et outils de RUP [Kruchten, 2004] en y ajoutant des concepts spécifiques aux systèmes multi-agents. Nous y retrouvons ainsi les concepts d'agent, de rôle, de tâche de but et d'organisation.

Bon nombre des méthodes disponibles fournissent un cadre permettant de comprendre et de spécifier une organisation en décrivant ses membres, leurs rôles, leurs buts, leurs interactions ou leurs moyens. Dans le cas général comprendre ces relations n'est pas une tâche aisée. Cependant, en ce qui concerne la conception d'un système de trafic à base d'agents, cette analyse est presque triviale. Les buts de chacun des agents sont indifférenciés, et ce, qu'ils soient poids lourds ou véhicules légers : atteindre sa destination en minimisant son temps de trajet. Les plans d'actions élaborés par les différents conducteurs sont similaires. Les contraintes propres à chaque agent font cependant que leurs exécution peut différer légèrement et entraîner des perturbations au niveau des populations de véhicules. Nos travaux se focalisent surtout sur l'identification et la reproduction de ces variations, dont les conséquences macroscopiques ne sont pas nécessairement bien anticipées. De plus, la littérature existante du trafic nous fournit une base suffisante

de modèles théoriques et opérationnels fonctionnels. Une partie des choix de conception sont donc réutilisables. Notre travail cherche à raffiner des modèles de comportements de manière à faire ressortir les variations entre les comportements des individus s'ils impactent l'écoulement du trafic. Les choix de conceptions déjà effectués ne sont *a priori* pas remis en cause, sauf s'ils montrent leurs limites.

Par ailleurs, [Galán et al., 2009] montrent en quoi l'interaction de nombreux modèles — qu'ils concernent les agents, l'environnement, les communications ou encore la plate-forme elle-même — entraîne un niveau de complexité accru. Pour aboutir à une implémentation fonctionnelle de chacun de ces composants, de nombreux choix *a priori* doivent être faits. Par exemple, une discrétisation de l'environnement spatial peut être nécessaire au développement de la plate-forme, et ce choix impactera nécessairement l'implémentation des agents évoluant dans ce monde, ainsi que les résultats de simulations. Cette difficulté d'exprimer l'ensemble des décisions nécessaires à la réalisation et éventuellement à la reproduction d'un système à base d'agents est la principale motivation des travaux de [Chevrier and Fatès, 2010]. Ils proposent une méthode de formalisation de systèmes à base d'agents visant à ne pas permettre la présence de choix implicites, qui empêcheraient l'appropriation et l'analyse du modèle par une tierce partie (utilisateur du modèle, re-lecteur apportant un regard critique sur le travail proposé...). Ils proposent une méthode de description d'un système multi-agents sous forme d'un système dynamique discret qui permet de décrire dans son intégralité le système³. Ils montrent entre autre comment un modèle simple, exprimé en langue naturelle peut être compris de différentes manières par différentes personnes, conduisant à la mise en œuvre de systèmes opérationnels dont les comportements sont significativement différents.

Le processus de modélisation et de développement d'un système de simulations (à fortiori d'un système de simulations multi-agents) implique différents rôles. Trois sont retenus selon [Meurisse, 2004, Drogoul et al., 2003] :

l'expert thématique (*«the thematician»* ou parfois appelé le «thématicien» dans la littérature) est l'acteur apportant une expertise sur le système modélisé et définissant les besoins applicatifs. Ceux-ci sont généralement exprimés de manière non formelle et peuvent donc contenir des ambiguïtés et des imprécisions (sous-entendus implicites compréhensibles par un expert thématique mais potentiellement inconnus aux autres acteurs).

le modélisateur (*«the modeller»*) est l'acteur qui, à partir du modèle non formel fourni par l'expert thématique, produit une version formelle du modèle, à l'aide d'un langage de modélisation.

l'implémenteur (*«the computer scientist»*) est l'acteur qui produit une version exécutable du modèle produit par le modélisateur. Ce rôle peut, comme nous le verrons ci-après, se décomposer en deux sous rôles : l'un devant produire un modèle adapté à l'implantation sur l'ordinateur et l'autre traduisant ce modèle dans un langage compilable ou interprétable par l'ordinateur (respectivement le *«computer*

3. Voir la section 3.2.2 pour une présentation plus approfondie de la méthode de spécification proposée par [Chevrier and Fatès, 2010].

scientist» et le «*programmer*» évoqués dans la figure 4.4). Cette dernière étape peut éventuellement être automatisée.

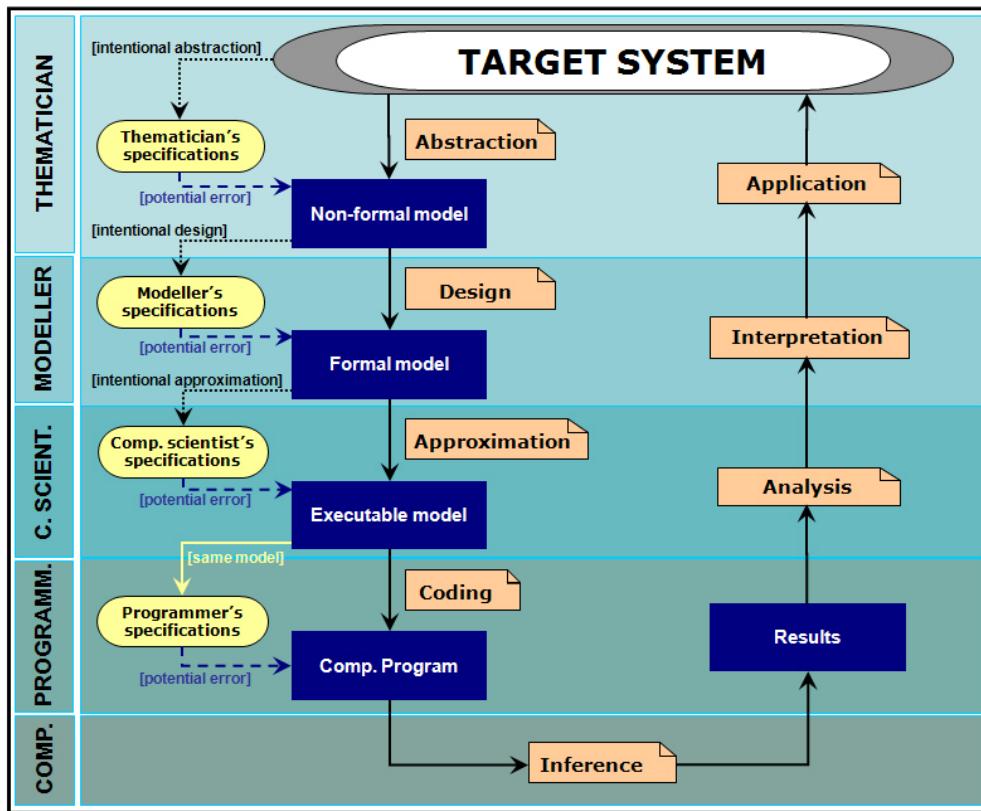


FIGURE 4.4 – Processus de conception d'un système multi-agents et interaction entre les différents acteurs de conception. L'interaction entre les différents acteurs peut introduire un grand nombre d'approximations. Figure issue de [Galán et al., 2009]

La figure 4.4, extraite de [Galán et al., 2009], schématise les interactions existant entre ces différents acteurs ainsi que les points auxquels des erreurs peuvent être faites et des approximations peuvent être introduites. Notons que cette figure représente quatre rôles parmi lesquels celui de *computer scientist* et de *programmer* correspondant au rôle d'implémentateur proposé par [Drogoul et al., 2003]. La compatibilité de ces découpages de rôles est discutée dans [Galán et al., 2009].

La difficulté liée à l'interaction entre différents acteurs, chacun disposant de méthodes et connaissances propres, confirme le besoin d'une méthode de travail qui puisse être appliquée au développement de systèmes multi-agents.

Dans l'objectif d'aboutir à un modèle de développement incrémental tenant compte des spécificités ainsi que des difficultés intrinsèquement liées aux systèmes multi-agents, nous proposons une méthode dirigée par la vérification. Nous présentons donc dans un premier temps deux approches de développement répandues dont nous nous inspirons que

sont 1) le développement dirigé par les tests et 2) le modèle en spirale. Nous présentons ensuite le cycle de développement que nous utiliserons ultérieurement afin de développer un modèle de véhicule lourd à partir d'un modèle de véhicule léger.

4.3.3 Méthodes de conception itératives

Notre objectif est de pouvoir tirer au mieux profit des méthodes existantes présentes dans la littérature afin de produire une méthode adaptée à la reproduction des comportements de véhicules lourds.

Bien que notre approche pour l'amélioration de modèles existants s'inscrive clairement dans une optique incrementale, nous nous appuyons sur des méthodes de développement itératif. Le développement incrémental se caractérise par l'ajout d'un ou de plusieurs éléments fonctionnels à un noyau applicatif. Chaque incrément complète donc un socle de fonctionnalités du logiciel qui s'accroît au fur et à mesure de l'avancement du projet. Le déroulement du développement s'appuie, au moins dans une certaine mesure, sur une approche itérative. Un développement itératif découpe le travail en différents cycles au cours desquels les mêmes activités sont généralement répétés. Chaque cycle comprendra généralement une phase d'analyse, de conception, d'implémentation, de test et éventuellement de planification. Contrairement aux développements incrémentaux, la réalisation d'un cycle d'un développement itératif n'implique pas nécessairement la prise en compte de nouveaux besoins dans le développement de nouvelles fonctionnalités. Chaque cycle peut consister en la création d'un module, l'intégration des différents modèles faisant l'objet d'un cycle de développement à part entière.

Nous présentons donc les deux principales méthodes de conception itératives issues de la littérature dont nous nous inspirons. Ces méthodes de travail sont des méthodes générales issues du domaine du génie logiciel. Elles n'ont pas été développées dans l'objectif de répondre aux attentes liées au développement de systèmes complexes à base d'agents.

4.3.3.1 Méthodes agiles et développement dirigé par les tests

La première méthode de développement dont nous nous inspirons est le développement dirigé par les tests. Cette méthode de conception est tout particulièrement utilisée dans les méthodes agiles comme discuté dans [Shannon et al., 2004]. Les méthodes agiles (telle que «*eXtreme Programming*» (XP)[Beck, 1999] par exemple) sont des méthodes de développement incrémentales. Elles se caractérisent par des cycles très courts ayant pour objectif de pouvoir réagir très rapidement à un changement de besoin et de minimiser le temps nécessaire pour fournir une version exploitable du produit (minimiser le *time to market*). Le développement d'une solution est décomposé en un ensemble de fonctionnalités, chacune d'elles faisant l'objet d'une itération. L'ordre des itérations est lui négocié entre le client (celui nécessitant la solution logicielle) et le prestataire (l'équipe de développement) et dépend de la priorité accordée à chaque fonctionnalité ainsi qu'au coût de développement associé.

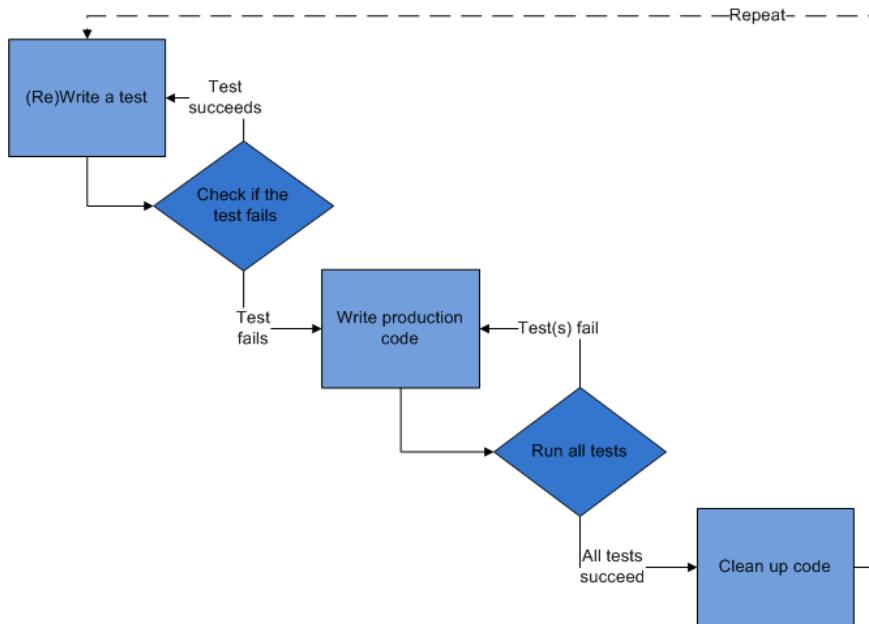


FIGURE 4.5 – Schéma général d'un développement dirigé par les tests. Schéma issu de https://en.wikipedia.org/wiki/File:Test-driven_development.PNG

Une partie de ces méthodes (et particulièrement XP) se fonde sur un développement dirigé par les tests. Cette approche consiste à écrire les tests auxquels sera soumis le code produit avant même que le code ne soit lui-même écrit. Une fois les tests écrits, l'objectif est de produire une implémentation qui permette de satisfaire l'ensemble des tests. Cette approche va à l'opposé de ce qui est généralement pratiqué, à savoir écrire un code (un module par exemple) et ensuite écrire une série de tests permettant de s'assurer que le module est conforme à ses spécifications. Le déroulement général du développement d'une fonctionnalité dans le cadre d'un développement dirigé par les tests est décrit dans la figure 4.5.

L'écriture a priori des tests fournit plusieurs avantages :

- L'écriture des tests est une façon d'expliciter et de mettre à l'épreuve la spécification du module développé. Cette étape permet de se concentrer sur l'interface du code à produire et donc de s'intéresser tout particulièrement à savoir comment il va interagir avec le reste de l'application. Cette première étape permet donc de détecter au plus tôt certaines erreurs de conception qui aboutiraient à une interface incomplète ou difficilement utilisable.
- Une fois les tests écrits, l'objectif est de produire une implémentation telle que l'ensemble des tests soient satisfaits. Ceci incite donc à la concision. Il faut produire une version *a minima* permettant de répondre aux besoins de l'interface. Cette approche évite donc de produire des fonctionnalités non nécessaires voir non couvertes par le jeu de tests. En particulier cela signifie que si après l'écriture

des tests ceux-ci sont satisfaits, aucun développement n'est nécessaire puisque les fonctionnalités attendues sont déjà fournies. S'il s'avère qu'à l'issue du processus, des fonctionnalités sont manquantes, alors cela provient du fait que les tests n'ont pas été correctement écrits et que les besoins n'avaient donc pas été correctement capturés au préalable.

L'approche du développement dirigé par les tests permet donc à la fois de s'assurer de la pertinence de la conception envisagée et de minimiser le travail nécessaire à la réalisation du programme attendu. De plus, l'ensemble des tests produits pour une itération peuvent être utilisés pour effectuer des tests de non régression qui seront utilisés dans deux cas :

- lors d'un éventuel remaniement du code (ou «*refactoring*») ayant pour objectif de simplifier autant que possible le code produit afin d'en faciliter la maintenance dans le futur,
- lors du développement de nouvelles fonctionnalités afin de vérifier que les modifications apportées n'impactent pas négativement l'existant.

4.3.3.2 Le développement en spirale

Le second cycle de développement que nous abordons est le développement en spirale proposé par [Boehm, 1988]. Alors que dans l'approche précédente le développement était particulièrement centré sur le code fourni, cette approche est focalisée sur le risque. Ainsi, pour une itération particulière l'évaluation des changements envisagés, de leurs alternatives, et des risques qui leurs sont associés est plus importante que l'amélioration elle-même.

Pour ce modèle de développement, chaque itération se décompose selon les quatre phases (ou quadrants) suivantes comme illustré par la figure 4.6 :

Description des objectifs La première étape consiste à évaluer les objectifs du projet, de l'itération et à s'interroger sur leur pertinence. De manière similaire à ce qui est proposé par les méthodes agiles, il s'agit là de pouvoir s'adapter à des changements pouvant survenir dans les besoins et à y faire face. A l'issue de ce quadrant, les objectifs de l'itération sont définis.

Analyse des risques Il s'agit du point central du cycle en spirale. Chaque itération comporte une phase d'évaluation des risques associés aux objectifs (risque de dépassement de délais, de budget, risque de goulot d'étranglement ou de blocage technique *etc.*). L'objectif est de ne continuer l'itération que si les risques sont suffisamment contrôlés. Cela permet de ne pas continuer si les avancées ne sont pas suffisantes étant donné les risques associés. Il s'agit donc d'un point de décision important permettant de garder la maîtrise des coûts de développement. Si cela s'avère nécessaire, il est possible à ce point d'abandonner l'itération courante ou encore le projet.

Développement La phase suivante concerne le développement lui-même. Il s'agit de l'activité usuelle de production du logiciel ainsi que des différentes phases de tests.

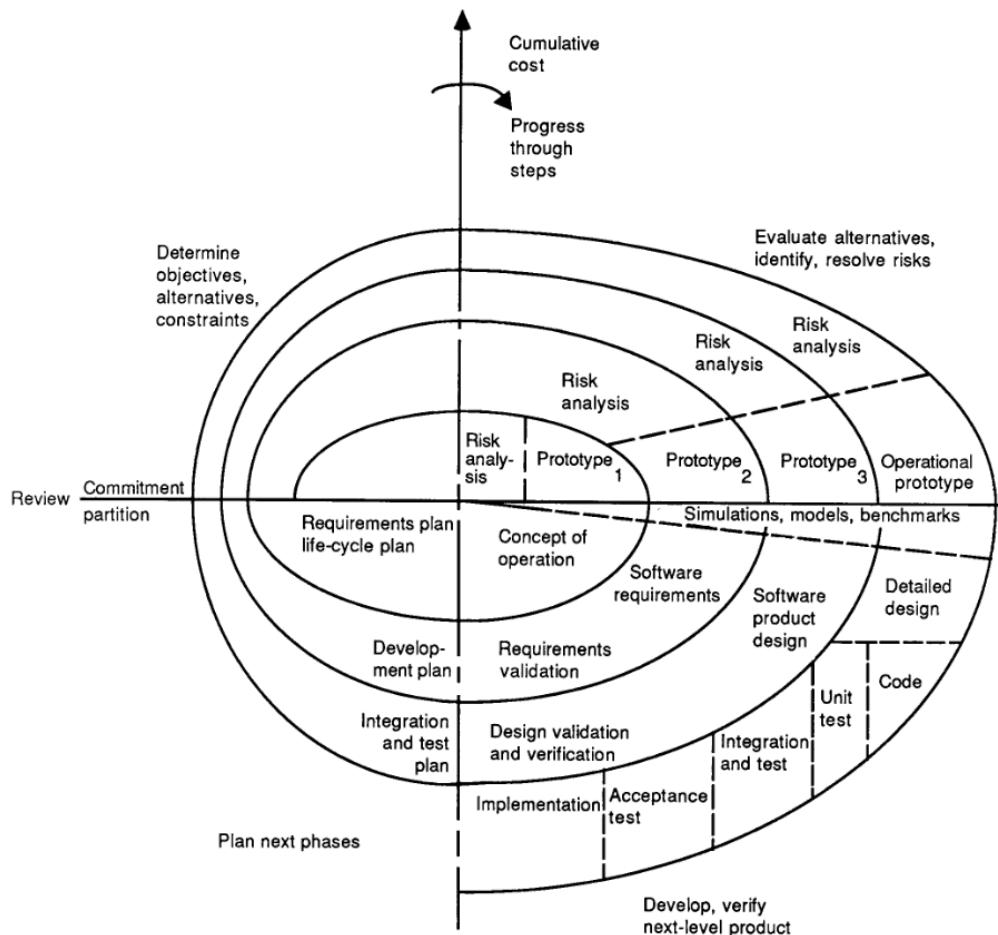


FIGURE 4.6 – Le modèle de développement en spirale [Boehm, 1988]

Cette phase peut s'appuyer sur la méthode de travail couvrant les activités d'analyse, de conception, d'implémentation et de tests.

Préparation de la phase suivante Enfin, la dernière étape de l'itération consiste à planifier la suite du projet, des itérations à venir.

Contrairement aux cycles de développement classiques qui sont centrés soit sur la délivrance de documentations (comme c'est le cas pour le développement en cascade [Royce, 1970]) soit sur la délivrance de codes (comme c'est le cas pour les méthodes agiles), le développement en spirale se concentre sur l'analyse des risques et de la pertinence des travaux à effectuer. Ainsi, ce modèle propose différents points de décision permettant d'orienter ou réorienter les évolutions à venir selon leur pertinence.

Nous venons de présenter deux méthodes de développement de logiciel, l'une se focalisant sur la définition d'objectifs à atteindre à l'aide de tests préétablis et l'autre se focalisant sur l'évaluation des risques et de la pertinence à procéder au développement d'une fonctionnalité lors d'une phase de développement.

Nous présentons maintenant un modèle de développement de système à base d'agents qui tire parti de ces deux modèles et l'adapte à notre situation d'étude.

4.4 Vers une méthode de développement incrémental de système multi-agents : «Verification driven Incremental development Method for MAS» (VIM4MAS)

Nous présentons dans cette section les fondements de la méthode «Verification driven Incremental development Method for MAS» (VIM4MAS). Cette méthode de développement de système multi-agents est incrémentale et dirigée par la vérification. Elle s'inspire fortement du développement orienté par les tests et du développement en spirale mais a pour objectif d'être utilisable dans le contexte des systèmes multi-agents.

4.4.1 Présentation générale

VIM4MAS est une méthode de développement incrémental. Elle est pensée pour être utilisée pour faire évoluer un modèle préexistant offrant une première base opérationnelle de modélisation. La partie 4.3 a montré qu'il existe un grand nombre de méthodes aidant à la conception initiale d'un modèle de simulation à base d'agents. Notre objectif ici est de fournir une méthode permettant de raffiner un modèle de manière incrémentale jusqu'à obtenir un modèle satisfaisant du point de vue du ou des objectifs de simulations. La méthode de développement dirigé par la vérification repose sur cinq étapes :

1. identification d'une facette du comportement sur laquelle l'itération courante doit se concentrer,
2. évaluation de l'impact que peut avoir une modification de la facette sur le déroulement d'une simulation multi-agents, et plus particulièrement sur les phénomènes émergents,
3. spécification du comportement attendu des agents, en ce qui concerne la facette identifiée pour l'itération courante,
4. implémentation d'un modèle répondant aux exigences de la phase 3,
5. planification afin de déterminer s'il est utile d'entamer une nouvelle itération.

La figure 4.7 illustre le processus de développement. Les trois premiers quadrants correspondent à une première phase d'identification et de spécification des besoins que nous développerons dans la partie 4.4.2. Le rendu de cette grande phase est la spécification des tests que l'implémentation devra par la suite être en mesure de passer. La phase suivante, développée dans la partie 4.4.3, correspond au développement proprement dit. Enfin, la dernière correspond au point de planification de la suite du projet, de manière similaire à ce qui est proposé par [Boehm, 1988]. Nous aborderons cette étape dans la partie 4.4.4.

4.4. VERS UNE MÉTHODE DE DÉVELOPPEMENT INCRÉMENTAL : VIM4MAS71

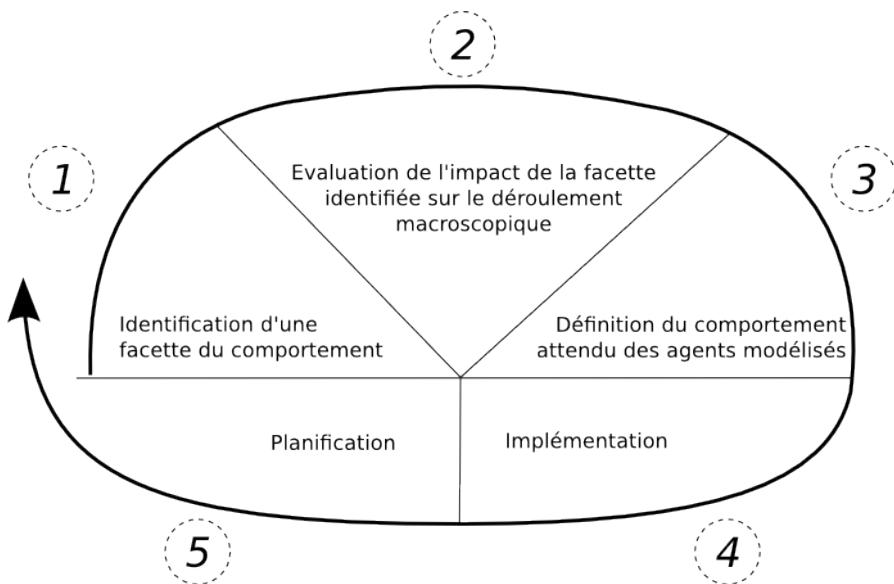


FIGURE 4.7 – Déroulement général d'une itération de développement dans VIM4MAS.

4.4.2 Facette du comportement et système

4.4.2.1 Identification d'une facette de comportement

Comme précédemment indiqué, la première étape du développement consiste à identifier une facette du comportement d'un agent impliqué dans le système de simulation qui peut être améliorée. Une facette du comportement est un aspect de l'action ou de la réaction d'un agent dans une situation donnée. Celle-ci peut intervenir en réaction à un *stimulus* extérieur dans le cadre de facettes réactives du comportement ou être initiée par l'agent dans le cadre de comportement pro-actifs. Par exemple, la stratégie de décélération d'un véhicule à l'approche d'une zone de congestion ainsi que sa procédure de changement de voie sont des aspects du comportement du conducteur du véhicule.

L'identification et la caractérisation de ces facettes est une tâche qui relève exclusivement du domaine de l'expert thématique (selon les rôles décrits par [Drogoul et al., 2003]). L'expert est en charge d'identifier où il estime que des améliorations sont opportunes.

Une partie des travaux présentés dans le chapitre 5 s'inscrit dans cette phase. Nous y présentons une méthode permettant d'analyser et de caractériser certains aspects du comportement longitudinal des conducteurs.

4.4.2.2 Facette du comportement et émergence

Une fois cette identification achevée, il convient d'évaluer si les modifications envisagées sont pertinentes du point de vue du système modélisé, et si elles peuvent potentiellement modifier son fonctionnement. Une modification n'ayant aucun impact significatif sur le comportement du système ne représente pas un objectif prioritaire en terme de

développement du modèle. Il est donc particulièrement opportun de prêter une grande attention à cette analyse puisqu'il s'agit d'un point de décision pour savoir s'il faut poursuivre le cycle de développement entamé. Si à l'issue de cette phase, il apparaît que l'aspect du comportement sur lequel se porte l'attention ne peut influencer significativement les résultats obtenus à l'issue de simulation, il est préférable d'entamer un nouveau cycle.

Pour illustrer ce processus, prenons un exemple concret⁴. Afin d'étudier un système de trafic, et plus particulièrement l'apparition des phénomènes émergents que sont les vagues de sur-congestion, l'expert thématique peut décider de s'intéresser aux phases de décélération et d'accélération des véhicules. Concentrons nous sur celle d'accélération. La question à poser est donc de savoir s'il est pertinent d'investir dans la reproduction des capacités d'accélération et si cela aura un impact réel sur le déroulement des simulations. Si nous considérons l'expérience donnée par les modèles macroscopiques du premier ordre supposant des accélérations infinies, il semblerait que cet aspect ne soit pas particulièrement important dans la propagation des ondes de sur-congestion. Cependant, les travaux de [Duret, 2010] montrent que lors de l'insertion d'un véhicule dans un trafic presque congestionné, le temps que ce véhicule met à atteindre la vitesse du flux influe fortement sur l'apparition des vagues de sur-congestion. Autrement dit, un système à base d'agents cherchant à étudier l'apparition de congestion doit chercher à reproduire correctement le temps que met un véhicule à atteindre la vitesse du flux. A l'opposé, la reproduction de la longueur des véhicules impliqués dans la simulation, bien qu'influant sur les densités et débits observés, peut plus facilement être négligée dans l'optique d'étudier l'apparition de vagues de *stop & go*. Ce phénomène se caractérise par l'apparition d'une perturbation dans la vitesse des usagers de la route se propageant de proche en proche. Il peut donc être considéré comme suffisant qu'une telle perturbation se propage dans le sens amont du trafic, même si la position des véhicules n'est pas exacte. C'est d'ailleurs ce que font certains auteurs qui reproduisent de tels phénomènes tout en réduisant un véhicule à un point ([Newell, 1993] par exemple). Nous avons ici considéré des exemples simples dont l'influence est déjà connue et documentée. Dans des cas plus complexes telle que l'étude de l'apparition de phénomènes d'hystérosis dans les comportements de suivi que nous aborderons au chapitre 5, déterminer si ceux-ci sont important du point de vue de la simulation est une tâche plus ardue pouvant nécessiter la réalisation de prototypes dédiés.

Cette tâche d'évaluation de l'impact d'un aspect du comportement d'un agent sur l'apparition de phénomènes émergents sera l'objet de la seconde partie du chapitre 5.

4.4.2.3 Spécification du comportement attendu

Une fois qu'une facette du comportement est identifiée comme pertinente par l'expert, il convient de prévoir les outils permettant de vérifier que le modèle d'agent développé peut la reproduire de manière adéquate. La spécification du comportement que doivent avoir les agents est également une tâche qui relève de l'expert thématique. Dans l'ap-

4. L'exemple présenté ici sera développé plus en détails dans la partie 6.3.

4.4. VERS UNE MÉTHODE DE DÉVELOPPEMENT INCRÉMENTAL : VIM4MAS73

proche que nous proposons, plutôt que de décrire un modèle de comportement, l'expert définit les propriétés de celui-ci. Il définit un ensemble de situations dans lesquelles un agent peut se trouver, ainsi que sa réaction attendue. La réaction n'est pas décrite dans son intégralité puisque seule une facette du comportement est à l'étude. Par exemple, dans une situation de danger, on peut spécifier qu'un agent doit fuir, peut importent les autres actions qu'il peut entreprendre en même temps (crier, agiter ses bras...) si on s'intéresse aux déplacements de l'agent. La manière qu'il peut avoir de communiquer sa peur aux autres agents proches de lui peut faire l'objet d'une itération à part entière.

De manière analogue à la description d'un modèle de comportement, la description de ses propriétés est généralement faite à l'aide d'un langage non formel. Il peut s'agir d'une description en langage naturel ou bien dans n'importe quel formalisme utile à cette description (graphique *etc.*).

La description des propriétés que le comportement des agents doit respecter est ici assimilée à la description de tests. Ces tests, quel que soit le formalisme utilisé pour les exprimer, forment l'interface entre d'une part l'expert thématique qui exprime ce qu'il attend du modèle à produire et d'autre part le modélisateur et l'implémenteur qui doivent fournir une implémentation fonctionnelle répondant au besoin.

Si nous considérons l'exemple évoqué précédemment des capacités d'accélération, l'expert peut fournir des profils d'accélération (évolution de la vitesse d'un véhicule au fur et à mesure du temps) dans un ensemble de scénarios spécifiés ou le temps nécessaire pour atteindre une vitesse désirée. Il est tout à fait pertinent de fournir plusieurs tests dépendant des différents paramètres à prendre en compte comme par exemple la puissance du véhicule considéré, l'inclinaison de la route... De manière analogue à des tests logiciels «classiques» qui doivent couvrir un ensemble large et varié de cas d'utilisation d'un programme, les propriétés spécifiées doivent être aussi exhaustives que possible afin de pouvoir être assimilées à une spécification complète.

4.4.3 Implémentation dirigée par la vérification

Une fois les propriétés du modèle décrites par l'expert thématique, la tâche du modélisateur ainsi que de l'implémenteur est donc de produire un modèle et une version exécutable de ce modèle ayant les propriétés désirées. En procédant ainsi, nous éliminons la problématique d'ajout d'approximations qui arrive en passant d'une description originale d'un modèle faite par l'expert à son équivalent exécutable par un ordinateur. Le modèle n'étant jamais décrit initialement (du moins pas par l'expert thématique), il ne peut être question d'approximation. Si les propriétés sont reproduites, le modèle correspond alors à l'attente. En revanche, si les choix de modélisation faits par chacun des intervenants mènent à un modèle exécutable ne remplissant pas les propriétés désirées alors l'implémentation est incorrecte. L'utilisation ici du terme «incorrecte» ne correspond donc pas à sa définition usuelle pour laquelle une implémentation est dite incorrecte si elle ne correspond pas au modèle abstrait dont elle doit être la traduction. Il s'agit ici de décrire une implémentation ne présentant pas les propriétés attendues, donc ne répondant pas aux exigences de la phase de vérification.

Notons que bien que la majorité de l'exécution de la tâche de réalisation incombe au

modélisateur et à l'implémenteur, l'expert thématique peut également intervenir. Étant l'interlocuteur disposant de la plus grande connaissance sur l'objet à modéliser, l'exclure du processus de création du modèle serait contre-productif. Son expertise peut être utilisée afin de produire un modèle de manière analogue à ce qui est généralement pratiqué. Cependant, il faut garder à l'esprit que dans la perspective de développement, l'objectif reste d'apporter des modifications au modèle de sorte à montrer les comportements désirés.

Dans la méthode Verification driven Incremental development Method for MAS que nous présentons, l'intérêt est porté sur le lien qui existe entre les propriétés du modèle idéal et les propriétés de l'implémentation qui en est faite. Il s'agit donc d'identifier l'adéquation entre un modèle abstrait et sa mise en œuvre, ce qui correspond à un processus de vérification [Sargent, 2000]. Notons que ce processus est à distinguer d'un processus de validation dont l'objet est de s'assurer que le système complet permet de répondre avec suffisamment de précision à une question que l'on se pose sur le système modélisé (selon l'approche de [Minsky, 1965]). Ainsi, l'objectif d'une itération n'est pas d'obtenir un modèle valide, mais de s'en approcher.

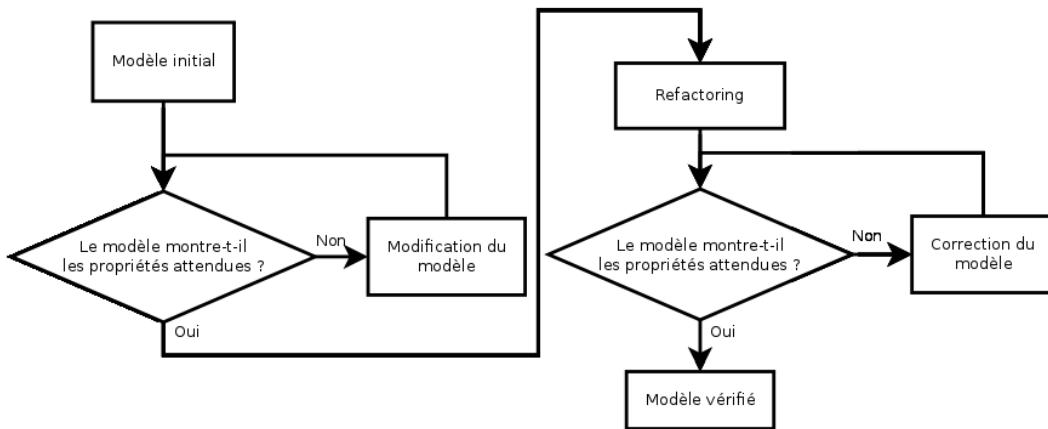


FIGURE 4.8 – Déroulement de la phase d'implémentation dans le cadre du processus de développement dirigé par la vérification. Correspond à l'étape n° 4 de la figure 4.7.

Cette approche est particulièrement inspirée du développement dirigé par les tests et cherche à en reproduire les propriétés. Ainsi, elle incite à la concision et à produire une version a minima permettant de répondre aux exigences exprimées. Un modèle exhibant plus de propriétés que celles attendues se montrerait être une perte de temps puisque

- soit les propriétés développées ne correspondent pas à un besoin exprimé par l'expert thématique (ou de manière générale au besoin exprimé par un client),
- soit ces propriétés sont intéressantes, mais dans ce cas elles devraient faire l'objet d'une itération à part entière évaluant dans quelle mesure leur intégration est un apport pour le déroulement des simulations.

De même, le processus est tout à fait adapté à l'adoption d'une phase de « *refactoring* »

permettant d'accroître la maintenabilité du programme produit comme le présente la figure 4.8.

Gardons enfin à l'esprit qu'étant donné la nature des modèles à base d'agents, le processus de spécification et de vérification décrit ici est appliqué à un niveau local (à l'échelle d'un agent). Cette phase n'est pas directement intéressée par la validité macroscopique du système produit, mais bien à la concordance entre les propriétés désirées pour les comportements individuels avec le comportement des entités effectivement mises en œuvre.

4.4.4 Planification

De manière analogue au modèle en spirale, VIM4MAS se termine par une phase de planification. Son objectif est entre autre de déterminer si, oui ou non, le système multi-agents produit est valide ou si une(des) itération(s) supplémentaire(s) est(sont) nécessaire(s).

De manière analogue aux phases précédemment abordées, cette question est du ressort de l'expert thématique. Elle est notamment l'occasion de confronter le modèle développé à, dans le cas de simulations, des données réelles. Ceci est généralement lié au processus de validation mais n'est pas une nécessité. La confrontation à des données réelles peut être le processus par lequel l'expert identifie de potentiels points sur lesquels le comportement des agents peut être amélioré. Il n'est pas question ici d'analyser la pertinence de l'intégration de tel ou tel nouveau point identifié, cela étant l'objet de la première phase d'un cycle ultérieur.

Ce dernier quadrant sert donc 1) à déterminer s'il est nécessaire ou non de poursuivre le développement du modèle plus avant et 2) à profiter de la confrontation du modèle à des données réelles afin d'identifier de possibles pistes d'évolution.

4.5 Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté la plate-forme de simulation ARCHISIM. L'utilisation de cette plate-forme a été nécessaire à la réalisation de l'ensemble des travaux qui seront présentés dans le chapitre 5 et 6. Cette plate-forme permet de mettre en œuvre différents modèles de simulation de trafic microscopique. Certains des modèles étudiés sont déjà intégrés à la plate-forme, et son architecture nous permet d'en ajouter de nouveaux selon nos besoins.

Dans cette optique de conception incrémentale à partir d'une base existante, nous avons montré que les méthodes de Génie Logiciel classiques n'étaient pas adaptées du fait de la propriété d'émergence des systèmes multi-agents. Ceci nous a amené à proposer une méthode de développement de modèles d'agents : VIM4MAS. Cette méthode est fortement inspirée de deux approches classiques de la littérature : le modèle en spirale et le développement dirigé par les tests.

Dans l'approche proposée, le pilotage du développement est confié à l'expert thématique. Celui-ci définit les propriétés attendues du modèle d'agent plutôt que son fonction-

nement. Tout modèle exécutable remplissant les attentes peut ainsi être considéré comme vérifiant les besoins de l'évolution courante, et la question de la validité du modèle peut être posée.

Cette approche permet de limiter les risques d'apparition d'approximations handicapantes dans le processus d'implémentation d'un modèle.

Enfin, cette approche permet de se concentrer sur les aspects des modèles produits ayant la plus forte influence sur l'apparition des phénomènes émergeants d'intérêt.

La suite des travaux qui seront présentés dans ce rapport ont été réalisés à l'aide de la méthode de travail que nous venons de présenter. Le chapitre 5 sera l'occasion de présenter une méthode d'analyse et de compréhension du comportement des conducteurs. Nous nous intéresserons particulièrement à évaluer la pertinence des propriétés des comportements que cette méthode permet de mettre en avant. Cette méthode sera utilisée dans le chapitre 6 pour définir les propriétés du comportement qui nous apparaissent être les plus pertinentes pour la reproduction des comportements des véhicules lourds.

Chapitre 5

Les phénomènes d'hystérésis comme outil d'étude des comportements

Sommaire

5.1	Introduction	77
5.2	Méthode d'Analyse des comportements par l'hystérésis	78
5.2.1	Le phénomène d'hystérésis	78
5.2.2	L'hystérésis dans les comportements de suivi des conducteurs	79
5.2.3	Présentation de l'analyse basée sur l'hystérésis	82
5.3	Illustration de la méthode d'étude	84
5.3.1	Présentation des modèles de référence et étude de leurs équilibres	85
5.3.2	Comparaison des états d'équilibre	91
5.3.3	Étude des comportements individuels	93
5.3.4	Temporalité des décisions et modèle en trois couches	98
5.4	Hystérésis et émergence	100
5.4.1	Étude de la propagation d'une perturbation	101
5.4.2	Étude de la réaction d'un peloton	101
5.4.3	Réaction à une insertion à basse vitesse	103
5.5	Conclusion	104

5.1 Introduction

Pour la mise au point d'un modèle de véhicules lourds, nous avons besoin de déterminer en quoi leurs comportements se distinguent de ceux des véhicules légers. Or, l'étude, et plus particulièrement la caractérisation des comportements des agents conducteurs est particulièrement complexe. Bien qu'il soit possible d'étudier des relevés de trajectoires, ils contiennent une quantité d'informations extrêmement importante. Ces informations sont très détaillées mais de bas niveau. Elles ne permettent pas d'étudier directement ni d'identifier les éléments de prise de décision des conducteurs : l'information n'est en

aucun cas symbolique, et elle ne permet pas directement d'identifier les informations pertinentes telles que perçues par le conducteur (situation de risque, véhicule précédent engendrant une gêne...).

Par ailleurs, le comportement humain montre à la fois des propriétés réactives et délibératives. L'aspect réactif se retrouve dans le cas d'évitement d'obstacles par exemple tandis que les propriétés délibératives correspondent à la capacité de planification à plus ou moins long terme. Il peut par exemple s'agir de planifier un dépassement ou de suivre un itinéraire. Le comportement observable d'un conducteur est donc la synthèse de ces différentes capacités. Pour comprendre les décisions ayant abouti à la trajectoire suivie par un conducteur, il est donc nécessaire de pouvoir retracer l'influence respective de chacun de ces différents aspects.

Afin de permettre une abstraction synthétique des trajectoires observées, nous proposons d'étudier les phénomènes d'hystérisis apparaissant dans les comportements des conducteurs.

Nous présenterons dans ce chapitre le concept d'hystérisis, puis illustrerons comment utiliser l'étude de ce phénomène pour caractériser et qualifier le comportement de suivi des conducteurs. Après une présentation générale de la méthode, nous montrerons la validité de notre approche en illustrant son utilisation pour l'étude de comportements simulés à l'aide de modèles largement répandus dans la littérature. Nous chercherons particulièrement à comprendre en quoi les caractéristiques des comportements mis en avant par l'étude des phénomènes d'hystérisis sont pertinentes au regard de l'impact que les comportements individuels ont sur l'émergence de situations à l'échelle macroskopique. Nous montrerons également comment cette méthode permet de comprendre les comportements des conducteurs dans le cadre théorique général de description des comportements proposé par [Michon, 1985].

5.2 Analyse des comportements grâce à l'étude des phénomènes d'hystérisis

5.2.1 Le phénomène d'hystérisis

La notion d'hystérisis a été introduite par le physicien J.A. EWING à la fin du XIX^e siècle comme suit [Ewing, 1890] :

When there are two quantities \mathcal{M} and \mathcal{N} , such that cyclic variations of \mathcal{N} cause cyclic variation of \mathcal{M} , then if the changes of \mathcal{M} lag behind those of \mathcal{N} , we may say that there is hysteresis in the relation of \mathcal{M} and \mathcal{N} .¹

Cette notion a été introduite pour caractériser le phénomène de magnétisation et démagnétisation des matériaux ferromagnétiques. La réponse des matériaux se fait avec un certain retard par rapport au champ appliqué.

1. Quand nous avons deux quantités \mathcal{M} et \mathcal{N} , telles que une variation cyclique de \mathcal{N} entraîne une variation cyclique de \mathcal{M} , alors si les changements de \mathcal{M} sont en retard par rapport à ceux de \mathcal{N} , nous pouvons dire qu'il y a de l'hystérisis dans la relation de \mathcal{M} et \mathcal{N}

Depuis, la notion d'hystérésis a été largement réutilisée dans de nombreux domaines scientifiques. Par exemple en sociologie, *l'hystérèse de l'abitus* désigne le fait qu'après un changement de milieu social, l'individu continue à se conformer au référentiel de son ancien milieu [Bourdieu, 1974]. En économie, cette notion décrit la latence qui existe entre les prises de décision et leurs effets sur la société [Göcke, 2002].

De manière plus générale, nous pouvons dire que l'hystérésis est le retard d'un effet par rapport à la cause de cet effet. Ceci traduit une dépendance d'un système par rapport à son passé. L'état d'un système n'est donc pas seulement fonction de l'environnement dans lequel il se trouve. Son état dépend également des états passés de cet environnement.

Pour la suite de ce chapitre, nous utiliserons les notations suivantes : si nous considérons un système \mathcal{S} soumis à un effet extérieur \mathcal{E} , nous pouvons observer une propriété conséquence \mathcal{C} dont l'état est lié à l'intensité de l'effet \mathcal{E} . A titre d'exemple, nous pouvons étudier le système *ampoule* (\mathcal{S}) soumis à un courant électrique qui peut (entre autre) être caractérisé par une intensité (\mathcal{E}) et dont nous pouvons observer la luminosité caractérisée par une intensité lumineuse (\mathcal{C}).

Nous parlerons d'apparition d'hystérésis si nous pouvons observer un décalage de la variation de la grandeur \mathcal{C} suite à une variation de la grandeur \mathcal{E} . Cela traduit une certaine latence dans l'adaptation du système \mathcal{S} par rapport à l'évolution de l'environnement dans lequel il se trouve.

D'un point de vue pratique, cela se traduit par le fait que le tracé de $\mathcal{C} = f(\mathcal{E})$ quand \mathcal{E} est croissant ne se superpose pas avec le tracé de $\mathcal{C} = f(\mathcal{E})$ quand \mathcal{E} est décroissant.

5.2.2 L'hystérésis dans les comportements de suivi des conducteurs

Dans notre contexte applicatif, nous cherchons à étudier la réaction d'un véhicule particulier en fonction de son environnement.

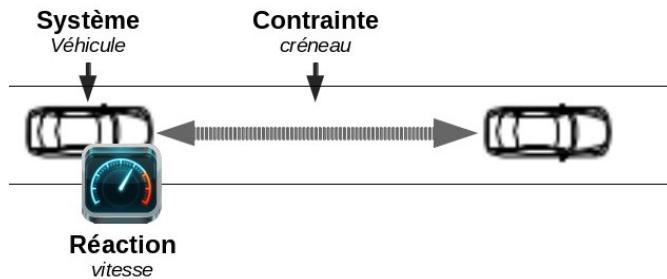


FIGURE 5.1 – Un véhicule doit adapter sa vitesse de déplacement sur l'infrastructure en fonction de 1) la vitesse qu'il souhaite atteindre et 2) l'espace le séparant de son prédecesseur afin de voyager en sécurité.

Ainsi, le système que nous considérons (\mathcal{S}) est un véhicule². Ce véhicule cherche à

2. Nous associons ici dans le même objet d'étude le véhicule et son conducteur. Le comportement du véhicule est assimilé à celui du conducteur. Cet agrégat est généralement appelé « couple véhicule - conducteur », mais nous utiliserons l'appellation générique « véhicule » afin de simplifier la lisibilité.

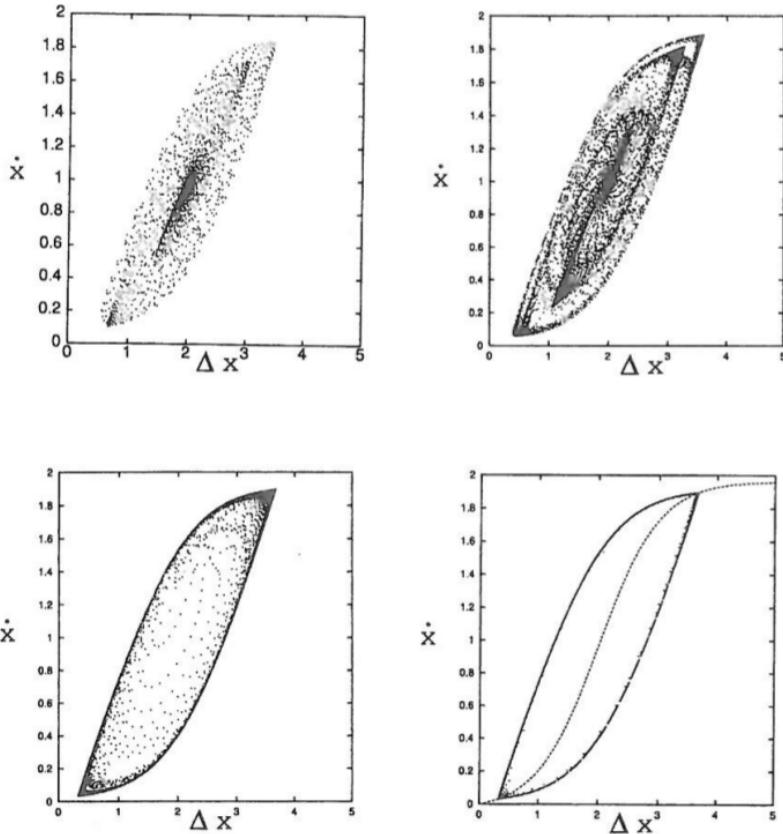
avancer sur la route et à atteindre une vitesse confortable pour lui que nous appellerons sa vitesse désirée. Dans un trafic, ce véhicule évite d'entrer en collision avec les autres véhicules et adapte sa vitesse pour maintenir un espace de sécurité devant lui comme l'illustre la figure 5.1.

La grandeur extérieure \mathcal{E} qui va influencer le comportement du véhicule étudié est donc l'espace disponible entre son avant et l'arrière du véhicule qui se trouve juste devant lui. Cette grandeur est appelée créneau³ (grandeur à distinguer de l'*espacement* qui correspond à la distance entre l'avant du véhicule et l'avant de son prédecesseur). La grandeur observable \mathcal{C} qui est influencée par \mathcal{E} est la vitesse du véhicule. Si le prédecesseur est trop proche et présente un risque de collision, le véhicule devra adapter sa vitesse pour rétablir un créneau acceptable. A l'opposé, si le prédecesseur est éloigné le véhicule étudié peut accélérer pour atteindre (si possible) sa vitesse désirée. Étant donné les deux grandeurs retenues \mathcal{E} et \mathcal{C} , il est possible de représenter l'état d'un véhicule (système \mathcal{S}) comme un point dans le plan défini par celles-ci. Dans notre cas d'étude nous parlerons donc du plan «créneau / vitesse».

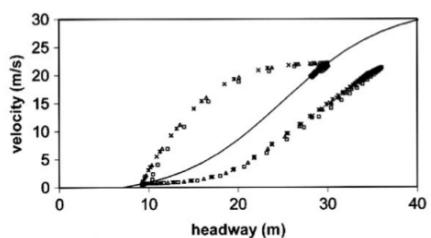
Le couple de grandeurs que nous présentons ici (créneau et vitesse) n'est pas le seul faisant apparaître un phénomène d'hystérésis. Nous choisissons d'étudier la réaction en vitesse d'un véhicule en fonction du créneau disponible devant lui pour plusieurs raisons. Tout d'abord, l'apparition du phénomène d'hystérésis dans cette relation a été observée dans la littérature classique de la modélisation microscopique de comportements routiers. La figure 5.2 reprend l'observation du phénomène d'hystérésis effectué par différents auteurs. Ensuite, notre choix d'utiliser le créneau et la vitesse est lié à la possibilité de mesurer ces grandeurs sur des véhicules. Cette possibilité d'observation et donc d'étude est particulièrement importante pour s'assurer que notre méthode théorique est applicable *in-situ*. Enfin, le lien fort qui existe entre ces grandeurs et les grandeurs observables au niveau macroscopique d'un flux de véhicules (à savoir la concentration et la vitesse du flux de véhicules) est particulièrement utile pour comprendre le lien éventuel existant entre comportement individuel et collectif. Ces grandeurs sont liées à celles entrant dans la composition du diagramme fondamental d'une infrastructure présenté dans la partie 2.2.1. Dans le cas d'un trafic stable, et dans l'hypothèse où l'ensemble des véhicules circulent à une même vitesse, v , cette vitesse est celle du flot de véhicules. De même, si l'ensemble des véhicules composant le trafic sont similaires et adoptent le même comportement, le créneau disponible entre deux véhicules est identique et l'espacement l'est également. La concentration est alors égale à l'inverse de l'espacement. La connaissance de la vitesse d'un flux de véhicules et de sa concentration permet de déduire le débit de véhicules. Ces trois grandeurs sont celles utilisées pour construire les différentes variantes d'un diagramme fondamental.

Il est possible de donner un sens à ces valeurs d'un point de vue du comportement des conducteurs. Le créneau est assimilable à une contrainte subie par un véhicule du fait de la présence de son prédecesseur. Il doit s'y adapter pour maintenir un certain confort et une sécurité de conduite. Nous parlerons d'une contrainte forte lorsque le créneau est petit et d'une contrainte faible lorsque le créneau est grand. Si le véhicule étudié est seul sur

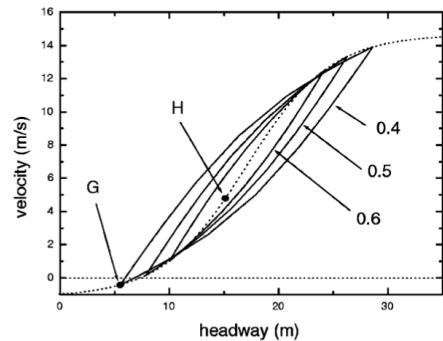
3. Le terme anglophone *gap* est également très présent dans la littérature pour désigner cette grandeur.



(a) Hystérésis dans les comportements de suivi simulés observée par [Bando et al., 1994]. La figure montre un agrégat de comportements individuels, faisant le lien entre l'aspect microscopique et macroscopique du phénomène.



(b) Hystérésis dans les comportements de suivi simulés tel qu'observée par [Davis, 2003].



(c) Hystérésis dans les comportements de suivi simulés tel qu'observée par [Jiang et al., 2001]. L'auteur étudie la sensibilité du phénomène aux paramètres du modèle.

FIGURE 5.2 – Figures extraites de la littérature observant l'apparition de boucles d'hystérésis dans le comportement des conducteurs quand il est étudié dans le plan créneau / vitesse.

la route, le créneau n'a pas de sens et nous parlerons alors d'absence de contrainte (nous considérerons alors que la valeur de \mathcal{E} , contrainte subie par le véhicule, tend vers zéro). Dans cette optique, nous pouvons diviser le plan d'étude créneau / vitesse en deux zones distinctes. La première zone regroupe l'ensemble des états dans lequel le véhicule est en situation de contrainte forte, et une seconde correspondant à l'ensemble des contraintes faibles. Une première intuition nous permet d'avancer que les véhicules se trouvant dans des états correspondant au premier groupe auront tendance à ralentir tandis que ceux se trouvant dans le second seront libres d'accélérer.

L'étude de la variation de la vitesse par rapport au créneau correspond à l'étude de la réaction d'un système lorsque la contrainte à laquelle il est soumis évolue. Nous voyons ici que nous n'avons nul besoin d'avoir une connaissance préalable du modèle de comportement du véhicule étudié pour pouvoir observer sa réaction à une situation. C'est en ce sens que l'outil proposé permet une étude de différents modèles quelles que soient les techniques de modélisation utilisées. Nous parlerons donc d'une étude de type «boîte noire» puisque nous n'avons recours qu'à des observations extérieures.

5.2.3 Présentation de la méthode d'analyse des comportements

Nous présentons ici la méthode d'analyse des comportements via les phénomènes d'hystérésis apparaissant dans ceux-ci. Nous validerons ensuite notre méthode en l'appliquant à un panel de comportements connus dont nous mettrons en avant les principales propriétés. Cette étude se décompose selon deux phases. La première consiste à étudier le comportement d'un véhicule lorsqu'il circule dans un trafic stable (dont la vitesse ne varie pas au cours du temps). La seconde se concentre sur l'étude de la réaction du conducteur lorsqu'il est amené à modifier sa vitesse.

5.2.3.1 Les états d'équilibre

Nous avons précédemment évoqué que le plan dans lequel nous prévoyons d'étudier les états d'un véhicule, le plan créneau / vitesse, pouvait être grossièrement décomposé en deux parties. La première correspond à l'ensemble des états dans lequel un véhicule aura tendance à accélérer pour se rapprocher de sa vitesse désirée. La seconde correspond à l'ensemble des états dans lequel un véhicule aura tendance à décélérer pour conserver un certain confort. Pour mener l'étude du phénomène d'hystérésis dans le comportement d'un véhicule, nous supposons l'existence d'un troisième ensemble d'états. Lorsqu'un véhicule se trouve dans l'un de ces états, il aura tendance à y rester. Pour cette raison, nous appelons ces états des états d'équilibre. De manière connexe, nous pouvons dire qu'un véhicule se trouvant dans l'une des deux premières parties du plan créneau / vitesse cherchera à atteindre un état appartenant à la troisième catégorie. Nous supposons donc que l'état d'un véhicule soumis à une contrainte n'évoluant pas convergera vers un point appartenant à l'ensemble des états d'équilibre.

La figure 5.3 présente une répartition schématique de la répartition de ces trois ensembles d'états dans le plan créneau / vitesse. Les états dits «sur contraints» se trouvent dans la partie haute du graphe, au dessus des états d'équilibre. La réaction attendue dans

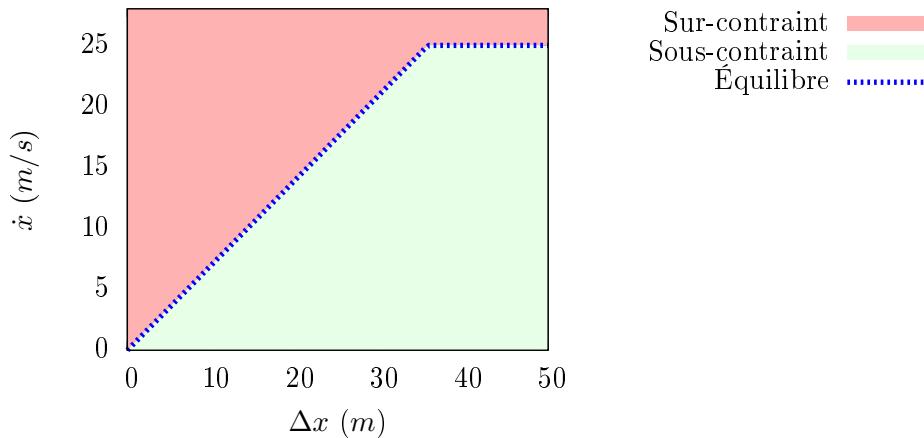


FIGURE 5.3 – Étude de l'état du véhicule dans le plan créneau / vitesse : si le créneau est trop faible par rapport à la vitesse alors il y a risque de collision et le véhicule étudié est dit sur-constraint ; si le créneau est trop grand alors le véhicule peut accélérer pour atteindre sa vitesse désirée en toute sécurité.

ces états est de décélérer et donc de « descendre » dans le graphe pour se rapprocher d'un état moins contraint. À l'opposé, dans les états « sous contraints » le comportement attendu est une accélération permettant au véhicule de se rapprocher de sa vitesse maximale en « remontant » dans le graphe. La frontière de ces deux zones correspond aux états dits d'équilibres (ou états stables). Il s'agit de l'ensemble des états reflétant un compromis acceptable par le conducteur alliant vitesse suffisante et distance de sécurité.

La présence de tels points d'équilibres dans le comportement d'un conducteur permet d'étudier son comportement dans un trafic stable. Dans un tel trafic, la contrainte à laquelle le véhicule est soumis est constante et le véhicule peut trouver un état lui permettant de s'y adapter « une fois pour toute ». Comme nous l'avons précédemment évoqué, connaître les états (dans le plan créneau / vitesse) dans lesquels les véhicules circulent permet de remonter au diagramme fondamental caractérisant l'infrastructure sur laquelle ils évoluent.

5.2.3.2 Les phases de transition

La seconde phase de la méthodologie consiste à étudier comment un conducteur réagit à une contrainte variante. Lorsque cette contrainte évolue, c'est à dire lorsque la vitesse du trafic dans lequel le véhicule circule évolue, ce dernier doit adapter sa propre vitesse afin de rejoindre un nouvel état d'équilibre convenable étant donné d'une part ses préférences personnelles et d'autre part l'état du trafic dans lequel il évolue.

Nous pouvons presque toujours observer un décalage entre la variation de la perturbation et l'adaptation, ce qui permet de générer le tracé des boucles d'hystérésis. Ceci est du à plusieurs facteurs dont notamment :

1. le temps de réaction du conducteur qui fait qu'il ne réagit pas immédiatement à l'évolution de la contrainte à laquelle il est soumis,
2. les capacités de changement de vitesse du véhicule (capacités d'accélération et de freinage),
3. Le style de conduite qui influence les accélérations et décélérations que le conducteur accepte pour maintenir un certain confort.

Concrètement, le décalage se traduit par un écart au point d'équilibre, et donc une non superposition du tracé de $V = f(\Delta x)$ effectif avec le tracé à l'équilibre. Ceci correspond aux observations faites dans la littérature comme illustré dans la figure 5.2.

La variation de la contrainte appliquée au véhicule peut être de deux types, comme illustré dans la figure 5.3 :

- Dans le premier cas, l'état du véhicule se trouve «sous» la courbe d'équilibre dans le plan créneau / vitesse. Il est dans une situation «sous contrainte». Le véhicule aura donc toute liberté d'accélérer afin de pouvoir se rapprocher au mieux de sa vitesse désirée et ainsi converger vers l'état d'équilibre.
- Dans le second cas, l'état du véhicule se trouve «au dessus» de la courbe d'équilibre dans le plan créneau / vitesse. Il s'agit d'une situation dans laquelle la contrainte exercée par le véhicule précédent est excessive. Le véhicule étudié devra donc adopter une stratégie lui permettant de diminuer cette contrainte pour évoluer en toute sécurité tout en restant aussi proche que possible de sa vitesse désirée.

Quel que soit le cas dans lequel le véhicule se trouve, il doit élaborer une stratégie pour rejoindre un état d'équilibre alliant sécurité et vitesse suffisante. Le moyen à disposition du conducteur pour rejoindre un état d'équilibre est de réguler sa vitesse. Il s'agit de l'élément sur lequel il peut influer via les commandes du véhicule. Une accélération fera que la position courante «remontera» tandis qu'une décélération entraînera une baisse. Si un véhicule adopte cette stratégie pour rejoindre l'équilibre, nous observerons alors une rotation de la boucle d'hystérésis dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

La boucle d'action / rétroaction type est la suivante :

1. Variation de la contrainte imposée par le leader, la variation est observable sur l'axe des abscisses.
2. Réaction à cette contrainte pour rejoindre l'équilibre. Si la contrainte a diminué — la valeur en abscisses a augmenté — alors la réaction sera une accélération donc un accroissement sur l'axe des ordonnées. *A contrario*, si la contrainte a augmenté, cela entraînera ensuite une diminution de la vitesse.

5.3 Illustration de la méthode d'étude

Afin de valider l'approche que nous venons de présenter, nous utilisons l'outil d'étude des comportements basé sur l'analyse des boucles d'hystérésis sur trois modèles de comportement de véhicules. Pour être plus précis, nous parlons de l'étude du couple véhicule / conducteur dans la mesure où les actions observées sont dues d'une part à la stratégie

de conduite mise en œuvre par le conducteur, et d'autre part aux caractéristiques mécaniques du véhicule piloté. Ces modèles sont issus de la littérature et largement connus.

Nous présentons dans un premier temps les trois modèles que nous avons retenus, puis nous étudions les états d'équilibre propres à chacun de ces modèles. Ensuite nous aborderons une étude de la dynamique des véhicules. L'étude des équilibres sera faite d'une part de manière analytique et d'autre part de manière expérimentale afin de confirmer que des comportements «boîtes noires» peuvent être étudiés grâce à notre méthode. De manière analogue, l'analyse dynamique du comportement des véhicules sera menée sans connaissance *a priori* des modèles étudiés. Cette connaissance que nous avons des modèles mis en œuvre ne sera utilisée qu'*a posteriori* pour confirmer les conclusions que nous pourrons tirer.

5.3.1 Présentation des modèles de référence et étude de leurs équilibres

Pour mener cette étude, nous utilisons trois modèles de la littérature, que nous avons déjà évoqués dans les parties précédentes (Chapitres 2 et 3). Les modèles retenus sont les modèles OV (présenté dans la partie 2.3.2.2), le modèle IDM (présenté dans la partie 2.3.3.2) et le modèle ARCHISIM (évoqué dans la partie 3.3.1.1).

Afin de pouvoir comprendre le fonctionnement de ces modèles, nous rappelons ici leurs expressions et caractéristiques. Nous ne rappellerons pas ici la signification de chacun des paramètres, sauf si cela est nécessaire à notre discours.

Ces trois modèles ont été choisis parce que chacun d'entre eux est représentatif d'une famille de modèles de trafic. Tout d'abord le modèle OV est un modèle dont l'expression est « simple », et qui permet une analyse statique. Le modèle IDM s'inscrit selon nous dans la branche comportementaliste et décrit le comportement des conducteurs à l'aide d'équations prenant en paramètre des grandeurs perceptibles par un conducteur (distance minimale de suivi désirée, accélération et décélération maximale désirée, vitesse d'approche du prédecesseur...). Enfin ARCHISIM est un modèle comportementaliste, dont l'expression n'est pas basée sur des équations dynamiques. L'étude de ces modèles a pour objectif de montrer en quoi l'approche proposée est valide quels que soient les choix de formalisation du modélisateur. Nous confronterons donc notre méthode d'analyse de type «boîte noire» avec une analyse «boîte blanche» afin de s'assurer de la cohérence des différentes conclusions.

5.3.1.1 Analyse du modèle « Optimal Velocity »

Le modèle « Optimal Velocity »(OV) [Bando et al., 1994] est décrit par l'équation suivante :

$$\ddot{x}_n = a_n (OV(\Delta x_n) - \dot{x}_n) \quad (5.1)$$

avec

$$OV(\Delta x) = \tanh(\Delta x - 2) - \tanh(2) \quad (5.2)$$

La fonction OV a pour objet de déterminer la vitesse optimale que le véhicule cherche à adopter selon le créneau disponible devant lui.

En l'état, un comportement de ce modèle ne peut être comparé avec les deux autres modèles que nous avons retenu dans des scénarios identiques. Ces modèles acceptent un paramètre décrivant la vitesse désirée du conducteur, notion absente du modèle OV . Le modèle ne peut produire que des vitesses entre 0 et 2 (quelle que soit l'unité retenue). Nous modifions donc la fonction de vitesse optimale du modèle d'origine afin d'intégrer un tel paramètre, tout en gardant ses propriétés. La fonction de vitesse optimale exprimée en fonction d'un paramètre v_{desir} s'écrit comme suit :

$$OV(\Delta x) = \frac{v_{desir} * \left[\tanh\left(\frac{2*\Delta x}{v_{desir}} - 2\right) + \tanh(2) \right]}{2}$$

Pour ce modèle, il est aisément d'exprimer les états d'équilibre. Il s'agit exactement de la fonction OV , qui donne en fonction d'un créneau et de la vitesse désirée par le conducteur la vitesse optimale de suivi. Cette première lecture permet de confirmer que le seul paramètre du modèle initial, le paramètre a_n , n'influence pas les états d'équilibre. Il n'entre en compte que dans le comportement dynamique du conducteur.

Le modèle prévoit que tout écart de l'état d'équilibre (terme $OV(\Delta x_n) - \dot{x}_n$) entraîne une réaction (accélération) proportionnelle à cet écart. Nous pouvons noter un aspect symétrique dans cette approche : deux déviations de signes opposés mais de même intensité entraîneront des réactions de signes opposés de même intensité. Le modèle propose donc un comportement similaire selon qu'il soit utilisé dans des phases d'accélérations ou de décélérations.

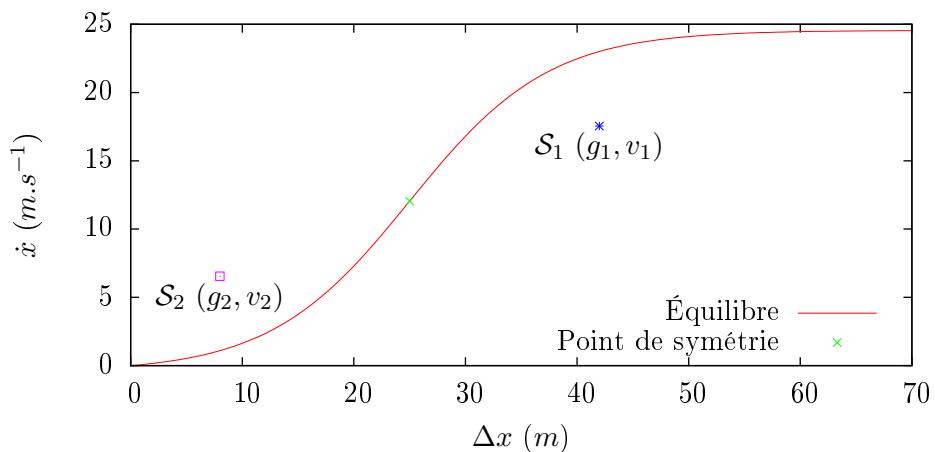


FIGURE 5.4 – Deux systèmes S_1 et S_2 se trouvant dans des états symétriques l'un de l'autre par rapport au point de coordonnées $(\frac{1}{2}v_{desir}, \frac{1}{2}v_{desir}\tanh(2))$.

Étant donné l'écriture du modèle OV (aussi bien dans son écriture originale que dans sa version modifiée), il existe un point de symétrie centrale dans le plan créneau / vitesse

de coordonnées $(g_0, v_0) = \left(\frac{1}{2}v_{\text{desir}}, \frac{1}{2}v_{\text{desir}}\tanh(2)\right)$, comme l'illustre la figure 5.4.

Si nous prenons une situation quelconque qui est représentée sur le plan par les coordonnées $(g_1 = g_0 - \alpha, v_1 = v_0 - \beta)$, il existe un point symétrique à ce dernier par rapport à (g_0, v_0) noté $(g_2 = g_0 + \alpha, v_2 = v_0 + \beta)$. Notre objectif est de montrer que les accélérations adoptées par des véhicules dans chacun de ces deux cas sont exactement l'opposée l'une de l'autre.

La fonction \tanh a la propriété d'être impaire. Nous avons alors $\tanh(\gamma) = -\tanh(-\gamma)$, et donc $\tanh\left(2\frac{g_0}{g_0} + \gamma - 2\right) = -\tanh\left(2\frac{g_0}{g_0} - \gamma - 2\right)$. En appliquant le changement de variable suivant : $\gamma = \frac{2\alpha}{g_0}$, nous pouvons écrire la formule suivante :

$$\tanh\left(\frac{2(g_0 + \alpha)}{g_0} - 2\right) = -\tanh\left(\frac{2(g_0 - \alpha)}{g_0} - 2\right)$$

Nous pouvons ainsi simplement continuer le raisonnement et en déduire l'égalité suivante :

$$\tanh\left(\frac{2(g_0 + \alpha)}{g_0} - 2\right) + \tanh(2) = -\tanh\left(\frac{2(g_0 - \alpha)}{g_0} - 2\right) + \tanh(2)$$

Revenons maintenant au modèle OV tel que nous l'avons écrit et donnons au paramètre v_{desir} la valeur g_0 . Nous allons maintenant calculer l'accélération qu'adoptera un véhicule lorsque le modèle est utilisé avec les paramètres (g_2, v_2) . Durant le développement suivant, nous allons utiliser à nouveau l'égalité donnée ci-dessus, ainsi que le fait que le point de symétrie (g_0, v_0) soit placé sur la ligne d'équilibre décrite dans l'équation $v_0 = OV(x_O)$. Nous pourrons ainsi écrire $v_0 = \frac{g_0 * \tanh(2)}{2}$.

$$OV(g_2, v_2) = a \left[\frac{g_0 * \left[\tanh\left(\frac{2*g_2}{g_0} - 2\right) + \tanh(2) \right]}{2} - v_2 \right] \quad (5.3)$$

$$= a \left[\frac{g_0 * \left[\tanh\left(\frac{2*(g_0+\alpha)}{g_0} - 2\right) + \tanh(2) \right]}{2} - (2v_0 - v_1) \right] \quad (5.4)$$

$$= a \left[\frac{g_0 * \left[\tanh\left(\frac{2*(g_0+\alpha)}{g_0} - 2\right) + \tanh(2) \right]}{2} - g_0 * \tanh(2) + v_1 \right] \quad (5.5)$$

$$= a \left[\frac{g_0 * \left[\tanh\left(\frac{2*(g_0+\alpha)}{g_0} - 2\right) - \tanh(2) \right]}{2} + v_1 \right] \quad (5.6)$$

$$= a \left[\frac{g_0 * \left[-\tanh\left(\frac{2*(g_0-\alpha)}{g_0} - 2\right) - \tanh(2) \right]}{2} + v_1 \right] \quad (5.7)$$

$$= -a \left[\frac{g_0 * \left[\tanh\left(\frac{2*(g_1)}{g_0} - 2\right) + \tanh(2) \right]}{2} - v_1 \right] \quad (5.8)$$

$$= -OV(g_1, v_1) \quad (5.9)$$

Nous obtenons ainsi une symétrie du comportement OV dans le plan créneau / vitesse. Cette symétrie est centrée autour du point d'équilibre correspondant à un créneau de $\frac{v_{desir}}{2}$. Ce résultat permet d'expliquer l'aspect symétrique des comportements d'hystérésis qui ont pu être observés dans la littérature, et que nous avons illustrés dans la figure 5.2.

5.3.1.2 Analyse du modèle « Intelligent Driver Model »

Le modèle « Intelligent Driver Model »(IDM)[Treiber et al., 2000b] (présenté dans la partie 2.3.3.2) est un modèle qui est construit autour de deux sous-comportements complémentaires. Le premier comportement est un comportement d'accélération, tendant à faire accélérer le véhicule jusqu'à ce qu'il atteigne sa vitesse désirée :

$$a_n \left(1 - (\dot{x}_n/v_0^n)^\delta \right) \quad (5.10)$$

Le second comportement, lui, tend à faire ralentir le véhicule si celui ci approche d'une situation contrainte

$$- a_n (s_n^* (\dot{x}_n, \Delta v_n) / \Delta x_n)^2 \quad (5.11)$$

Nous pouvons donc noter une distinction profonde avec le modèle OV : le comportement n'est ici pas symétrique. La gestion des accélérations et des décélérations correspond à deux processus distincts. Nous pouvons donc anticiper que la boucle d'hystérésis

apparaissant dans l'étude dynamique de ce modèle ne présentera probablement pas la propriété de symétrie telle que celle observée pour le modèle OV. De plus, le comportement de décélération est exprimé en fonction du créneau disponible face au véhicule et de la vitesse d'approche du prédecesseur. Cette information sur la dynamique d'approche du véhicule suivi permet d'anticiper la réduction du gap, qui est exactement la conséquence d'une différence entre la vitesse du véhicule meneur et celle du véhicule suiveur.

L'ensemble des situations d'équilibre correspond, comme pour le modèle précédent, à l'ensemble des couples de valeur créneau / vitesse telle que l'accélération adoptée dans ces situations sont nulles. Afin de pouvoir caractériser l'ensemble des situations d'équilibre de ce modèle, nous devons supposer que l'équilibre n'est atteint que lorsque la vitesse d'approche du prédecesseur est nulle ($\Delta\dot{x}_n = 0$). En effet, si cette grandeur est non nulle, le créneau disponible devant le conducteur sera amené à évoluer, et donc le suiveur devra adapter sa vitesse. Les états d'équilibre sont donc donnés par l'équation suivante :

$$\Delta x_n(\dot{x}_n) = \frac{s_0^n + s_1^n \sqrt{\frac{\dot{x}_n}{v_0^n} + T_n \dot{x}_n}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\dot{x}_n}{v_0^n}\right)^\delta}} \quad (5.12)$$

Tout comme pour le modèle précédent, l'écriture de l'ensemble des états d'équilibre permet de classer les paramètres du modèle selon deux catégories : les paramètres influençant les comportements stables et les paramètres influençant les comportements dynamiques. Nous pouvons donc aisément identifier les paramètres d'équilibre d'un conducteur IDM : s_0^n , s_1^n , v_0^n , T_n et δ . L'ensemble des paramètres restants ne pourront donc avoir d'influence que sur les phases de transition.

5.3.1.3 Le modèle ARCHISIM

Le dernier modèle que nous avons sélectionné pour notre étude est le modèle ARCHISIM. Il s'agit du modèle de référence implanté dans la plate-forme de simulation éponyme. Cette plate-forme est développée au sein du laboratoire LEPSiS⁴ de l'IFSTTAR⁵ (anciennement au sein de l'équipe MSIS de l'INRETS⁶), et a depuis sa création été le support de nombreuses recherches sur les modèles de simulation. Cette plate-forme est présentée en détail dans la partie 4.2.

Le modèle ARCHISIM est la synthèse de nombreuses recherches que nous avons déjà évoqué dans la partie 3.3. En particulier, les travaux de [Saad, 1994, Espié et al., 1994, El Hadouaj, 2004, Champion, 2003, Doniec, 2006, Ksontini et al., 2012] se sont succédés et ont participé à l'effort joint d'élaboration du modèle ARCHISIM. Nous pouvons noter

4. Le LEPSiS (Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations) est une unité de recherche de l'IFSTTAR.

5. IFSTTAR : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux.

6. INRETS : Institut National de la Recherche sur les Transports et leur Sécurité. Institut ayant fusionné au premier janvier 2011 avec le LCPC (Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées) pour former l'IFSTTAR.

que l'élaboration de ce modèle est une parfaite illustration d'une construction incrémentale de modèle à base d'agents. Chacun des contributeurs sus-cités (hormis les créateurs initiaux) ont pu développer leurs modifications sur la base d'un modèle déjà existant, et ainsi se concentrer sur un aspect particulier de la modélisation. Nous ne détaillerons donc pas l'intégralité du modèle, mais nous nous limiterons à expliquer les parties pertinentes dans le cadre de l'étude du comportement de suivi.

Le modèle ARCHISIM est basé sur les règles d'adaptation à la contrainte que nous avons évoquées dans la figure 3.6. Un véhicule évoluant sur une voie cherchera, en fonction des véhicules qu'il perçoit devant lui, à qualifier la contrainte engendrée par ces véhicules. Un véhicule est contraignant s'il empêche le véhicule étudié d'atteindre sa vitesse désirée (v_{desir}). Chaque véhicule potentiellement contraignant pour le conducteur est qualifié selon que la contrainte qu'il applique est temporaire ou pérenne. Une contrainte temporaire est une contrainte qui est amenée à se dissiper sans que le conducteur n'ait à entreprendre d'action. Par exemple, si un véhicule a signifié son intention de quitter la voie de circulation, la contrainte qu'il fait subir à son suivant est temporaire. De manière analogue, si le véhicule étudié va prochainement quitter sa voie de circulation (pour changer de route par exemple), il considérera que son prédécesseur qui, lui reste sur la route, est une contrainte temporaire puisqu'il ne sera pas présent sur la prochaine route, une fois le changement de voie effectué [Espié et al., 2007a].

Dans le cas où la contrainte que le véhicule subit est de longue durée, alors ce dernier cherche à maintenir un Temps Inter Véhiculaire (TIV) donné par :

$$T.I.V_{cible} = T.I.V_{min} * \frac{dTrafic}{100} + T.I.V_{max} * \left(1 - \frac{dTrafic}{100}\right)$$

où $T.I.V_{min}$ et $T.I.V_{max}$ sont des constantes données par la plate-forme de simulation valant respectivement $0.7s$ et $2.5s$, et $dTrafic$ est un paramètre du modèle propre au conducteur.

Si la contrainte perçue par le conducteur est temporaire, alors le conducteur accepte un temps inter véhiculaire court donné par

$$T.I.V_{cible} = T.I.V_{min}$$

Nous considérons qu'un véhicule a atteint un point d'équilibre lorsqu'il est adapté à une contrainte de longue durée. En effet, une contrainte temporaire étant de par sa nature amenée à disparaître après peu de temps, une adaptation à cette dernière ne peut être considérée comme stable. Nous pouvons donc écrire que l'ensemble des états d'équilibre pour un véhicule ARCHISIM est donné, lorsque le véhicule est contraint, par l'expression suivante :

$$V(\Delta x) = \frac{\Delta x}{T.I.V_{min} \frac{dTrafic}{100} + T.I.V_{max} \left(1 - \frac{dTrafic}{100}\right)} \quad (5.13)$$

Si le véhicule n'est pas en situation contrainte, c'est à dire qu'il peut circuler à sa vitesse désirée sans subir l'influence d'un véhicule le précédent, il adopte sa vitesse

désirée. Ainsi, l'équation complète donnant l'ensemble des états d'équilibre acceptés par un véhicule ARCHISIM est la suivante :

$$V(\Delta x) = \min \left(\frac{\Delta x}{T.I.V._{min} \frac{dTrafic}{100} + T.I.V._{max} \left(1 - \frac{dTrafic}{100} \right)}, v_{desir} \right)$$

Nous pouvons d'ores et déjà remarquer que l'expression de ces états d'équilibre correspond au modèle de NEWELL. Les deux modèles font clairement apparaître un régime libre et un régime contraint. Pour le modèle ARCHISIM, le régime libre est donné par $V(\Delta x) = v_{desir}$ et le régime constraint correspondant est donné par l'équation 5.13.

5.3.2 Comparaison des états d'équilibre

La présentation des modèles que nous venons de faire a permis d'identifier de manière analytique l'ensemble des états d'équilibre pour les trois modèles que nous avons sélectionné. Cependant, cette approche n'est possible que si nous disposons d'une connaissance *a priori* des modèles étudiés. Or, la méthode d'analyse ayant vocation à être menée sur des comportements dont nous n'avons pas de connaissance *a priori* (approche «boîte noire»). Il est important d'être en mesure d'estimer ces états particuliers de manière expérimentale s'il est impossible de déduire cette information analytiquement. En particulier, dans le cas de l'étude de comportements issus de données réelles, il est impossible de déterminer analytiquement ces états. Seule une estimation expérimentale est alors envisageable.

Afin de vérifier le lien entre équilibres théoriques et équilibres réels, nous avons utilisé la plate-forme de simulation ARCHISIM pour mettre en place trois scénarios identiques. Chaque scénario est joué indépendamment pour chaque modèle étudié. Dans ces scénarios, le véhicule étudié suit un véhicule asservi⁷ jouant le rôle de véhicule leader. Ce mécanisme permet de reproduire une situation routière à l'identique d'une simulation à une autre. Dans chacune des simulations que nous avons menées, le véhicule leader a vu sa vitesse varier faiblement afin de couvrir les vitesses allant de $0.5m.s^{-1}$ à $26m.s^{-1}$. Les véhicules suiveurs ont eux une vitesse désirée de $25m.s^{-1}$. Le véhicule leader adopte un ensemble vitesse dans la plage indiquée et fait varier sa vitesse de manière très réduite afin que le suiveur puisse rejoindre un état d'équilibre (ou proche de l'équilibre) derrière lui pour chaque vitesse.

Les véhicules qui sont simulés dans l'expérience utilisent un jeu de paramètres qui est résumé dans le tableau 5.1. Les paramètres utilisés pour le modèle IDM sont ceux proposés par l'auteur, celui du modèle ARCHIM et celui du modèle OV sont choisis arbitrairement. Notre objectif n'est pas ici de procéder à une étude d'influence des paramètres, mais de comprendre les propriétés intrinsèques des modèles. Les valeurs choisies ont, comme l'illustre la littérature, une influence sur l'amplitude des phénomènes observés, et non sur leur nature.

7. Voir la section 4.2.4 pour une description des véhicules asservis de la plate-forme ARCHISIM.

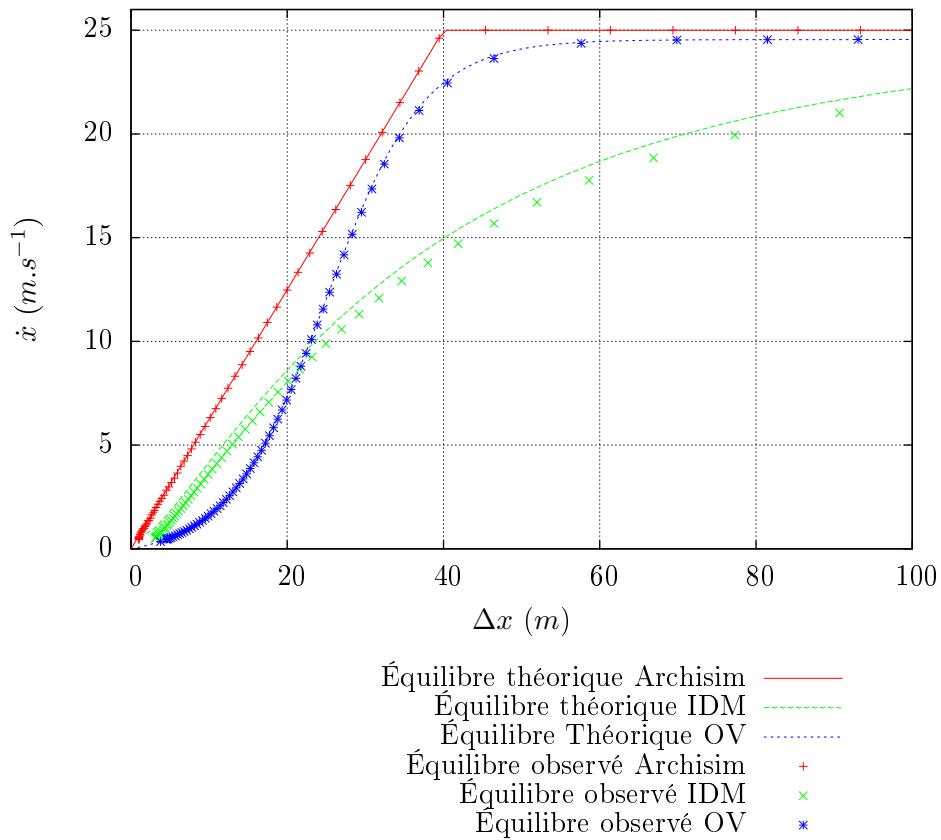


FIGURE 5.5 – Comparaison des équilibres théoriques et simulés des modèles ARCHISIM IDM et OV.

Modèle	Paramètre	Valeur
Tous	v_{desir}	25 m.s^{-1}
OV	a	1.0
IDM	T	1.0 s
IDM	a	1.2 m.s^{-2}
IDM	b	0.8 m.s^{-2}
IDM	s_0	1.0 m
IDM	s_1	10.0 m
ARCHISIM	$dTrafic$	50.0

TABLE 5.1 – Résumé des paramètres utilisés pour les modèles ARCHISIM, IDM et OV

La figure 5.5 montre un tracé des états d'équilibre théoriques et simulés pour les différents modèles étudiés. Les tracés théoriques et simulés coïncident parfaitement pour les modèles ARCHISIM et OV. Pour le modèle IDM cependant, nous observons une différence d'en moyenne 0.54m.s^{-1} (Mean Squared Error (MSE) de 0.30m.s^{-1}) entre la valeur théorique et celle mesurée. Cette légère déviation s'explique par le fait que le véhicule leader est en constante accélération, même si celle-ci est très faible. Ainsi, le terme de vitesse d'éloignement du leader que nous avons supposé nul pour aboutir à l'équation 5.12 ne l'est pas pour le scénario étudié. Une expérimentation dans laquelle le véhicule leader adopte une vitesse fixe ne montre pas cette déviation, confirmant notre explication.

Bien que tout à fait cohérent, ce résultat montre en quoi il peut être délicat de déterminer expérimentalement les stratégies d'équilibre. Cette expérience montre qu'un simple scénario contrôlé comme celui-ci peut montrer une légère erreur pour un modèle relativement simple. Il faut donc garder à l'esprit que dans le cas de l'analyse d'un modèle quelconque, voir de l'analyse de comportements humains, l'estimation précise des états stables peut se montrer délicate et devoir faire appel à un grand nombre de scénarios.

5.3.3 Étude des comportements individuels

Une connaissance des états stables propres à chaque comportement étudié permet d'interpréter les différentes phases de transition par lesquelles un conducteur est amené à passer. Ces phases de transition apparaissent chaque fois qu'un conducteur doit quitter un état stable pour en rejoindre un nouveau, généralement lié à un nouvel état du trafic dans lequel il évolue. Nous illustrons donc dans cette section en quoi l'étude des phénomènes d'hystérosis apparaissant dans les comportements des conducteurs peut se montrer révélatrice des stratégies déployées durant ces phases.

Les différents résultats de simulation que nous présentons ici permettent de comprendre le fonctionnement de chacun des modèles que nous avons choisi d'étudier dans des situations dynamiques. Nous allons pour chacun d'entre eux étudier leur réaction à un changement de contrainte imposé par le véhicule leader.

Afin d'étudier les modèles, nous avons utilisé un scénario de simulation simple dans

lequel est joué successivement un comportement OV, un comportement IDM et enfin un comportement ARCHISIM. Dans ce scénario, le véhicule étudié doit suivre un leader sur une ligne droite, tout en cherchant à atteindre sa vitesse désirée. La vitesse du leader, elle, varie périodiquement d'une vitesse de $4m.s^{-4}$ à $22m.s^{-1}$ et inversement.

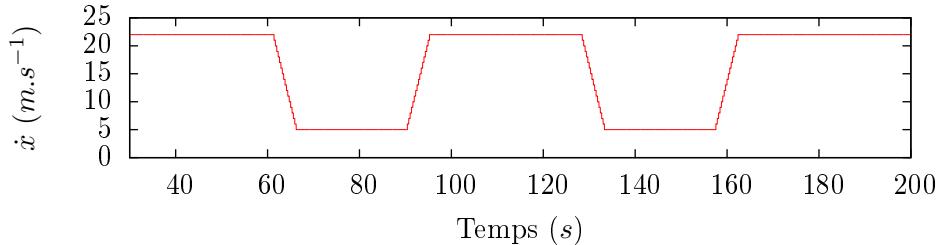


FIGURE 5.6 – Profil de vitesse du véhicule leader utilisé dans les scénarios d'étude des véhicules OV, IDM et ARCHISIM

La figure 5.6 montre le profil de vitesse du véhicule leader mis en oeuvre dans les scénarios d'étude. Les boucles d'hystérésis qui seront présentées sont construites sur un cycle partant d'un état stable jusqu'au retour à ce même état stable après que la variation de la contrainte ait été absorbée. Nous limitons la représentation de la boucle à un seul cycle dans la mesure où les cycles suivants sont parfaitement identiques à celui utilisé pour les trois modèles étudiés.

5.3.3.1 Comportement dynamique du modèle OV

Dans un premier temps, nous allons étudier le modèle Optimal Velocity, qui est le plus « simple »⁸ des modèles que nous avons retenu.

La figure 5.7 représente un comportement de suivi d'un véhicule OV suivant le véhicule asservi. Le schéma d'adaptation du véhicule étudié est un schéma purement réactif. Lorsque le véhicule précédent accélère (resp. ralentit), l'espace inter-véhiculaire grandit (resp. diminue). Le véhicule adopte alors une accélération proportionnelle à cette variation d'espace inter-véhiculaire dans le but de revenir vers l'état d'équilibre.

Le tracé de la boucle obtenu est très proche des phénomènes d'hystérésis « classiques ». Nous pouvons observer que durant la phase d'accélération du leader (relaxation de la contrainte), le tracé de la boucle d'hystérésis de l'agent suiveur se trouve en dessous de la ligne d'équilibre. L'agent se trouve donc dans une situation où la contrainte qui lui est appliquée est plus faible que ce qu'il pourrait accepter, le laissant ainsi libre d'accélérer tout en restant en sécurité. La situation est tout à fait analogue lors de la décélération et l'agent ne décélère que lorsqu'il est sur-contraint. Il doit alors ralentir pour faire baisser la contrainte et revenir à une situation acceptable.

De manière générale, nous pouvons voir que l'agent ne réagit, dans un sens ou dans un autre, qu'après avoir subi un changement de contrainte. Il s'agit d'une forme de retard

8. La simplicité ici se réfère à la simplicité d'expression du modèle.

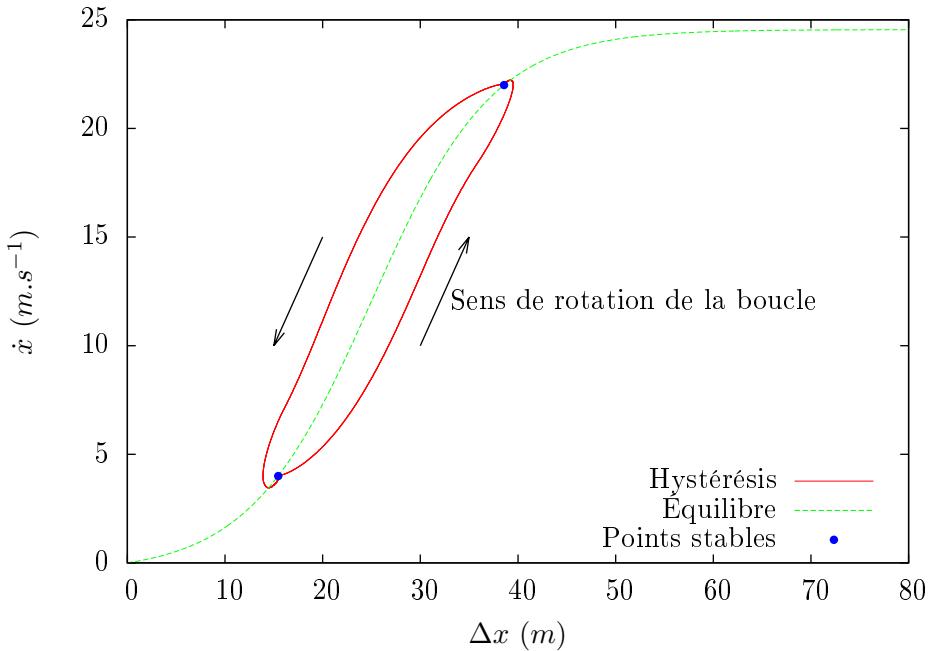


FIGURE 5.7 – Comportement d'un véhicule OV soumis à une contrainte dont la vitesse varie entre 4 et $22\text{m}.\text{s}^{-1}$.

de sa réaction comparée à la variation de contrainte qu'il subit. Le retard observé est du à deux phénomènes concurrents : 1) Le véhicule étudié ne perçoit la variation de la contrainte qu'une fois celle-ci établie, donc nécessairement avec un temps de retard et 2) l'action enclenchée par le conducteur est limitée par différents paramètres dont notamment la capacité d'accélération maximale de son véhicule (paramètre a pour le modèle OV).

Cette propriété de retard est en adéquation avec la description purement réactive du modèle que nous avons fait précédemment (équations 5.2 et 5.1) où une accélération n'apparaît qu'en réaction à un déséquilibre. Par ailleurs, nous retrouvons l'aspect symétrique de la boucle d'hystérésis concordant avec l'analyse faite dans la partie 5.3.1.1.

5.3.3.2 IDM

La figure 5.8 représente le phénomène d'hystérésis du comportement d'un véhicule IDM soumis au même scénario que le véhicule OV précédemment étudié. Tout comme pour la figure précédente, nous pouvons observer une forme de boucle. Cependant, une distinction est à faire : la majorité du tracé de la boucle d'hystérésis se trouve sous le tracé de la courbe d'équilibre. Lorsque la variation de la contrainte cesse (quand le leader atteint une vitesse de 4 ou $22\text{m}/\text{s}$), nous pouvons observer que l'agent suiveur regagne une position d'équilibre, ce qui correspond au comportement attendu et est en conformité avec le comportement OV précédent.

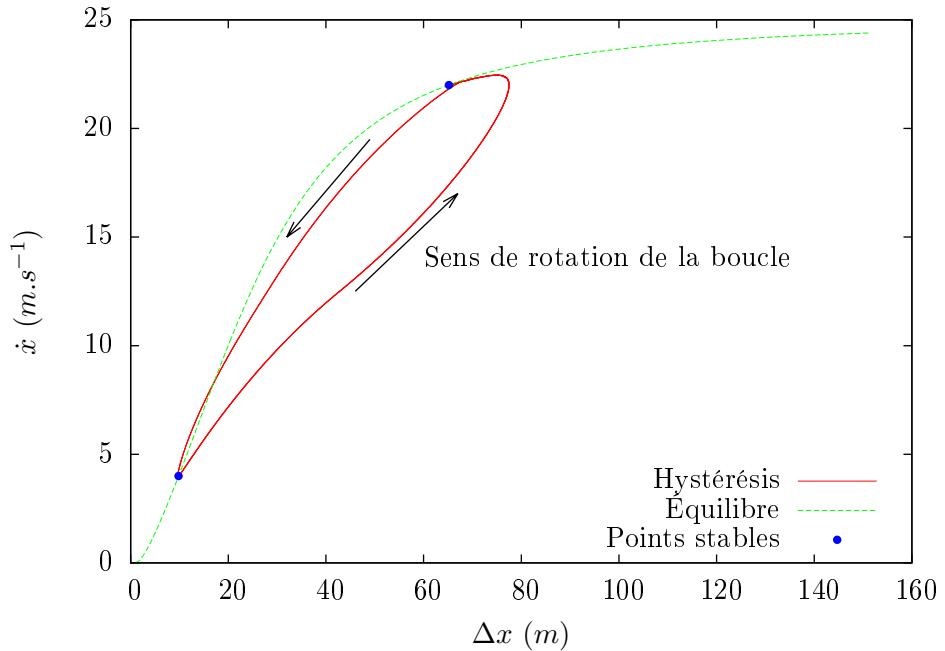


FIGURE 5.8 – Comportement d'un véhicule IDM

La partie inférieure de la boucle correspond à la phase de relaxation de la contrainte. Elle a des propriétés similaires à celle que nous avons pu observer pour OV dans le sens où nous observons un retard de la réaction par rapport au stimulus. Au contraire, dans la partie supérieure de la boucle (correspondant à la phase d'augmentation de la contrainte), le véhicule parvient à se maintenir sous l'état d'équilibre. Il maintient une vitesse réduite par rapport à l'équilibre en anticipation de l'augmentation de la contrainte. Nous pouvons dire que l'agent est en mesure d'anticiper l'évolution à venir de la contrainte qui lui est appliquée durant la phase de décélération.

L'étude de la boucle d'hystérésis nous montre clairement deux comportements distincts selon que le conducteur est dans une phase d'augmentation de la contrainte, ou au contraire de réduction de celle-ci. Cette observation est bien cohérente avec l'expression du modèle que nous avons fait précédemment qui est composée de deux sous-comportements : un qui accélère, et un qui maintient une distance de sécurité. Nous retrouvons donc les influences respectives des équations 5.10 et 5.11.

Le comportement de décélération qui cherche à anticiper l'évolution de la contrainte est un comportement tactique. Il correspond à la mise en œuvre d'une stratégie d'adaptation à une évolution future de la situation de conduite. Nous voyons donc que cette forme de capacité d'anticipation du comportement se traduit dans l'étude de la boucle à une « déviation » du phénomène d'hystérésis usuel. Nous n'observons plus un retard, ce qui se traduit par un positionnement du tracé de la boucle d'hystérésis « de l'autre côté de l'équilibre ».

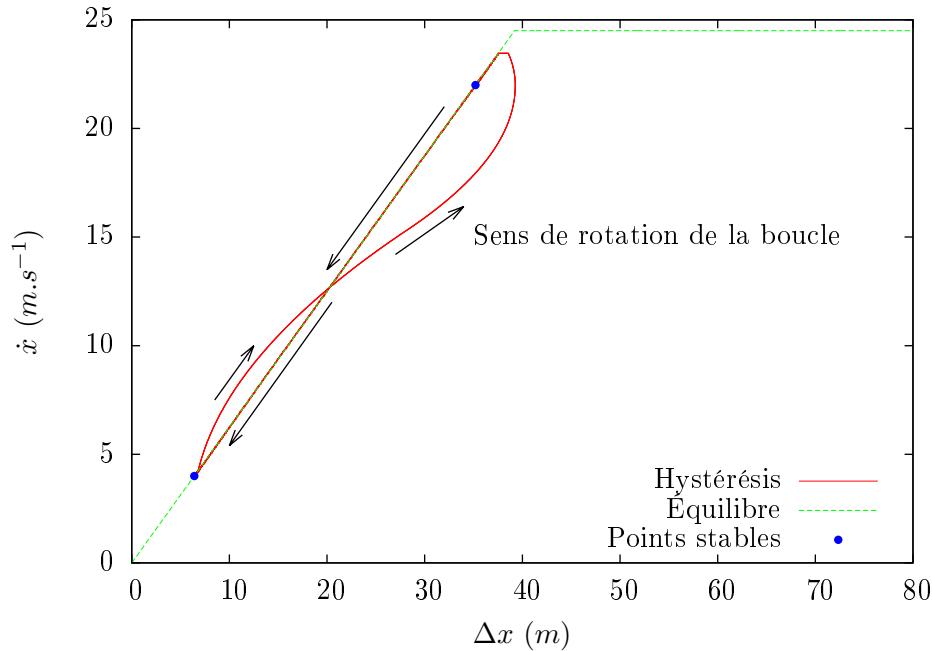


FIGURE 5.9 – Comportement d'un véhicule ARCHISIM

5.3.3.3 ARCHISIM

Le dernier modèle que nous avons choisi d'étudier est celui implanté dans la plate-forme de simulation ARCHISIM.

La figure 5.9 montre la boucle d'hystérésis pour un agent ARCHISIM. Cette boucle a une forme singulière en "8", très différente des boucles d'hystérésis rencontrées jusqu'ici.

Tout d'abord, nous remarquons que l'une des moitiés de la boucle, qui correspond à la phase d'augmentation de la contrainte (décélération), se trouve coïncider parfaitement avec les états d'équilibre. La réaction de l'agent ARCHISIM se fait donc sans aucun retard lorsque le véhicule précédent ralentit. Nous pouvons donc en déduire qu'aucune des deux contraintes généralement identifiée comme cause du retard de l'adaptation d'un conducteur (temps de perception et de réaction, capacités de décélération limitée des véhicules) n'a d'influence sur le comportement de décélération. Par ailleurs, dans la phase d'accélération nous pouvons observer que la première partie de la courbe est au dessus de l'équilibre et que la seconde est en dessous. Dans le début de sa phase d'accélération, l'agent se trouve dans une situation où le gap disponible devant lui est trop faible comparativement à sa vitesse courante, situation qui se résorbe par la suite.

Nous avons encore une apparition de ce que nous pouvons qualifier d'anticipation dans laquelle l'agent accepte une situation sur-contrainte s'il sait que cette contrainte va s'estomper rapidement. Un agent ARCHISIM adoptant une stratégie de court terme si la gêne qu'il subit est considérée comme courte, cette observation est tout à fait cohérente avec notre connaissance du modèle. C'est le cas lorsque le véhicule précédent est lui-

même en phase d'accélération. Tout comme pour le modèle IDM, nous observons donc ici une déviation du schéma d'hystérésis lorsque le comportement montre des capacités d'anticipation à court terme.

5.3.3.4 Synthèse

Cette première analyse des boucles d'hystérésis a permis de mettre en avant la capacité de certains agents à anticiper l'évolution de la contrainte à laquelle ils sont soumis. Nous pouvons donc opérer une classification des modèles sélectionnés selon qu'ils soient « réactifs » ou « anticipatifs ». Une classification plus précise des capacités d'anticipations des agents telle que proposée par BUTZ et al. [Butz et al., 2003] nécessite une connaissance interne des modèles, ce qui exclut l'approche « boîte noire ».

L'étude des phénomènes d'hystérésis apparaissant dans le comportement des conducteurs nous permet donc, via une étude de type « boîte noire » de reconstruire les propriétés du comportement des agents. L'expérimentation sur ceux-ci est suffisante pour obtenir des informations sur le comportement *via* une étude des états d'équilibre, puis *via* une étude de la réaction à une contrainte variable.

Notons que l'analyse que nous faisons ici ne se limite pas aux phénomènes d'hystérésis. L'hystérésis correspond, par définition, à un phénomène de retard. Or, nous nous intéressons ici tout autant aux phénomènes de retard qu'à ceux d'anticipation qui ne peuvent être qualifiés d'hystérésis au sens « strict » du terme. L'utilisation de ce terme pour qualifier notre méthode d'analyse peut donc sembler abusif. Nous continuons toutefois à utiliser le terme d'hystérésis pour qualifier notre méthode pour plusieurs raisons :

- L'observation de phénomènes d'hystérésis est déjà mentionnée dans la littérature, et dans la mesure où nos travaux s'inscrivent dans la lignée de ces observations initiales, nous avons convenu de conserver le terme déjà utilisé.
- Bien que portant une attention particulière aux phénomènes d'anticipation, nous les détectons par l'apparition « d'anomalies » par rapport à un phénomène d'hystérésis usuel. La référence à ce concept reste donc particulièrement centrale dans notre méthode. Il s'agit d'une étude générale du lien temporel qui peut exister entre les évolutions de l'environnement dans lequel un conducteur est immergé et ses réactions. L'hystérésis « stricte » (au sens étymologique du terme) est un cas particulier des phénomènes que nous cherchons à étudier. Dans notre étude, le terme d'hystérésis est donc à comprendre dans un sens élargi de dépendance d'un système à l'évolution au fil du temps de son environnement.

5.3.4 Temporalité des décisions et modèle en trois couches

La méthode d'étude que nous venons de présenter fait apparaître, via la distinction entre états stables et états transitoires, trois composantes dans un même comportement :

La composante de longue durée Les états d'équilibre illustrent la stratégie de conduite des conducteurs en situation stable. Il s'agit des comportements que le conducteur adopte sur de longues durées, reflétant la stratégie de long terme de ce dernier.

La composante de transition réactive Les phénomènes d'hystérésis qui apparaissent lors de la transition d'un régime stable à un autre sont révélateurs des propriétés réactives du comportement du conducteur. Ce phénomène est essentiellement du au temps de réaction du conducteur et aux limitations de son véhicule.

La composante d'anticipation Enfin, les rotations dans le sens horaire de la boucle d'hystérésis apparaissant dans le comportement de certains conducteurs sont révélatrices de leur capacités d'anticipation. Elle leur permettent d'élaborer des stratégies à exécuter sur des périodes de temps relativement courtes dans le but de s'adapter au mieux à un probable état futur du trafic. Cette adaptation anticipée permet de ne pas « subir » les changements de trafic et ainsi améliorer le confort de conduite.

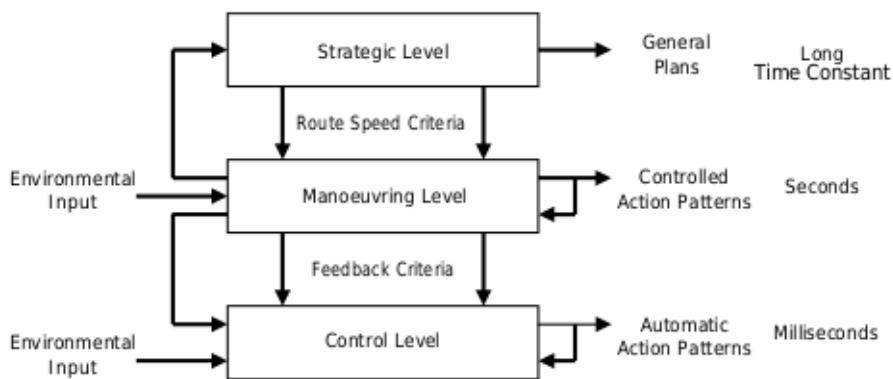


FIGURE 5.10 – Découpage du comportement en couches selon la durée des actions concernées. Figure issue de [Michon, 1985].

L'étude des phénomènes d'hystérésis fait apparaître une séparation du comportement liée aux stratégies de long terme, aux stratégies de court terme et enfin aux adaptations réactives. Cette propriété est particulièrement intéressante puisqu'elle permet de mettre en évidence différents aspects en lien avec l'architecture générale présentée par [Michon, 1985]. L'analyse de MICHON découpe le comportement des conducteurs selon trois couches :

La couche stratégique Cette couche prend en charge la gestion des situations de longue durée (supérieures à une dizaine de secondes). Cette couche de haut niveau gère donc tous les aspects de suivi d'itinéraire, de sélection de voie sur une infrastructure à plusieurs voies etc.

La couche tactique La couche tactique (ou parfois appelée couche manœuvrière) se charge de la gestion des situations courtes dans le temps. Elle s'occupe donc des manœuvres telles que le changement de voie (y compris la problématique de recherche de créneau pour déboîter évoquée dans la partie 2.2.2).

La couche opérationnelle La couche opérationnelle est en charge de la mise en œuvre des différentes stratégies décidées dans les couches supérieures (donc, du maintien des distances de sécurité, du suivi de trajectoire...)

Couche dans l'architecture de MICHON	Propriétés observables de la boucle d'hystérésis
Couche stratégique	Les états d'équilibre que les véhicules cherchent à rejoindre correspondent directement à la mise en œuvre des stratégies de longue durée.
Couche tactique	Toutes les variations aux phénomènes d'hystérésis « classiques » correspondent à l'effet induit par la couche tactique, qui cherche à compenser par des capacités d'anticipation l'effet des variations de contraintes subies par le conducteur
Couche opérationnelle	Les phénomènes d'hystérésis habituels observés dans les comportements sont fortement liés aux capacités de mise en œuvre et de maintien des stratégies de long terme. Les aspects de contrôle sont sensibles aux paramètres liés à la dynamique des véhicules simulés.

TABLE 5.2 – Lien entre les couches du comportement décrites par [Michon, 1985] et les propriétés mises en avant par l'étude des phénomènes d'hystérésis dans les comportements.

Le tableau 5.2 synthétise le lien direct qui existe entre les propriétés que notre méthode permet de mettre en avant et les composants correspondants de l'architecture de MICHON. Ce lien est particulièrement important dans la mesure où il permet de rattacher les propriétés que nous observons à un cadre théorique pré-existant. Ce découpage du comportement en différentes couches, les couches les plus « hautes » chargées des stratégies de long terme et les couches les plus « basses » chargées des aspects de contrôle trouve une place importante dans la littérature de la modélisation. Par exemple [Luo and Bölöni, 2012] utilisent un modèle à base d'équation (le modèle HDM évoqué dans la partie 2.3) pour décrire la tâche de suivi et ajoute des couches au-dessus dont le but est de définir des stratégies à long terme. Cet ajout concerne essentiellement la sélection stratégique des voies que pourrait adopter le conducteur. Nous pouvons également citer [Toledo et al., 2007] qui décrivent le comportement des conducteurs comme une superposition de comportements, allant des stratégies de long terme pour les couches hautes aux stratégies de suivi pour les couches basses.

5.4 Étude de l'impact des phénomènes d'hystérésis sur l'émergence

Dans la section précédente, nous avons étudié la réaction d'un véhicule face à une contrainte à laquelle il était soumis. Nous allons maintenant regarder comment se comporte un peloton homogène de véhicules face à cette même contrainte. Nous étudions particulièrement comment cette contrainte de proche en proche évolue au sein du pelo-

ton.

5.4.1 Étude de la propagation d'une perturbation

Lorsqu'un véhicule subit la variation d'une contrainte, il s'adapte à cette dernière et pour ce faire doit adapter — entre autre — sa vitesse. Cette adaptation pourra donc avoir un impact sur la contrainte qu'il impose lui-même comme leader à tout véhicule qui le suivrait. Dans l'objectif de déterminer si les différents comportements individuels peuvent influencer l'émergence de phénomènes macroscopiques, nous cherchons donc à étudier comment une contrainte se propage dans une population de proche en proche. Nous étudions donc deux cas. Le premier s'inspire du scénario précédemment développé pour étudier la propagation de la perturbation dans un peloton. Le second scénario simule le cas de l'insertion d'un véhicule à basse vitesse sur une infrastructure routière. Ce scénario est inspiré des travaux de [Duret, 2010].

5.4.2 Étude de la réaction d'un peloton

Nous nous intéressons ici à l'évolution du tracé de la courbe d'hystérésis apparaissant dans le comportement de chacun des membres d'un peloton. Pour ce faire, nous utilisons un scénario d'étude très similaire à celui utilisé dans la section précédente. Dans chacun des scénarios joués, un véhicule leader adoptant le même profil de vitesse présenté dans la figure 5.6 est utilisé. Ce leader est suivi d'un peloton homogène de véhicules dont le comportement est donné par le modèle testé durant la simulation. Au début de la simulation, le peloton suiveur circule à l'équilibre, c'est à dire que chaque véhicule circule à la même vitesse que le véhicule contraignant, et que chaque suiveur garde un créneau face à lui correspondant à un état d'équilibre.

Afin de pouvoir quantifier l'évolution de l'amplitude de la boucle d'hystérésis, et ainsi comparer le comportement de deux véhicules se suivant, nous introduisons un opérateur de pseudo distance \mathcal{D} évaluant la pseudo distance séparant la courbe d'hystérésis d'un véhicule avec le tracé des états d'équilibre de ce véhicule. Cette opérateur donne la plus grande différence de vitesse (en valeur absolue) observée entre la courbe d'équilibre et la boucle d'hystérésis sur l'ensemble du domaine de définition de cette dernière. Nous parlons ici de pseudo distance dans la mesure où 1) nous comparons des courbes ayant des espaces de définition distincts, ce qui peut poser différents problèmes dans le cas général et 2) nous ne démontrons en aucun cas que l'opérateur utilisé a les propriétés d'un opérateur de distance (symétrie, séparation et inégalité triangulaire). Dans le reste de ce document, nous utiliserons le terme de distance pour se référer à la pseudo distance que nous venons de définir.

5.4.2.1 Optimal Velocity

La figure 5.11(a) montre les boucles d'hystérésis de différents agents Optimal Velocity impliqués dans la simulation (un agent sur 4 pour des raisons de lisibilité). Nous pouvons observer que sur les premiers agents, la boucle n'est pas la même de proche en proche

(elle se dilate), mais elle semble atteindre une forme limite une fois la tête du peloton passée. Ceci est confirmé par la figure 5.11(b) qui montre une forte augmentation de la distance entre la boucle et l'équilibre sur les 10 premiers véhicules. Au-delà, la distance se stabilise. Ces deux éléments mettent en avant l'apparition d'un comportement limite qui est reproduit d'un véhicule à l'autre.

Par ailleurs, nous remarquons l'apparition de points singuliers sur la boucle finale observée. L'ensemble de ces points se trouvent sur la courbe d'équilibre. Nous retrouvons tout d'abord des points aux vitesses 4 et $22m/s$ qui correspondent à l'intensité des contraintes appliquées, mais également d'autres à 0.9 et $22.4m/s$ qui émergent. La contrainte qui se propage de proche en proche dans la population est différente de celle que nous lui appliquons. Nous observons une perturbation émergente liée au modèle et non à la situation. Elle correspond à la boucle initialement observée par BANDO [Bando et al., 1994], dont les bornes inférieures et supérieures ne dépendent pas de la contrainte appliquée, mais du modèle de comportement et de ses paramètres.

Enfin, notons que la boucle d'hystérésis permet d'étudier le comportement d'agents indépendamment du facteur temporel. Le même graphique nous permet de superposer et confronter différentes réactions qui ne se produisent pas au même instant de la simulation.

5.4.2.2 Intelligent Driver Model

La figure 5.12 montre la propagation de la perturbation dans une population IDM. Cependant, pour des raisons de lisibilité, et étant donné que l'ensemble des boucles ont des propriétés similaires, seule la boucle du véhicule $n^o 10$ a été reportée sur la figure 5.12(a). Cette dernière montre une boucle en forme de "8". La phase de décélération est similaire à celle observée dans la figure 5.8 et exhibe la même capacité d'anticipation. La différence majeure provient de la phase d'accélération qui a une forte pente au début, coupe la courbe de décélération puis rejoint la courbe d'équilibre tôt (à environ $19m/s$). Une fois l'équilibre rejoint, le véhicule "glisse" dessus pour atteindre sa vitesse maximale. La figure 5.12(c) montre que d'un véhicule à l'autre, la vitesse maximale atteinte est de plus en plus faible. Les derniers agents du peloton n'arrivent pas à rejoindre la vitesse de l'agent contraignant avant que ce dernier ne décélère, ce qui atteste d'une convergence très lente dans la dernière phase d'accélération.

Par ailleurs, la distance entre la boucle d'hystérésis et la courbe d'équilibre décroît clairement le long du peloton (comme montré par la figure 5.12(b)) attestant d'une certaine absorption de la contrainte appliquée. Ce phénomène est opposé à celui observé avec des agents OV qui accentuaient la contrainte subie jusqu'à une certaine borne.

5.4.2.3 ARCHISIM

Enfin, la figure 5.13 montre la réaction d'une population d'agents ARCHISIM. Tout d'abord, nous pouvons remarquer une nette différence entre la boucle de l'agent $n^o 1$ (identique à celle de la figure 5.9) et les autres, et ce bien que les comportements d'agents soient les mêmes. Cette différence reflète le fait que la boucle dépend d'une part du comportement de l'agent suiveur, mais également de l'agent leader. En effet, $\Delta x = x_{n-1} -$

x_n est une grandeur influencée par le couple suiveur / suivi. Nous pouvons donc dire que la boucle d'hystérésis reflète une interaction plutôt qu'un comportement seul.

Ensuite, il apparaît clairement que, hormis pour le premier, tous les agents se trouvent dans la zone sur-contrainte durant la phase d'accélération. La forme de la boucle d'hystérésis de chacun de ces agents est triangulaire et son aire réduit régulièrement d'un agent à l'autre. La figure 5.13(b) fait clairement apparaître qu'après 20 agents, l'aire de ce triangle devient nulle. La forme triangulaire de l'accélération reflète le fait que dans un premier temps, les agents acceptent une sur-contrainte. Dans un second temps (correspondant au côté horizontal du triangle), les agents régulent leur vitesse afin de rejoindre un état d'équilibre.

Ce changement de comportement montre que les agents changent de stratégie à un moment de l'accélération, et passent d'une gestion de contrainte courte à une gestion de contrainte longue. Ce moment coïncide avec le moment où le leader a atteint sa vitesse désirée ($22m/s$) et a cessé d'accélérer. La contrainte qu'il exerce alors sur le peloton devient stable et ne peut plus être considérée comme temporaire par les agents ARCHISIM.

Dans ce scénario, nous avons des agents qui réagissent à un stimulus externe, la fin de la relaxation de la contrainte appliquée au peloton, que nous ne pouvons représenter directement sur la boucle d'hystérésis. Cet élément montre que le choix de la grandeur retenue pour caractériser la contrainte appliquée à un agent n'est pas anodin et peut cacher une partie de la situation dans laquelle l'agent est plongé. L'étude des phénomènes d'hystérésis permet de caractériser un comportement, mais l'analyse fine d'une réaction peut requérir une analyse de données issues de la simulation qui n'apparaissent pas sur le tracé de l'hystérésis.

5.4.3 Réaction à une insertion à basse vitesse

Les résultats précédents nous ont permis de dégager deux groupes de modèles basés sur leurs capacités d'anticipation : OV d'un côté qui a un comportement purement réactif, et IDM et ARCHISIM de l'autre qui montrent des capacités d'anticipations. Nous avons également vu que ces deux derniers modèles avaient un effet d'atténuation sur une perturbation lorsque celle-ci se propage dans une population d'agents.

Nous voulons maintenant étudier quel est l'effet de ces propriétés sur le déroulement d'une simulation en général, et sur l'écoulement du trafic en particulier. Pour ce faire, nous étudions une situation dans laquelle un peloton de véhicules évolue à l'équilibre sur une infrastructure de type autoroutière, et devant lequel un véhicule va s'insérer à vitesse faible, forçant le peloton à s'adapter pour éviter la collision. L'infrastructure n'est dotée que d'une seule voie afin que les résultats ne soient pas perturbés par d'éventuels changements de voie.

La figure 5.14 montre les trajectoires de l'ensemble des véhicules impliqués dans le scénario, et ce pour l'ensemble des modèles sélectionnés. Nous voyons que dans chacune des simulations, à $t = 0$, le peloton évolue à vitesse constante et à l'équilibre (la vitesse de chacun des membres du peloton est constante). Au temps $t = 5s$, un nouveau véhicule s'insère forçant le peloton à s'adapter. Nous distinguons clairement deux cas :

- 5.14(a) où nous observons l'apparition de vagues dites de sur-congestion remontant le long du flot de véhicules.
- 5.14(b) et 5.14(c) où l'insertion du nouveau véhicule provoque une réduction temporaire de la vitesse moyenne du flot de véhicules à proximité du point d'insertion.

Or, nous savons de par notre connaissance des modèles, que l'information se propage de manière analogue dans les deux premières simulations (perception de l'adaptation de proche en proche) tandis que dans la troisième chaque agent peut percevoir l'état du trafic en aval et adapte sa stratégie. Le mode de transmission de l'information ne peut donc être retenu comme élément explicatif des différents phénomènes observés dans les simulations. La capacité des modèles à anticiper, telle que mise en avant par l'étude des boucles d'hystérésis, permet donc d'opérer une classification des modèles plus pertinente dans le cas applicatif que nous avons développé.

5.5 Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté une méthode d'analyse qualitative des comportements de suivi de conducteurs. Cette méthode permet d'appréhender et d'étudier un comportement quelconque, sans connaissance *a priori* sur celui-ci. Elle permet de comprendre les actions d'un conducteur et de replacer l'analyse produite dans le cadre théorique fourni par [Michon, 1985]. Dans ce cadre, nous interprétons le comportement comme une superposition de couches opérant chacune à une échelle de temps distincte. Nous pouvons ainsi aisément différencier ce qui dans un comportement relève de la stratégie de conduite longue et ce qui relève de la manœuvre d'adaptation momentanée. Nous avons abordé le lien existant entre les stratégies individuelles longues des membres d'une population de véhicules et les états de trafic observables à un niveau macroscopique. Nous avons également mis en avant comment différentes stratégies d'adaptation à une même perturbation peuvent soit dégénérer en l'apparition de sur-congestions au niveau macroscopique soit absorber la perturbation subie. Ceci montre l'importance d'une reproduction adéquate des stratégies de moyen terme des conducteurs dans le cadre de simulations microscopiques.

Le principal intérêt de la méthode proposée est de permettre une étude de type «boîte noire». Cette méthode est utilisée pour identifier et caractériser certaines propriétés des comportements longitudinaux des sujets étudiés. Dans la suite de ces travaux nous mettrons en œuvre cette méthode dans le but d'étudier des comportements humains et de spécifier le comportement désirable d'un modèle d'agents.

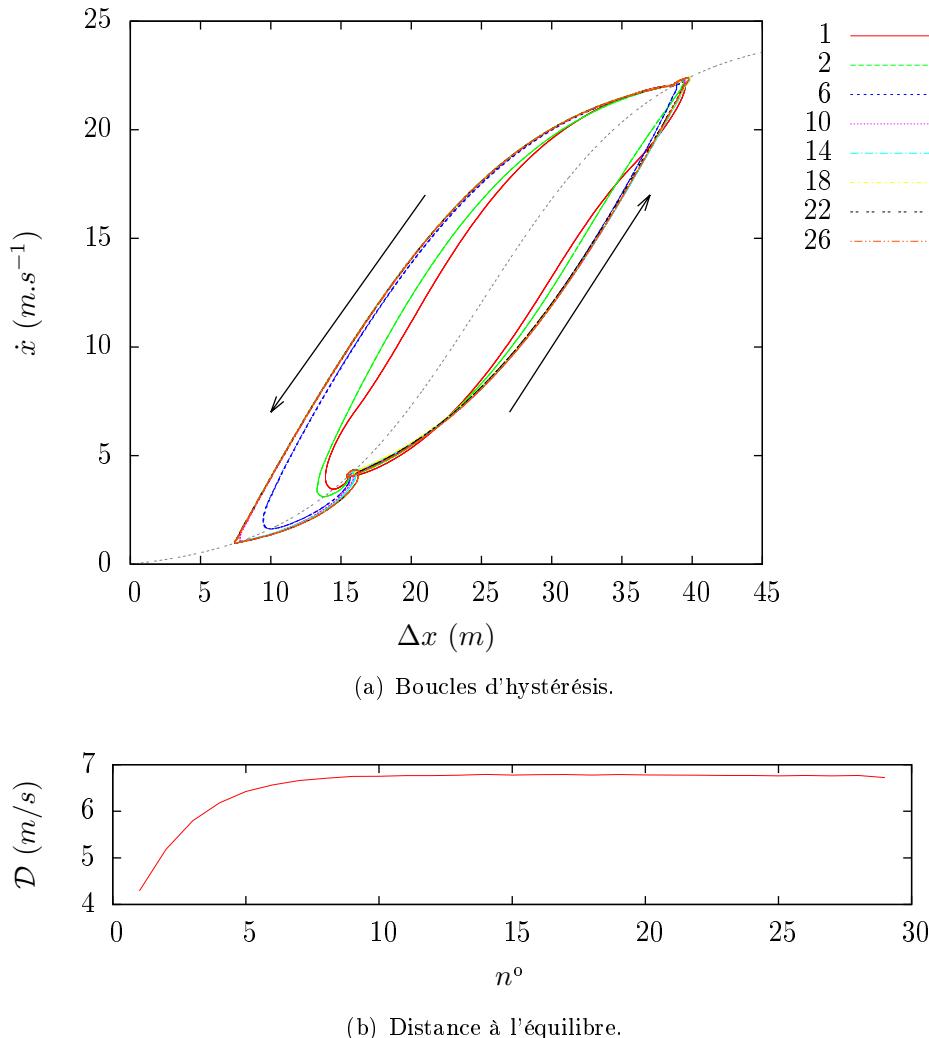
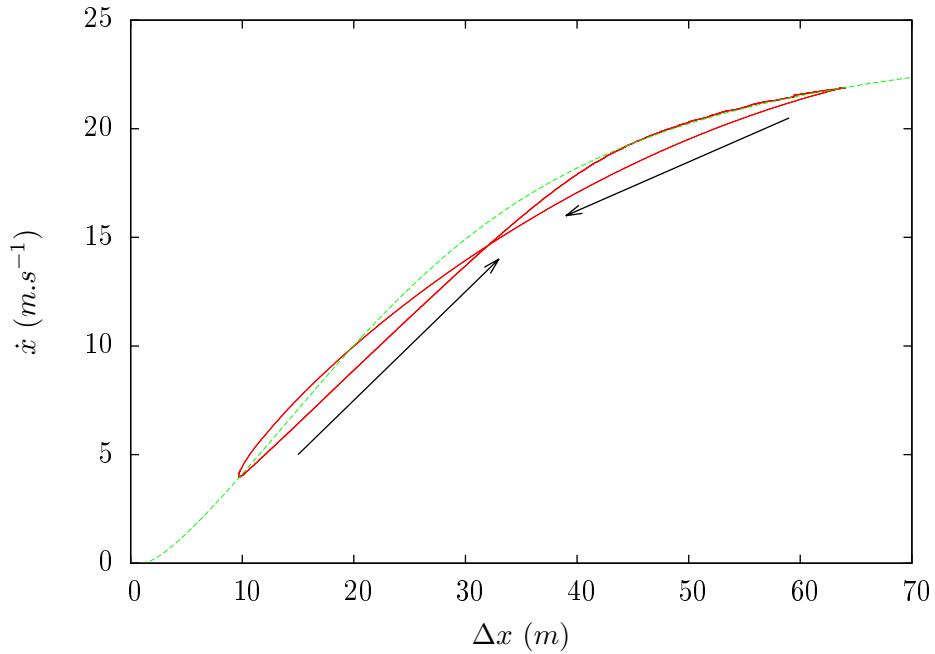
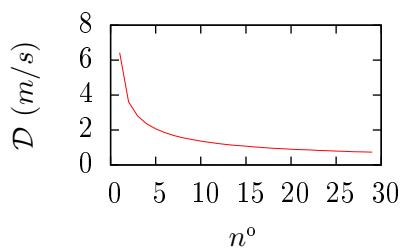


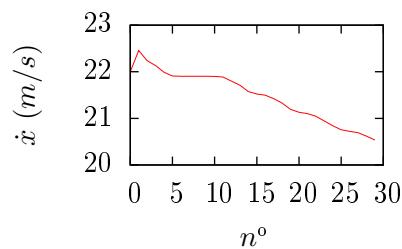
FIGURE 5.11 – Évolution de la boucle d'hystérésis dans une population d'agents OV (véhicules n° 1, 2, 6, 10, 14, 18, 22, 26).



(a) Boucle d'hystérésis de l'agent n° 10. Les boucles d'hystérésis des autres agents du peloton ne sont pas reportées sur cette figure afin de maintenir la lisibilité qui serait générée par un fort niveau de chevauchement



(b) Distance à l'équilibre.



(c) Vitesse maximum durant la simulation.

FIGURE 5.12 – Évolution de la boucle d'hystérésis dans un population d'agents IDM.

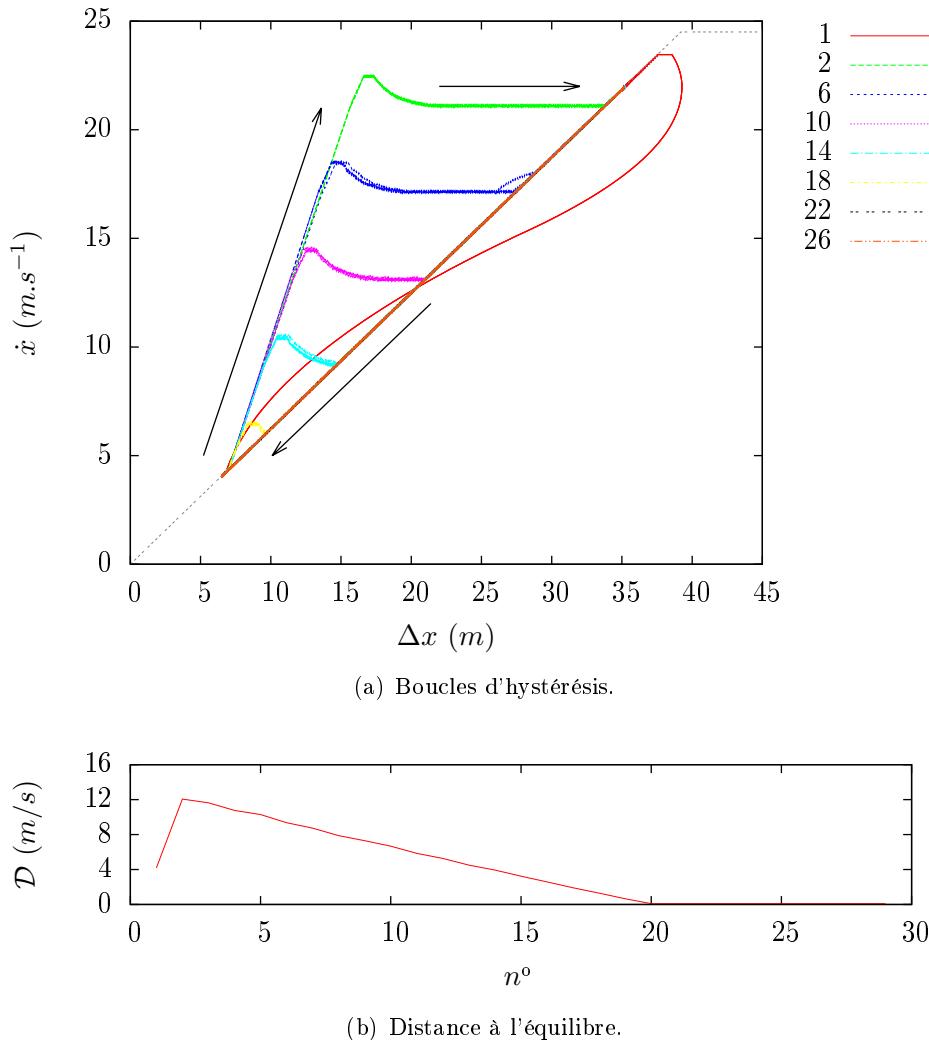


FIGURE 5.13 – Évolution de la boucle d'hystérésis dans une population d'agents ARCHISIM (agent n^o 1, 2, 6, 10, 14, 18, 22, 26).

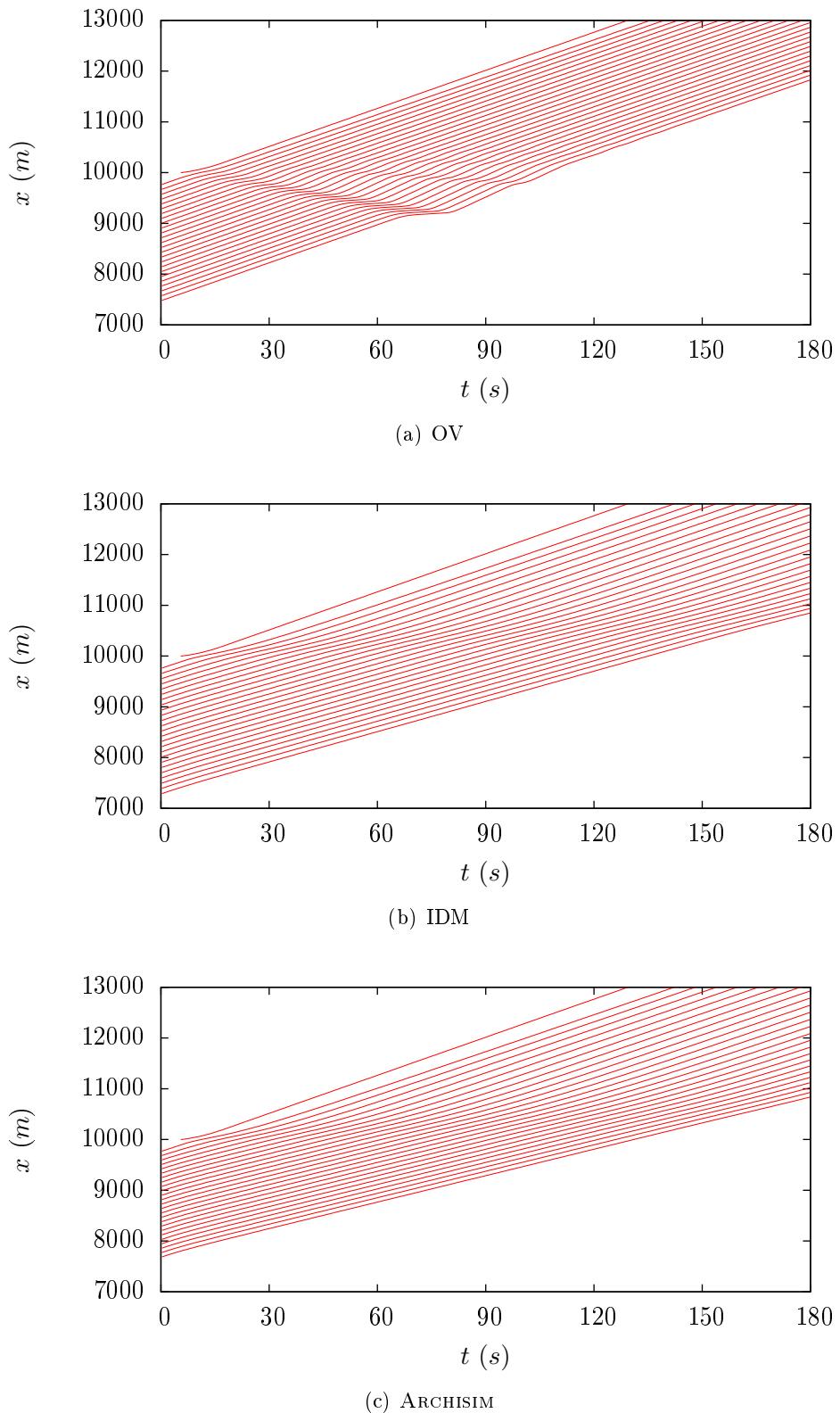


FIGURE 5.14 – Diagramme temps/position montrant la réaction d'un peloton OV, IDM et ARCHISIM subissant une insertion à basse vitesse.

Chapitre 6

Le modèle ArchiPL

Sommaire

6.1	introduction	109
6.2	La décélération des PL	110
6.2.1	Comportement de référence : utilisation des données NGSIM . .	110
6.2.2	La gestion des décélérations dans le modèle ARCHIPL	119
6.3	L'accélération des véhicules lourds	123
6.3.1	Les capacités d'accélération des PL ARCHISIM	123
6.3.2	Modifications pour le modèle ARCHIPL	124
6.3.3	Évaluation des capacités d'accélération du modèle ARCHIPL .	127
6.4	L'architecture finale du modèle ARCHIPL	129
6.4.1	Architecture générale du modèle ARCHIPL	129
6.4.2	Couche stratégique	131
6.4.3	Couche tactique	133
6.4.4	Couche opérationnelle	135
6.5	Étude expérimentale à l'échelle macroscopique	135
6.6	Conclusion	138

6.1 introduction

Nous avons présenté, dans le chapitre 4 une méthodologie guidant l'amélioration de modèles d'agents. Le chapitre 5 a été l'occasion de présenter une méthode particulière que nous avons développés afin d'analyser les comportements de conducteurs. Nous présentons dans ce chapitre l'application de notre méthodologie générale pour la réalisation d'un modèle de véhicules lourds, le modèle ARCHIPL, en tirant partie entre autre de notre méthode d'analyse. Le modèle proposé est une spécialisation du modèle préexistant ARCHISIM [Espié et al., 1994].

Nous présentons les deux principaux aspects du comportement sur lesquels nous avons travaillé. Tout d'abord, nous présentons comment nous avons utilisé la méthode d'analyse des comportements conducteurs basée sur l'étude des phénomènes d'hystéresis pour

modéliser la stratégie de décélération des poids lourds. Nous présentons ensuite l'analyse des accélérations des poids lourds dans ARCHISIM, en quoi leur mise en œuvre est erronée et comment nous l'avons rectifiée.

Le modèle de comportement à partir duquel nous travaillons est le modèle ARCHISIM [Espié et al., 1994]. Ce modèle est la synthèse de nombreux travaux de recherche dont certains ont été évoqués dans la partie 3.3. La ligne directrice ayant animé ces différents travaux est présentée dans [Espié, 2004]. Le processus de décision du comportement longitudinal dans ARCHISIM — processus sur lequel nous allons nous concentrer — est présenté dans la partie 5.3.1.3. Dans ce chapitre, nous utilisons la majorité des composants de ce modèle comme des boîtes noires. Nous ne nous focalisons que sur des aspects particulier du modèle sur lesquels nous apportons des modifications.

6.2 La stratégie de décélération des véhicules lourds

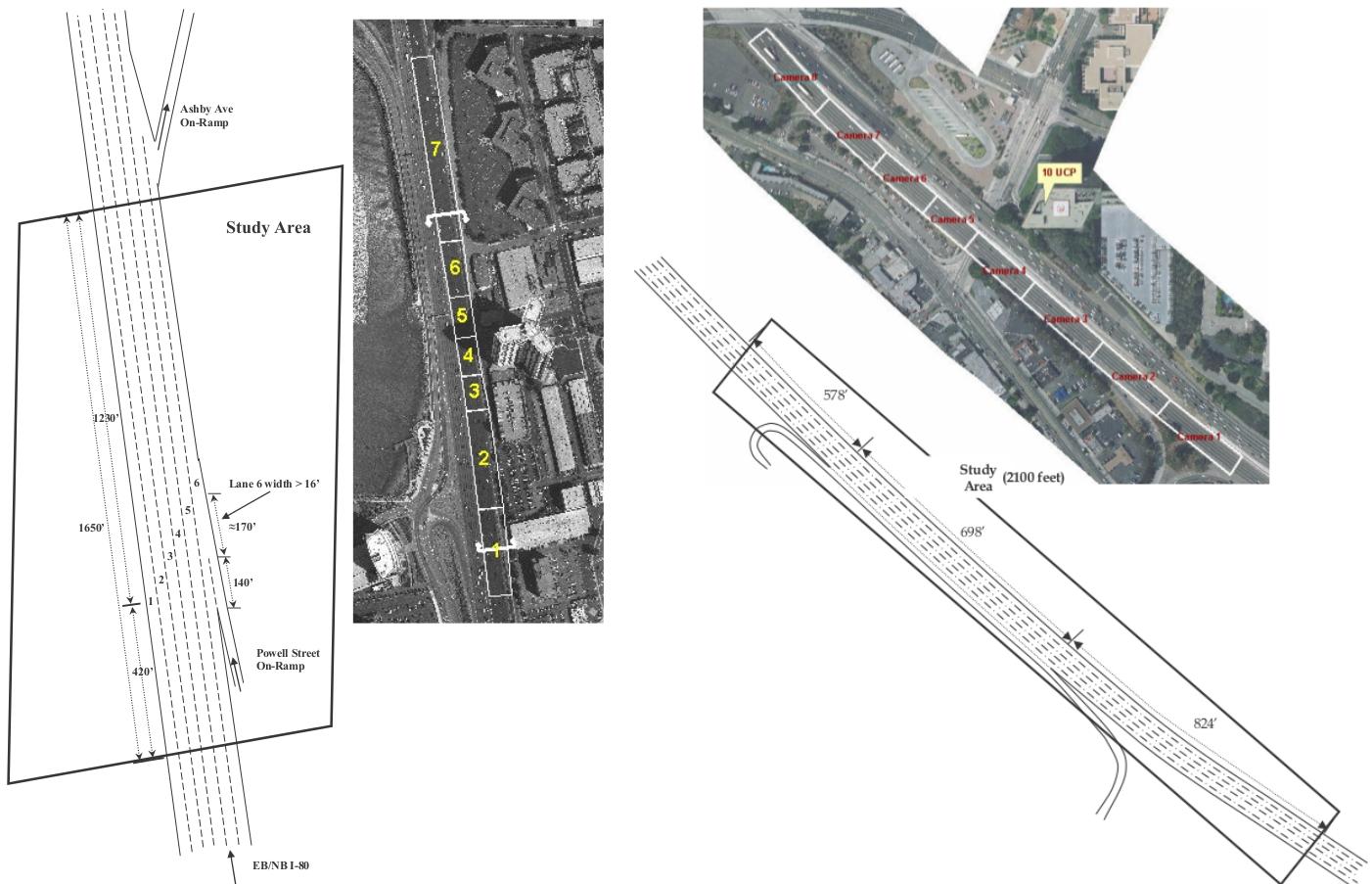
Nous avons montré dans le chapitre 5 en quoi l'analyse des phénomènes d'hystéresis apparaissant dans les comportements des conducteurs est révélatrice de leurs stratégies de conduite et en quoi une partie de cette stratégie peut influencer l'apparition de phénomènes émergeants tels que des congestions. Nous nous intéressons maintenant à savoir quelles sont les propriétés caractéristiques du comportement des véhicules lourds et en quoi elles peuvent diverger de celles de véhicules légers.

6.2.1 Comportement de référence : utilisation des données NGSIM

Afin de pouvoir étudier des comportements de véhicules poids lourds, nous avons utilisé les données mises à disposition par le projet NGSIM. Le projet NGSIM est un projet émanant du «*United States Department of Transportation*» (USDOT)¹ et du «*Federal Highway Administration*» (FHWA)². Durant ce projet, une capture vidéo de l'écoulement du trafic a été effectuée à l'aide de caméras placées sur des immeubles jouxtant des infrastructures autoroutières. Par la suite, les trajectoires de chaque véhicule apparaissant sur les vidéos ont été extraites à l'aide de traitements numériques. Les vidéos ainsi que l'ensemble des trajectoires extraites sont mises à disposition de la communauté scientifique sur le site internet <http://ngsim-community.org>.

1. Département des transports des États-Unis

2. Administration fédérale des autoroutes



(a) Vue aérienne du dispositif d'enregistrement des trajectoires sur l'I80 (b) Vue aérienne du dispositif d'enregistrement des trajectoires sur l'US-101

FIGURE 6.1 – Vues aériennes des sites d'enregistrement des trajectoires utilisées.

Durant nos travaux, nous avons été amenés à utiliser des enregistrements issus de deux sites. Les premiers enregistrements ont été effectués le long de l'I-80 à Emerville, proche de San Francisco en Californie le 13 avril 2005 durant les plages horaires allant de 16h00 à 16h15, de 17h00 à 17h15 et de 17h15 à 17h30. Le schéma du site de recueil de données est présenté dans la figure 6.1(a). Le second site d'enregistrement se situe le long de l'US-101 à Los Angeles également en Californie. Les enregistrements ont été effectués le 15 juin 2005 sur les plages horaires allant de 07h50 à 08h05, de 08h05 à 08h20 et de 08h20 à 08h35. Le schéma du site de recueil de données est présenté dans la figure 6.1(b).

Le tableau 6.1 résume la composition du trafic empruntant les infrastructures de l'I-80 et de l'US-101. Nous pouvons remarquer que la part de poids lourds observée sur l'US-101 et l'I-80, soit respectivement 2.25% et 3.74%, est inférieure à ce qui peut être observé sur les grandes autoroutes françaises (15% du trafic empruntant les autoroutes gérées par les sociétés APRR et AREA en 2010³).

TABLE 6.1 – Composition du trafic dans les données NGSIM

Fichier	Motos	Véhicules légers	Véhicules lourds	Total
US-101_0750-0830	30 (1.38%)	2086 (96.17%)	53 (2.44%)	2169
US-101_0500-0820	10 (0.50%)	1963 (97.32%)	44 (2.18%)	2017
US-101_0820-0835	5 (0.26%)	1870 (97.17%)	40 (2.09%)	1915
Total (US-101)	45 (0.74%)	5919 (97.02%)	137 (2.25%)	6101
I-80_0400-0415	14 (0.68%)	1942 (94.64%)	96 (4.68%)	2052
I-80_0500-0515	24 (1.31%)	1742 (94.88%)	70 (3.81%)	1836
I-80_0515-0530	17 (0.95%)	1724 (96.31%)	49 (2.74%)	1790
Total (I-80)	55 (0.97%)	5408 (95.24%)	215 (3.74%)	5676

6.2.1.1 Pertinence des données

Il nous apparaît primordial de discuter ici la pertinence du jeu de données que nous utilisons. Les trajectoires relevées par ce projet l'ont été sur des routes américaines, et le trafic circulant sur celles-ci se distinguent en plusieurs points des trajectoires européennes :

- L'infrastructure ainsi que son utilisation sont significativement différentes de ce que nous pouvons rencontrer en France. Chaque sens de circulation est composé de six voies distinctes donc les règles d'utilisation sont différentes de celles que nous connaissons. Par exemple, pour le jeu de données de l'I80, la sixième voie de circulation est dédiée au trafic traversant les zones des agglomérations (voie usuellement appelée «*transit-lane*»⁴) sur laquelle les usagers sont peu susceptibles d'effectuer des changements de voie et sur laquelle la vitesse pratiquée est significativement différente des autres voies (comme l'illustre la figure 6.2). Il s'en suit une répartition des véhicules entre les voies tout à fait singulière. De même, les flux de véhicules

3. <http://www.aprr.fr/fr/actualites/avec-vous-sur-la-route-roulez-en-toute-securite-a-cote-des-poids>

4. voie de transit

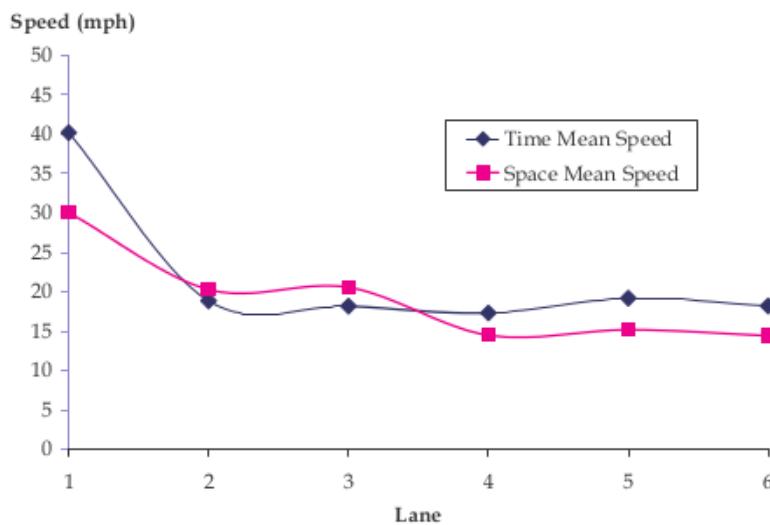


FIGURE 6.2 – Vitesse moyenne des véhicules sur l'I-80 en fonction de la voie de circulation (figure issue du rapport d'analyse du trafic enregistré entre 16h00 et 16h15).

passant d'une voie à une autre sont fortement influencés par cette réglementation particulière. Pour ces raisons ce jeu de données n'est pas directement exploitable pour étudier les stratégies de sélection et de changement de voies des conducteurs non américains. Ainsi, un modèle de changement de voie développé à partir de ces données ne pourrait être appliqué à un trafic européen.

- La population des véhicules empruntant l'infrastructure est différente. En ce qui concerne les poids lourds, les véhicules nord-américains ont des chargements plus importants qu'en Europe et disposent d'une puissance accrue.
- Enfin, notons que les enregistrements sont effectués dans des zones péri urbaines. Les usages de l'infrastructure sont donc à distinguer de l'usage d'autoroutes «classiques». Ceci permet d'expliquer la relativement faible concentration de véhicules lourds que nous avons noté précédemment.

Ce jeu de données a été sélectionné car il s'agit du seul jeu de données ouvertement disponible à la communauté scientifique au moment où nous avons entamé nos travaux. Depuis, un projet similaire, le projet MOCOPPO, a été mené en France. En l'absence de certitude quant au calendrier de disponibilité des données de ce projet, nous lui avons préféré le projet NGSIM. Par ailleurs, malgré les limites que nous venons d'évoquer, il convient de souligner le caractère particulièrement riche des informations proposées nous permettant d'étudier en détail les trajectoires de chacun des véhicules enregistrés.

Pour les raisons que nous venons d'évoquer, les données de référence que nous utilisons doivent être considérées avec un certain recul. L'analyse des phénomènes d'hystérésis apparaissant dans les comportements enregistrés n'est que peu influencée par les stratégies de sélection de voie qui sont le principal élément de distinction avec un trafic français. Dans la mesure où nous nous intéressons tout particulièrement aux comportements de

suivi, cette limitation n'est pas bloquante. Nous faisons donc cette hypothèse d'indépendance des comportements de suivi avec les comportements de changement de voie sachant qu'il s'agit d'une approximation mais qu'elle est parfaitement cohérente avec une grande partie de la littérature.

En ce qui concerne les comportements de suivi, l'outil que nous proposons d'utiliser pour analyser les données permet la distinction de trois niveaux dans les comportements. Les comportements stratégiques risquent de se montrer particulièrement impactés par le changement de réglementation appliquée à l'infrastructure (vitesses maximales autorisées différentes, distances de sécurité légales dépendant des spécificités réglementaires de chaque pays...). De manière analogue, les capacités des véhicules (leurs puissances) sont impactées par les réglementations locales qui rendent difficile la transposition des résultats éventuels d'un trafic nord américain à un trafic français. Le dernier aspect analysable par la méthode d'étude des phénomènes d'hystéresis concerne les comportements tactiques. Malgré les limites sus-citées, nous supposons que les caractéristiques distinctives des véhicules lourds par rapport aux véhicules légers sont similaires d'un pays à l'autre. Nous comptons parmi ces distinctions une meilleure visibilité depuis les véhicules lourds ainsi que des difficultés à modifier la vitesse du véhicule du fait de sa charge. Nous supposons que les besoins d'adaptation des conducteurs à ces véhicules sont similaires entre les différents trafics, et que donc l'analyse des comportements tactiques présents dans les données NGSIM peuvent être exploitables dans le cadre de nos travaux.

C'est dans cette optique que nous considérons que le jeu de données qui est à notre disposition pourra être utilisé de manière pertinente pour identifier les éléments clés distinguant les comportements des VL et des PL.

6.2.1.2 Réduction du bruit

Les données disponibles dans le cadre du projet NGSIM ont été obtenues à l'aide de traitements numériques sur des enregistrement vidéos. Il apparaît que les informations extraites renferment un certain nombre d'erreurs d'estimation et de biais principalement liées à ces traitements. Ce phénomène a déjà été souligné dans la littérature, et plus particulièrement par [Thiemann et al., 2008]. Nous avons donc choisi d'appliquer la méthode de lissage des trajectoires que ces auteurs proposent en amont de notre analyse afin de limiter la présence d'artefacts. L'algorithme proposé est un *symmetric exponential moving average filter* (sEMA). Il s'agit d'estimer \tilde{x}_α (la position longitudinale corrigée du véhicule α au cours du temps) à partir de sa position mesurée x_α en utilisant une moyenne à fenêtre glissante de taille D . Il s'agit d'une moyenne pondérée des positions, dont les coefficients de pondération observent une décroissance exponentielle fonction de leur distance au point central de la fenêtre. Dans le cas des données de NGSIM, il est possible de tirer parti du fait qu'il y a un point toute les 0.1 secondes. Il est donc possible d'écrire la position en fonction de son indice dans la série temporelle, donc t_k , plutôt qu'en fonction du temps. Chaque position estimée est donnée par :

$$\tilde{x}_\alpha(t_i) = \frac{1}{Z} \sum_{k=i-D}^{i+D} x_\alpha(t_k) e^{-\frac{|i-k|}{\Delta}} \quad (6.1)$$

avec

$$Z = \sum_{k=i-D}^{i+D} e^{-\frac{|i-k|}{\Delta}} \quad (6.2)$$

Le lissage est effectué sur une plage de T secondes. Δ (la taille de la fenêtre de lissage exprimée en nombre de points d'enregistrement) est définie par $\Delta = \frac{T}{dt}$. La taille de la fenêtre glissante, D , est donnée par $D = 3\Delta$.

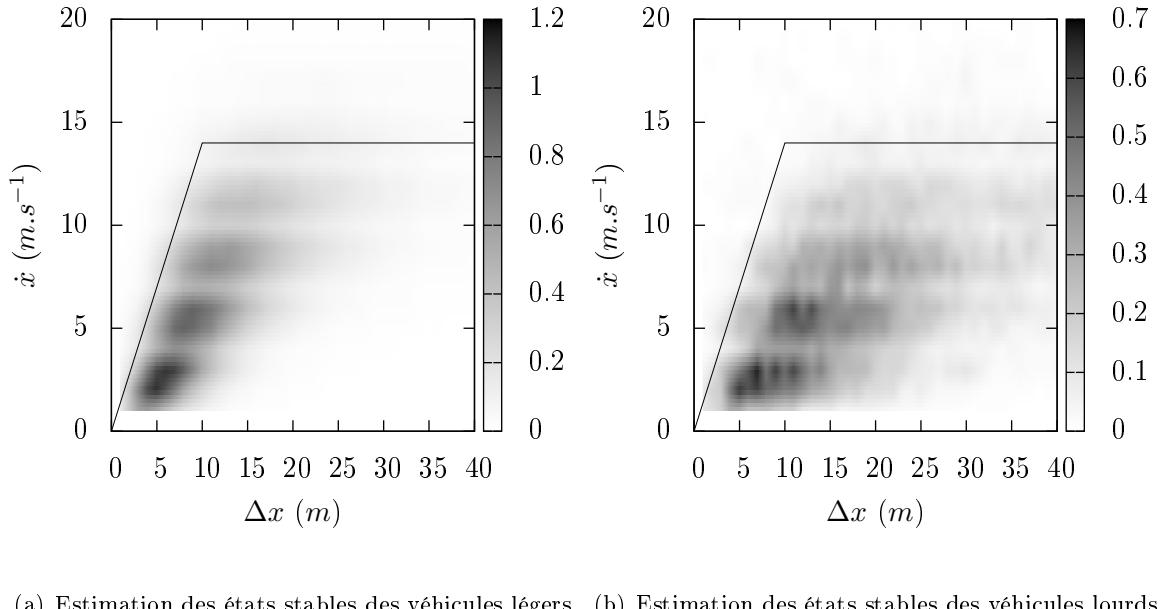
Les auteurs proposent d'utiliser un lissage sur $0.5s$ pour les positions longitudinales, $1s$ pour les vitesses et $4s$ pour les accélérations, valeurs que nous adopterons.

6.2.1.3 Analyse des comportements réels de décélération

Afin d'étudier les comportements observables dans le jeu de données NGSIM, et plus particulièrement les différences entre les comportements tactiques des conducteurs de poids lourds et ceux des comportements des véhicules légers, nous commençons par estimer les états stables des conducteurs.

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre précédent, il est particulièrement délicat de déterminer les états d'équilibre acceptables par un conducteur. Nous tentons d'estimer quels sont les états d'équilibre les plus probables pour une population donnée. Nous cherchons à estimer quels sont les états (i.e. points du plan créneau, vitesse) qui sont le plus fréquemment observés. Nous nous basons sur deux hypothèses. La première est que l'ensemble des membres d'une population homogène chercheront à atteindre des états d'équilibre similaires. L'ensemble des véhicules d'une même classe cherchent, pour une vitesse donnée, à atteindre un même créneau. Ainsi, à l'échelle du trafic, si chacun des véhicules le composant s'approche d'un point d'équilibre (situation à partir de laquelle il adopte une accélération nulle), la concentration converge. Par extension de la notion d'état d'équilibre d'un véhicule, nous qualifions également cet état du trafic d'état d'équilibre. La seconde hypothèse que nous faisons est que les états d'équilibre du trafic sont ceux vers lesquels le diagramme fondamental converge. Les états d'équilibres des véhicules étant des états préférés (car il minimisent la nécessité d'action de la part des conducteurs), il sont ceux vers lesquels les conducteurs tendent. A l'échelle macroscopique, les états apparaissant les plus fréquemment dans les données sont supposés être la manifestation de cette recherche de stabilité. Le corollaire de cette hypothèse est que les états les moins fréquemment adoptés par les conducteurs sont dus à des instabilités du trafic.

La figure 6.3 montre une estimation des états stables moyens de véhicules circulant aussi bien sur l'I-80 que sur l'US-101. Nous avons utilisé les deux jeux de données afin de construire les graphiques 6.3(a) et 6.3(b). L'enveloppe extérieure de la zone dans laquelle les différents véhicules sont observés est similaire en ce qui concerne les véhicules légers et les véhicules lourds. Cette enveloppe est schématisée par les tracés superposés



(a) Estimation des états stables des véhicules légers (b) Estimation des états stables des véhicules lourds

FIGURE 6.3 – Comparaison des estimations des états stables des véhicules légers et des véhicules lourds. Le plan représenté est découpé en cellules. La valeur associée à chaque cellule correspond à la fréquence à laquelle un véhicule a été observé dans la zone du plan correspondante. La construction est faite grâce à l’agrégat des situations observables dans les données de l’I-80 et de l’US-101. Les tracés approximant les valeurs extrêmes dans chacun des graphes sont identiques.

aux figures 6.3(a) et 6.3(b) afin de limiter l’impact que peut avoir le faible nombre de véhicules lourds observés (soit un total de 352 véhicules lourds au total contre 11327 véhicules légers, comme indiqué dans le tableau 6.1). Les états dans lesquels les différents véhicules parviennent à se maintenir (états de sécurité dans lesquels les conducteurs cherchent à rester) sont donc du même ordre entre les différentes classes de véhicules. Malgré cela, nous pouvons remarquer que dans les cas des véhicules lourds, la distribution est bien plus dispersée laissant entrevoir que soit les véhicules lourds sont nettement plus sensibles aux perturbations que les véhicules légers, soit ils adoptent des comportements plus hétérogènes. Nous pouvons également observer que les états les plus fréquemment observés se trouvent pour une vitesse donnée correspondent à un créneau légèrement plus important que pour les véhicules légers. Les véhicules lourds semblent donc adopter des temps inter-véhiculaires sensiblement plus importants.

Afin de comprendre «l’étalement» apparent des états des véhicules lourds, suggérant une plus grande sensibilité aux perturbations du trafic, nous avons étudié les courbes d’hystérésis apparaissant chez eux. Nous étudions ici les phénomènes d’hystérésis appa-

raissant lorsque les véhicules lourds entrent dans une zone où le trafic est ralenti. Dans une telle situation, les conducteurs doivent adapter leur vitesse à celle du trafic en amont, et la charge des véhicules lourds leur impose d'anticiper plus fortement cette manœuvre que les véhicules légers. La figure 6.3 laisse entrevoir qu'une stratégie possible pour contrer les difficultés dynamiques des véhicules est de maintenir une inter-distance importante.

La figure 6.4 montre le comportement (sous forme de tracés créneau / vitesse) de deux véhicules présents dans le jeu de données de l'US-101. Le premier véhicule (véhicule n° 2835) est un véhicule léger. Il est immédiatement suivi d'un second véhicule (véhicule n° 2851) qui est lui un véhicule lourd. Les boucles d'hystérésis sont tracées alors que les véhicules entrent dans un vague de sur-congestion. La figure 6.4(a) montre une boucle d'hystérésis « classique », c'est à dire tournant dans le sens anti horaire. La seconde boucle présentée dans la figure 6.4(b) a une forme nettement plus atypique. Nous pouvons observer que la décélération est effectuée en deux temps. Dans un premier temps, nous pouvons observer une réduction de la vitesse du véhicule lourd conjointement à un accroissement du créneau disponible devant lui. Il apparaît donc clairement que le véhicule lourd décélère plus tôt que son prédécesseur. Dans une seconde phase, le véhicule lourd continue sa décélération mais le créneau disponible face à lui réduit fortement. Cela montre que le prédécesseur est également en phase de décélération et que celle-ci est plus importante chez le véhicule meneur que chez le suivant.

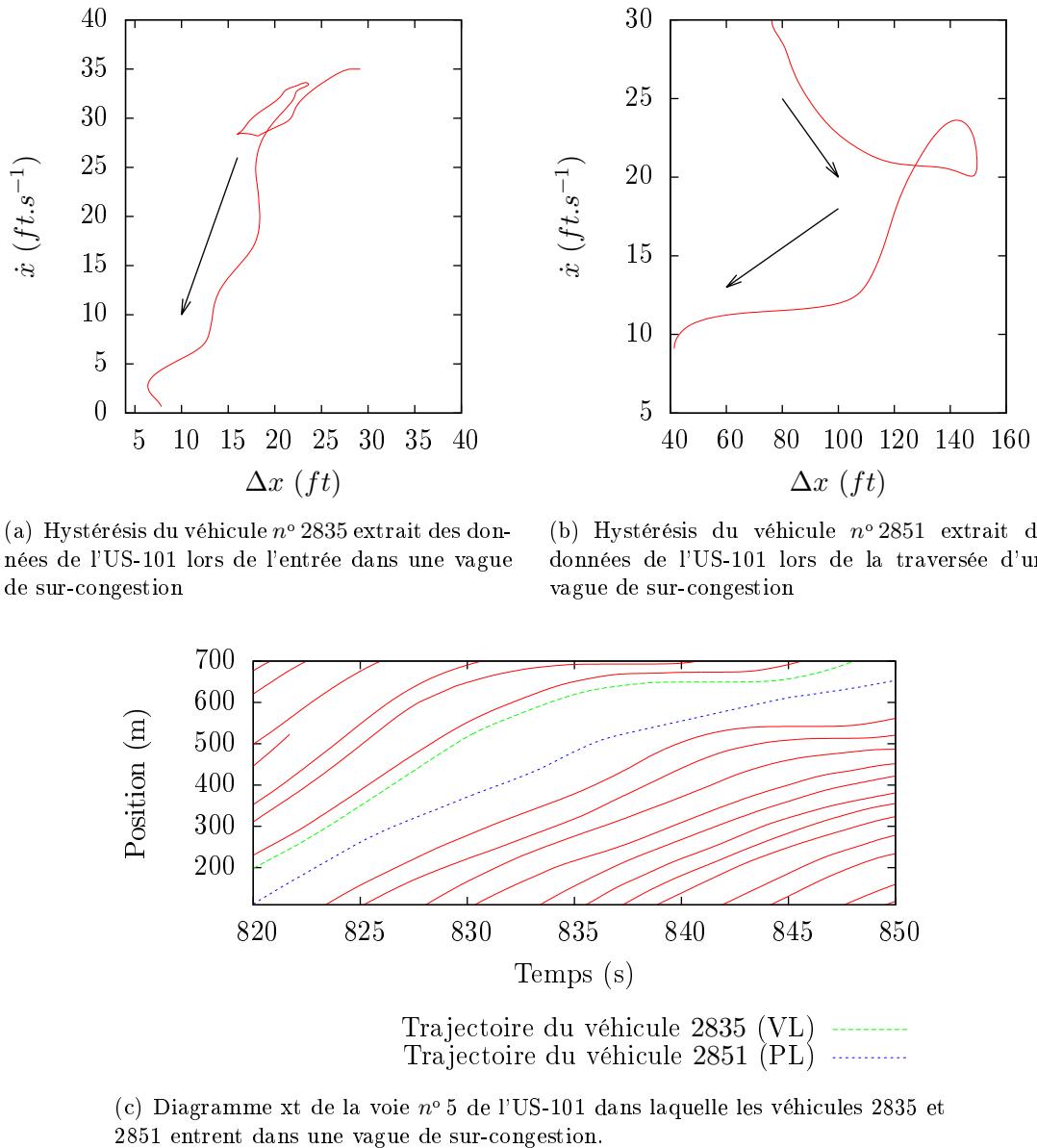
Afin de déterminer si le comportement que nous venons de présenter est représentatif des comportements des conducteurs de véhicules lourds, nous procédons à un décompte des différents types de décélération que nous avons pu observer dans les données du projet NGSIM. Les comportements de décélérations observés chez l'ensemble des véhicules lourds ont été classés selon les quatre catégories suivantes :

Anticipation forte L'anticipation forte correspond au phénomène que nous venons de présenter. Cette anticipation se caractérise par une décélération en deux phases, la première durant laquelle la vitesse diminue tandis que le créneau augmente, et la seconde dans laquelle aussi bien le créneau que la vitesse sont décroissants.

Anticipation faible L'anticipation faible correspond à une situation analogue à celle que nous avons observé dans le comportement des véhicules IDM. Cette situation est généralement caractérisée par une courbe d'hystérésis tournant dans le sens horaire, sans pour autant présenter les deux phases caractéristiques de l'anticipation forte.

Retard Le comportement de retard est analogue à celui exhibé par le modèle optimal velocity. Il se caractérise par une courbe d'hystérésis tournant dans le sens anti horaire.

Autre Cette catégorie regroupe l'ensemble des comportements en décélération que nous n'avons pu classer dans l'une des trois catégories précédentes. La première raison d'indécision que nous avons rencontré est pour les comportements d'anticipation faible et le retard. La connaissance très approximative que nous avons des états d'équilibres ne permet pas de déterminer si la courbe d'hystérésis est sur ou sous ceux-ci. Le second cas d'indécision provient des situations perturbées par des



changements de voie. Le changement de voie peut être le fait du véhicule étudié ou bien d'un véhicule le précédent.

TABLE 6.2 – Répartition des différentes catégories de décélération observées chez les véhicules lourds de l'I-80 et de l'US-101.

Jeu de données	Anticipation forte	Anticipation faible	Retard	Autre
I-80	36%	23%	24%	17%
US-101	44%	20%	20%	16%

Le tableau 6.2 résume le comptage des différents types de décélération observés dans les données du projet NGSIM. Il apparaît que le comportement d'anticipation forte que nous avons présenté, bien que non systématique, représente une part considérable des comportements observables.

6.2.2 La gestion des décélérations dans le modèle ARCHIPL

Étant donné les comportements précédemment observés, nous cherchons maintenant à créer un modèle en mesure de les reproduire. Pour ce faire, nous avons choisis de nous baser sur le modèle ARCHISIM que nous avons déjà présenté dans les parties 3.3.1.1 puis 5.3.1.3. La mise en oeuvre du modèle que nous proposons ainsi que les différentes expérimentations à son propos sont réalisés sur la plate-forme présentée dans la partie 4.2.

Afin de déterminer si le modèle ARCHISIM est en mesure de reproduire les comportements que nous venons de décrire nous avons utilisé un scénario expérimental basé sur ceux présentés dans le chapitre 5. Le scénario utilisé met en jeu un véhicule meneur programmé appliquant une contrainte variant au fil du temps à un peloton composé de véhicule légers et d'un véhicule lourd en son milieu. Nous avons pu observer que le modèle ARCHISIM ne permet pas de reproduire le comportement désiré. Le comportement obtenu, présenté dans la figure 6.5(a), ne montre aucune hystérésis dans la décélération. Ce comportement de décélération est similaire à celui d'un véhicule ARCHISIM déjà illustré dans la figure 5.9. Nous présentons dans cette section l'ensemble de modifications que nous avons apporté au modèle initial dans le cadre de la modélisation des décélérations des véhicules lourds afin de pouvoir reproduire une boucle d'hystérésis aux propriétés similaires à celles de la principale classe de comportement que nous avons mis en avant dans la partie 6.2.1.3.

6.2.2.1 Modèle proposé

Comme cela a été présenté dans le chapitre précédent, le modèle ARCHISIM cherche à chaque instant à s'adapter à la contrainte la plus importante qu'il perçoit. Or, comme nous venons de le voir, les véhicules lourds doivent être en mesure d'estimer à l'avance la contrainte qu'un prédécesseur leur posera, pour pouvoir entamer en avance des actions

préventives. Il s'agit donc ici de pouvoir anticiper à court terme les évolutions des contraintes perçues pour s'adapter à ce qu'elles seront. L'objectif est donc de proposer un modèle de comportement tactique qui soit en mesure de répondre à cette contrainte.

Pour ce faire, nous avons donc modifié le processus d'analyse que le modèle applique à chacune des sources de contraintes perçues. A chaque instant, et pour chaque véhicule contraignant perçu (i.e. un véhicule se situant sur sa trajectoire et adoptant une vitesse inférieure à la sienne), le modèle cherche à estimer quel sera le comportement qu'il adoptera une fois qu'il se sera adapté à cette contrainte. Ce comportement est caractérisé dans le plan créneau/vitesse par la distance séparant les deux véhicules et la vitesse du véhicule suiveur. Nous appelons \mathcal{G} la distance séparant les deux véhicules une fois que le véhicule contraint a atteint la vitesse du véhicule contraignant. Cette distance est dépendante à la fois de la distance que le véhicule souhaite maintenir entre lui et son prédecesseur direct (qui peut ne pas être la cible considérée), ainsi que de la présence d'un ensemble de véhicules (nommé \mathcal{B}) se trouvant entre lui et la contrainte étudiée. Si nous appelons a le véhicule dont le comportement est modélisé, c le véhicule contraignant considéré, et supposons qu'à l'instant τ le véhicule suivant atteint une situation de suivi stable, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} x_c(\tau) - x_a(\tau) = \mathcal{G}_\tau \\ \dot{x}_c(\tau) = \dot{x}_a(\tau) \end{cases} \quad (6.3)$$

Cette équation exprime qu'à l'instant τ le véhicule contraint est à une distance \mathcal{G}_τ derrière le véhicule contraignant, et que leurs vitesses respectives sont identiques. La distance est donnée par l'équation suivante :

$$\mathcal{G}_\tau = \frac{l(a)}{2} + \Delta x_{\text{secu}}(a)_\tau + \sum_{i \in \mathcal{B}} [l(i) + \Delta x_{\text{secu}}(i')_\tau] + \frac{l(c)}{2} \quad (6.4)$$

où $l(k)$ est la longueur du véhicule k et $\Delta x_{\text{secu}}(k)_\tau$ est la distance de sécurité que le véhicule k souhaite maintenir entre lui et son prédecesseur au temps τ . Cette distance est donnée de manière analogue à ce qui est proposé dans le modèle ARCHISIM. La distance de sécurité acceptée par un véhicule est donc donnée par $TIV_k * \dot{x}_k(\tau)$ où TIV_k est le temps inter-véhiculaire souhaité par le véhicule k , et dépend à la fois de paramètres propres à l'agent k et du type de contrainte auquel l'agent s'adapte (courte ou longue). Par ailleurs, i' correspond au stéréotype que le véhicule modélisé a de i , et donc $\Delta x_{\text{secu}}(i')_\tau$ est la distance de sécurité à laquelle le véhicule modélisé estime que le véhicule i se tiendra au temps τ . Enfin, dans la plate-forme ARCHISIM, les positions des véhicules (fonction x) expriment la position du centre du véhicule. Il faut donc prendre en compte les demi-longueurs des véhicules (terme $\frac{l(a)}{2} + \frac{l(c)}{2}$) pour estimer la distance entre eux.

Si nous appelons $t = 0$ l'instant auquel le véhicule modélisé détermine l'accélération qu'il doit adopter pour qu'au temps τ il soit dans la situation exprimée par l'équation 6.3, il doit adopter une accélération constante donnée par :

$$\gamma = \frac{[\dot{x}_c(0) - \dot{x}_a(0)]^2}{2[-x_c(0) + x_a(0) + \mathcal{G}_\tau]} \quad (6.5)$$

L'équation 6.5 donne donc l'accélération d'un véhicule ARCHIPL. L'accélération finale souhaitée par le véhicule à un instant donné est l'accélération la plus faible engendrée par l'ensemble des contraintes potentielles identifiées par le processus de perception hérité d'ARCHISIM (ensemble nommé \mathcal{P}), d'où :

$$\ddot{x} = \min (\{\gamma_k, k \in \mathcal{P}\}) \quad (6.6)$$

L'accélération désirée, donnée par l'équation 6.6 est ensuite traitée de la même manière que dans le modèle ARCHISIM.

6.2.2.2 Vérification

Comme cela a été évoqué précédemment, notre démarche de modélisation s'inscrit dans une approche inspirée de celle du développement dirigé par les tests. Nous avons donc utilisé un scénario de référence dans lequel un véhicule lourd immergé dans un peloton de véhicules légers doit effectuer une décélération reproduisant les propriétés d'anticipation forte.

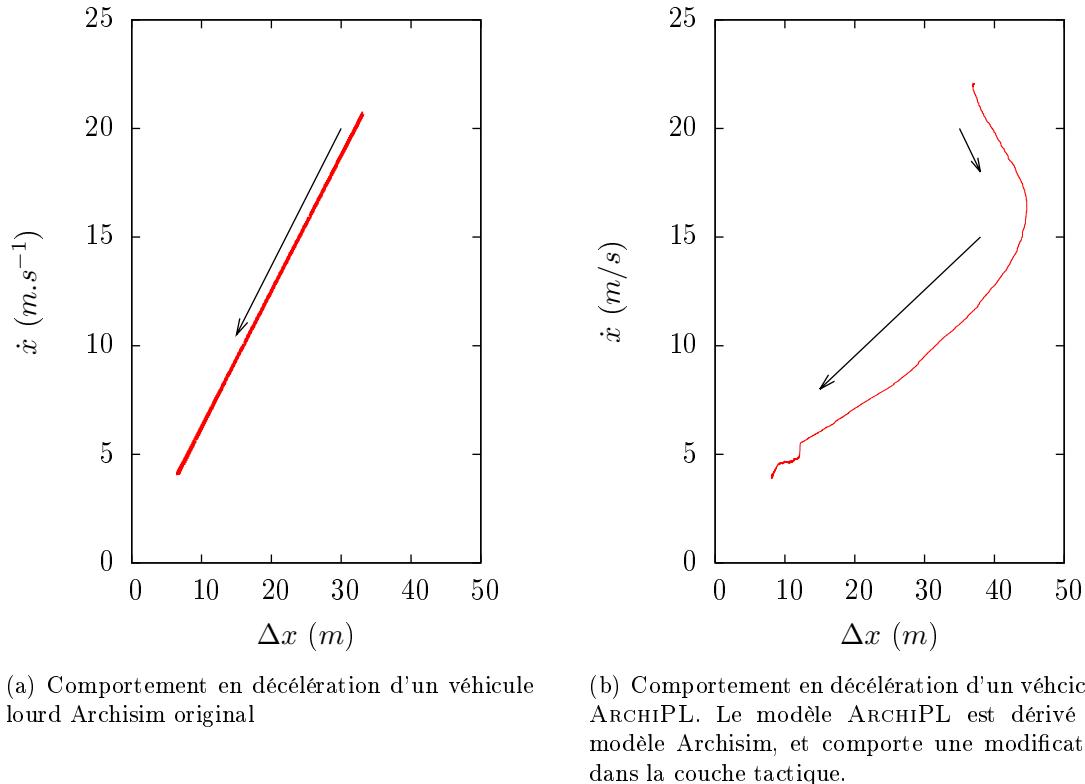


FIGURE 6.5 – Comparaison du comportement de décélération proposé par le modèle original à celui proposé par le modèle ARCHIPL

La figure 6.5 montre le comportement de décélération d'un véhicule lourd ARCHISIM tel que modélisé avant nos modifications ainsi que le comportement d'un véhicule ARCHIPL dans la même situation routière. Comme cela a été évoqué en début de section, la figure 6.5(a) montre que le comportement original d'un véhicule lourd est similaire à celui d'un véhicule léger que nous avons déjà observé dans le chapitre précédent. A l'opposé, la figure 6.5(b) montre une décélération en deux phases. Cela reproduit les propriétés que nous cherchions à obtenir, comme défini à l'aide des données réelles (figure 6.4(b)).

De ce point de vue, nous pouvons dire que le modèle ARCHIPL vérifie la propriété attendue dans cette première itération de développement. Il convient donc maintenant de décider si le développement est suffisant ou s'il est nécessaire d'identifier de nouvelles faiblesses bloquantes dans le modèle résultant.

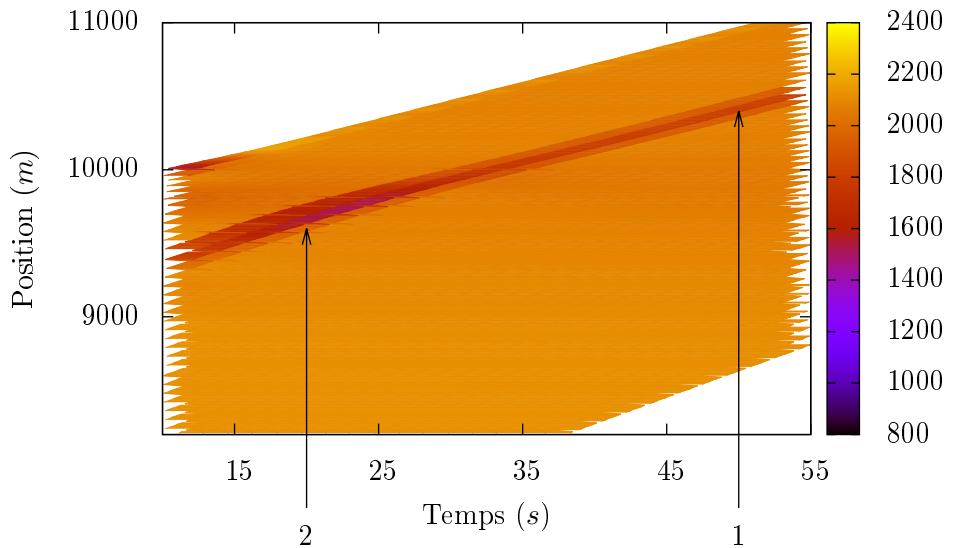


FIGURE 6.6 – Débit «instantané» en fonction du temps et de la position sur une infrastructure suite à l'insertion à basse vitesse d'un véhicule devant un peloton contenant un véhicule ARCHIPL. A proximité du véhicule lourd, le débit en situation stable est de 1800 vh/h (point 1). Suite à l'insertion à basse vitesse (visible au point 2), le débit autour du véhicule lourd tombe à environ 800 vh/h.

Afin de mieux comprendre l'influence que peut avoir le changement du comportement que nous avons introduit dans le modèle, nous avons réalisé une simulation dans laquelle un véhicule s'insère à basse vitesse devant un peloton comprenant un véhicule lourd ARCHIPL. Ce scénario est inspiré des travaux de [Duret, 2010] que nous évoquerons plus spécifiquement dans la partie 6.3. La figure 6.6 montre une estimation du débit valable en différents points du circuit au fil de la simulation. Le débit est estimé pour chaque

mètre et est calculé à partir du temps séparant le temps de passage de deux véhicules successifs. Nous pouvons observer que du fait de l'anticipation du véhicule lourd, le débit chute drastiquement à proximité du véhicule lourd. Ainsi, suite à une perturbation, nous pouvons observer que le comportement anticipatif que nous avons décrit peut renforcer l'instabilité présente dans le trafic.

Les premiers résultats obtenus sont encourageants mais ne couvrent qu'une partie du comportement longitudinal. Nous choisissons donc d'entamer une seconde itération du développement de notre modèle ARCHIPL afin de s'intéresser particulièrement aux aspects d'accélérations liés aux véhicules lourds.

6.3 L'accélération des véhicules lourds

Le second aspect que nous souhaitons vérifier dans le comportement des véhicules lourds est leur capacité d'accélération. Comme nous l'avons précédemment évoqué, la reproduction des capacités d'accélération des véhicules est un enjeu crucial des modèles microscopiques. Les travaux de [Duret, 2010] mettent en avant que, dans un trafic proche de la saturation, le temps qu'un véhicule met à rejoindre sa vitesse désirée suite à l'apparition d'une perturbation (par exemple suite à l'insertion à vitesse faible d'un véhicule sur l'infrastructure) influence fortement la formation de congestions. Nous pouvons ainsi inférer que l'adaptation d'un véhicule lourd à une perturbation devra prendre plus de temps qu'il n'en faudrait à des véhicules légers, et que par conséquence les véhicules lourds seront plus susceptibles de dégrader les conditions de trafic à l'apparition de perturbation.

Nous pouvons en déduire qu'un modèle de comportement de véhicules lourds doit être en mesure d'exhiber des capacités d'accélération réalistes afin de pouvoir reproduire leur influence sur l'écoulement d'un trafic simulé.

6.3.1 Les capacités d'accélération des PL ARCHISIM

Le modèle de simulation ARCHISIM dispose de bases permettant la simulation du comportement de véhicules lourds. Bien que nous venions de modifier la couche tactique de ce modèle pour aboutir à une première version du modèle ARCHIPL, le processus d'accélération n'a pas été modifié. Il est à ce stade du développement identique entre les deux modèles. Pour simplifier le discours, nous appellerons dans cette section ARCHISIM la version initiale du modèle d'accélération bien que celle-ci soit observée dans le comportement de la première itération du modèle ARCHIPL. La dénomination ARCHIPL désigne dans cette partie l'ensemble des modifications apportées à ARCHISIM.

Afin de déterminer si le modèle ARCHISIM permet de reproduire les capacités d'accélération des véhicules lourds de façon convenable, nous proposons d'étudier la phase d'accélération d'un véhicule quittant l'arrêt et rejoignant sa vitesse désirée ($90\text{km}/\text{h}$ pour l'expérience courante).

La figure 6.7 montre le profil de vitesse de différents véhicules durant leur phase d'accélération leur permettant de passer de $0\text{km}/\text{h}$ à $90\text{km}/\text{h}$ sur une route plate. Ce change-

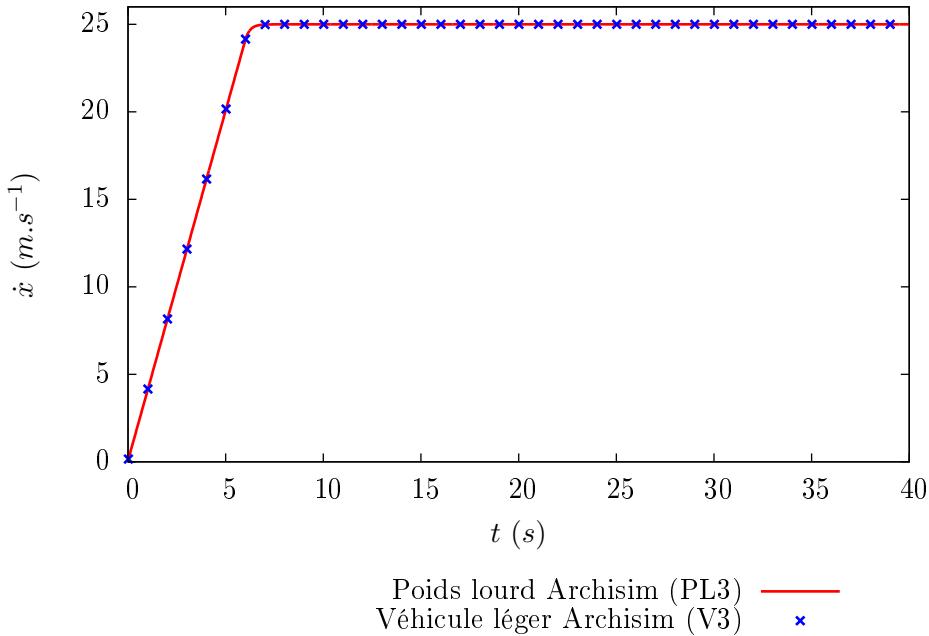


FIGURE 6.7 – Accélération d’un véhicule ARCHISIM avec le jeu de paramètres correspondant à un véhicule lourd

ment de vitesse est réalisé en approximativement 7s, quelque soit le type de véhicule mis en œuvre : le profil de vitesse d’un couple tracteur/semi-remorque correspond parfaitement à celui d’un véhicule léger modélisé dans Archisim. La plate-forme ARCHISIM applique un jeu de paramètres distincts pour chacun de ces véhicules, dont certains sont reportés dans le tableau 6.3. Ces paramètres, dont notamment la capacité maximale d’accélération, devraient avoir une influence directe sur ce profil de vitesse. Or, comme nous pouvons l’observer, l’utilisation de l’un ou l’autre des profils de véhicules n’influence en rien l’accélération simulée. Une telle performance (largement exagérée pour un véhicule lourd compte tenu de ses capacités d’accélération) est révélatrice, si ce n’est d’un défaut de conception, d’une mise en œuvre erronée du modèle conceptuel qui a initialement été élaboré.

6.3.2 Modifications pour le modèle ARCHIPL

Afin d’obtenir des profils d’accélération réalistes pour les véhicules ARCHIPL, nous proposons d’intégrer le modèle proposé par [Rakha et al., 2001] au modèle ARCHISIM. Ce modèle dynamique a été développé pour déterminer la vitesse maximale que peuvent atteindre des véhicules lourds sur des plans inclinés. La mise en œuvre du modèle initial ARCHISIM montrait une implémentation partielle d’un modèle très similaire. Cependant, comme le montrent nos expérimentations, il n’était pas correctement mis en œuvre. Nous avons donc adapté le modèle issu de la littérature et complété la base présente dans la

TABLE 6.3 – Extrait des paramètres applicables aux différents types de véhicules dans la plate-forme de simulation ARCHISIM

	Véhicule lourd (PL3)	Véhicule léger (V3)
Longueur	16.90m	4.3m
Largeur	2.35m	1.60m
Masse totale	40000kg	1610kg
Accélération maximale	$3m.s^{-1}$	$5m.s^{-1}$
Décélération maximale	$6m.s^{-1}$	$6.26m.s^{-1}$
...

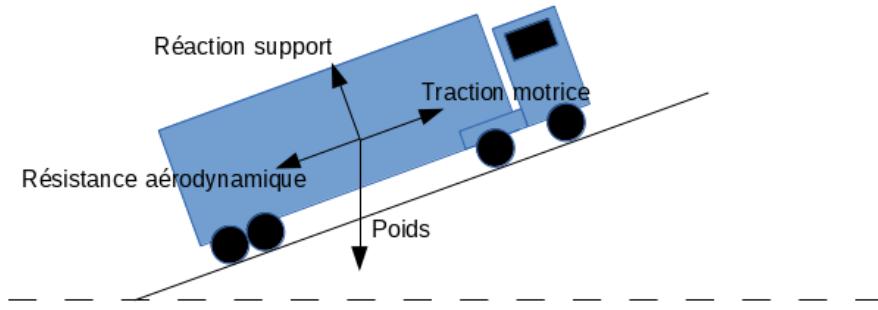


FIGURE 6.8 – Bilan des forces appliquées à un véhicule sur la route.

plate-forme ARCHISIM.

Le modèle dynamique de [Rakha et al., 2001] est utilisé afin de déterminer quelle est l'accélération maximale qu'un véhicule peut adopter. Cette accélération maximale est fonction de plusieurs facteurs propres au véhicule (sa vitesse courante, sa puissance...) ainsi que de différentes caractéristiques de son environnement telles que l'inclinaison de la route, la vitesse du vent... Le modèle mis en œuvre, à l'image de notre modèle de référence, simplifie la dynamique des véhicules en différents points de façon à obtenir un compromis entre fidélité du modèle et capacité de paramétrisation. Tout d'abord, les rapports de vitesses ne sont pas modélisés, et il est considéré qu'à tout instant toute la puissance du moteur est exploitable en tant que force tractrice.

Afin de modéliser l'effet de la puissance tractrice moteur, un bilan sommaire des forces s'appliquant au véhicule est fait. Les lois de la dynamique permettent ensuite de calculer l'accélération maximale possible pour le véhicule. Comme l'illustre la figure 6.8, les forces considérées dans ce modèle sont les suivantes :

- La force motrice (dont l'intensité est liée à la puissance du moteur).
- Les forces aérodynamiques freinant l'avancement du véhicule, dues au vent relatif.
- La force de gravité ralentissant le franchissement de pentes, essentiellement du fait de la masse du véhicule.
- La force de réaction du support.

Ce bilan des forces est utilisé dans le cas des lois fondamentales de la dynamique nous permettant d'écrire la réaction suivante :

$$\gamma_a(t) * m_a = \vec{F}_{mot} + \vec{F}_{aro} + \vec{F}_{poids} + \vec{F}_{reac} \quad (6.7)$$

Le poids, force verticale, peut se décomposer en deux composantes tel que $\vec{F}_{poids} = \vec{P}_{perp} + \vec{P}_{para}$. L'une d'elle, \vec{P}_{perp} est perpendiculaire au support, son intensité est donnée par $m_a * g * \cos(\alpha)$ où α est l'inclinaison du support et g l'accélération de la pesanteur valant approximativement $9,81m/s^{-2}$. Cette force est l'opposée de la force de réaction du support donc $\vec{P}_{perp} + \vec{F}_{reac} = \vec{0}$. \vec{P}_{para} est la composante du poids parallèle au support de valeur donnée par $m_a * g * \sin(\alpha)$. Si $\alpha > 0$, alors cette force s'oppose au mouvement du véhicule, si $\alpha < 0$ elle le favorise. Enfin, dans le cas où $\alpha = 0$, $\vec{F}_{poids} = \vec{P}_{perp} = -\vec{F}_{reac}$, le poids et la réaction au support s'annulent mutuellement.

La force de traction \vec{F}_{mot} est générée par le moteur du véhicule. Pour calculer l'accélération maximale que le véhicule peut produire, nous supposons que le moteur est exploité au maximum de sa puissance. Nous négligeons l'effet des rapports de vitesse courant et du régime moteur, et supposons qu'à tout instant le véhicule peut délivrer l'intégralité de sa puissance. Cette puissance est une caractéristique intrinsèque du véhicule. Il s'agit d'un paramètre du modèle. Nous pouvons donc écrire que $\forall t, P_a(t) = P_a^{max}$, noté pour plus de lisibilité P_a .

L'intensité de la force motrice délivrée par le véhicule est donnée par

$$F_{mot} = \left\| \vec{F}_{mot} \right\| = P_a / (\dot{x}_m(t)) \quad (6.8)$$

la force motrice et la vitesse du véhicule étant dirigées selon le même axe. Notons le cas particulier où le véhicule quitte l'arrêt. Dans ce cas, $\dot{x}_a = 0$, et l'équation 6.8 ne peut être calculée. De même, à de très faibles vitesses, la force de traction tend vers l'infini. Pour répondre à ce problème, le modèle de [Rakha et al., 2001] estime la force tractrice maximale. Il considère que la force tractrice effective est la plus faible de la force tractrice maximale et de la force motrice exprimée dans l'équation 6.8 :

$$F_{mot}^{\text{effective}} = \min(F_{mot}, F_{mot}^{max}) \quad (6.9)$$

La force de traction maximale est donnée par :

$$F_{mot}^{max} = \mu * F_{essieu_tracteur}^z = g * M_{essieu_tracteur} * \mu \quad (6.10)$$

où μ est le coefficient de friction entre le pneu et la chaussée, $F_{essieu_tracteur}^z$ la force verticale appliquée sur l'essieu tracteur et $M_{essieu_tracteur}$ la masse sur l'essieu tracteur. Or, dans le cas de notre plate-forme de simulation, ni l'état du pneumatique ni le type de chaussée ne sont modélisés. Nous faisons donc l'hypothèse d'un contact parfait et utilisons une valeur de 1 pour le paramètre μ . Nous faisons également l'hypothèse que la masse du véhicule est également répartie entre les différents essieux, et donc que $M_{essieu_tracteur} = \frac{m_a}{n_e}$ où n_e est le nombre d'essieux du véhicule. Or, aussi bien le paramètre m_a que n_e sont connus à priori pour la simulation, et il est donc possible d'assimiler cette traction maximale au paramètre d'accélération maximale d'un véhicule,

tout en s'assurant que celui-ci soit le rapport de la masse sur le nombre d'essieux. Nous utilisons donc le paramètre préexistant \ddot{x}_{max}^a pour dénoter cette accélération maximale.

Enfin, la dernière force prise en compte dans notre analyse est la force de résistance aérodynamique \vec{F}_{aero} . Cette force s'exerce à l'opposé du mouvement du mobile, donc uniquement sur l'axe longitudinal. L'intensité de la force est donnée par $\|\vec{F}_{aero}\| = q * \mathcal{S} * c_x$ avec \mathcal{S} la surface de référence du véhicule (surface exposée au vent), c_x le coefficient de traînée du véhicule — dépendant de la forme de celui-ci — et $q = \frac{1}{2} \rho \dot{x}_a^2$. ρ est la masse volumique de l'air (valeur approximative de 1.202 kg/m^3) et \dot{x}_a la vitesse longitudinale du véhicule (celle à laquelle s'oppose la force aérodynamique). Notons que parmi les bases déjà mises en place dans la plate-forme ARCHISIM, le paramètre de coefficient de traînée des différents véhicules est déjà renseigné ce qui nous permet de l'exploiter pour notre mise en œuvre.

L'accélération maximale possible pour un véhicule a à un instant donné t est donc donnée, en se basant sur l'équation 6.7 par :

$$\gamma_a^{max}(t) = \frac{1}{m_a} \left[\frac{P_a}{\dot{x}_a} - k * \dot{x}_a^2 - m * g * \sin(\alpha) \right] \quad (6.11)$$

6.3.3 Évaluation des capacités d'accélération du modèle ARCHIPL

Nous cherchons maintenant à évaluer la pertinence des améliorations que nous avons apporté au modèle ARCHISIM dans le cadre du développement du modèle ARCHIPL. Pour ce faire, nous réutilisons le scénario simple que nous avons présenté au début de la partie 6.3.1. Nous confrontons le résultat donné par le modèle mis en œuvre avec le profil d'accélération tel que mesuré sur un véhicule de type semi-remorque. Le véhicule utilisé pour cette expérience est un ensemble tracté par un IVECO Stralis d'une puissance de 440 chevaux. L'ensemble tracté a une masse de 39T. La donnée de vitesse du véhicule est extraite de son bus «CAN»⁵ à l'aide d'outils de diagnostic spécialisés. La donnée est donc mesurée par le véhicule lui-même.

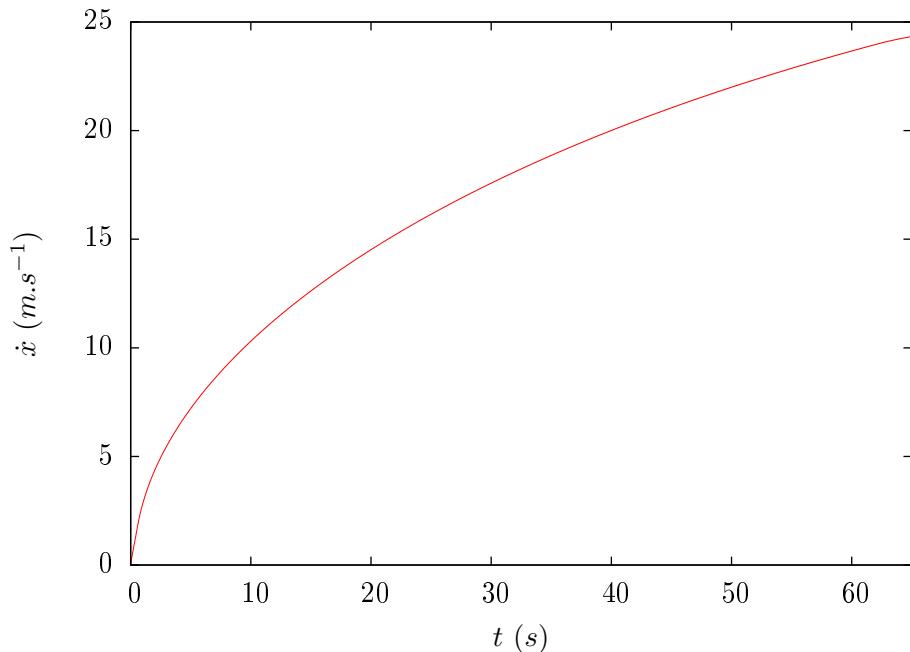
La figure 6.9(a) montre que le véhicule parvient à atteindre sa vitesse maximale (88 km.h^{-1} , ce qui correspond à la vitesse à laquelle le véhicule est bridé) en environ 60 secondes. Le véhicule simulé, un véhicule de type «PL3» correspondant à un ensemble semi-remorque / tracteur dans la plate-forme ARCHISIM, parvient à atteindre la même vitesse en environ 65 secondes. Bien que les résultats expérimentaux et simulés montrent des différences durant les premières phases de l'accélération (les 15 premières secondes), l'amélioration est importante par rapport aux résultats présentés dans la figure 6.7, dans laquelle le PL atteint cette vitesse en 7 secondes environ.

Ces résultats permettent d'achever l'itération courante de développement du modèle ARCHIPL. Les deux itérations que nous avons déroulés dans ce chapitre nous ont permis d'apporter différentes améliorations au modèle ARCHISIM. Ces améliorations se sont focalisés sur le comportement longitudinal des véhicules lourds. La prochaine étape

5. CAN : Controller Area Network



(a) Vitesse mesurée en fonction du temps du véhicule test



(b) Vitesse du véhicule semi-remorque simulé avec le modèle ARCHIPL

FIGURE 6.9 – Comparaison entre le profil d'accélération d'un véhicule ArchiPL et le profil d'accélération mesuré d'un véhicule réel. Le véhicule réel utilisé est un ensemble semi-remorque / tracteur IVECO Stralis, d'une puissance de 440 chevaux. L'ensemble roulant pèse 39 tonnes.

abordée dans le développement du modèle est une remise en forme de la mise en œuvre du modèle afin d'assurer sa cohérence et sa maintenabilité.

6.4 L'architecture finale du modèle ARCHIPL

Nous présentons dans cette partie une version synthétique de l'architecture mise en œuvre au sein de la plate-forme de simulation ARCHISIM. Cette partie reprend le travail de remise en forme que nous avons entrepris sur la base de codes préexistants et sur les ajouts que nous y avons apporté.

Ce travail a été l'occasion de réorganiser l'implantation du modèle ArchiPL de manière à clairement distinguer les différentes couches de comportement que nous avons mis en œuvre, par analogie à l'architecture générique présentée par [Michon, 1985].

6.4.1 Architecture générale du modèle ARCHIPL

Le modèle ARCHIPL est un modèle du couple conducteur / véhicule. Il est donc utilisé aussi bien pour reproduire les prises de décision et les comportements des conducteurs que la dynamique du véhicule conduit.

La prise de décision dans le modèle ARCHISIM — et donc par conséquent dans le modèle ARCHIPL — se fait selon les étapes suivantes :

Analyse de la vision Cette phase consiste à analyser les éléments perçus et à les annoter afin de faciliter les phases suivantes. Par exemple, cette phase permet d'identifier si un véhicule est susceptible de se trouver sur la même route que le véhicule simulé ou s'il peut être amené à croiser sa route.

Prise de décision Cette phase détermine le comportement à adopter durant le pas de temps courant. Cette phase détermine le déplacement du véhicule ainsi que ses changements d'états observables.

Le travail que nous avons mené ne porte que sur l'aspect de prise de décision. La phase d'analyse de la vision reste inchangée par rapport au modèle initial.

La figure 6.10 fait apparaître les trois couches de comportement utilisés ainsi que leurs interactions. Nous distinguons la couche stratégique, la couche tactique ainsi que la couche opérationnelle. La couche stratégique fournit à partir de la perception du véhicule qui a été analysée une description de l'ensemble des états stables acceptables dans la situation actuelle. Cela reflète la vitesse à laquelle souhaite circuler le véhicule ainsi que la distance de sécurité qu'il souhaite conserver s'il ne peut atteindre sa vitesse désirée. La couche tactique définit une stratégie permettant de rejoindre un état stable. Elle détermine une accélération optimale dont l'effet est de cibler dans un futur proche un état stable. Cette couche peut, selon la situation, accepter de cibler des états non stables et «dangereux» si la contrainte subie est temporaire. Enfin, la couche opérationnelle produit, en fonction de cette accélération souhaitée, un déplacement du véhicule effectif tout en tenant compte des capacités dynamiques de ce dernier.

Le travail de réorganisation de l'implantation du modèle Archisim a consisté en l'explication de ces différentes couches du comportement ainsi que des interactions que

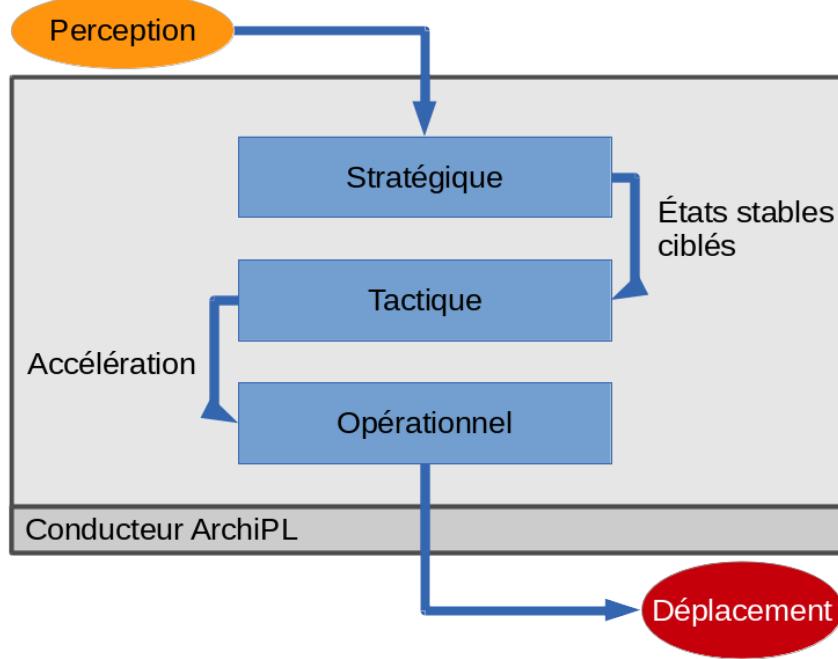


FIGURE 6.10 – Architecture générale de la gestion du suivi dans le modèle ARCHIPL

celles-ci peuvent avoir. Cette organisation permet une mise en œuvre de notre modèle tenant compte de son organisation logique. Cela fait entre autre apparaître clairement l'existence des différentes couches de décision ainsi que les liens existant entre celles-ci. Il apparaît ainsi clairement que la couche stratégique est la première à être évaluée. La couche tactique intervient dans un second temps pour la spécialiser et trouver le meilleur moyen de mettre en œuvre la décision stratégique. Enfin, la couche opérationnelle se charge de traduire la décision tactique en un déplacement effectif du véhicule.

Cette réorganisation du code que nous proposons permet également de formaliser les échanges d'informations opérant entre les différentes couches. Il apparaît ainsi clairement que le résultat de l'évaluation de la couche stratégique (en ce qui concerne la décision longitudinale) correspond à une stratégie de conduite de haut niveau très similaire à la formalisation du modèle de NEWELL. Nous retrouvons ainsi la vitesse libre du véhicule ainsi que la distance de suivi en situation contrainte. La couche tactique est ainsi en mesure, à partir de cette stratégie générale de déterminer l'accélération la plus adaptée à une situation particulière. Enfin cette accélération est traduite en un déplacement effectif du véhicule par la couche opérationnelle qui est dépendante des caractéristiques physiques du véhicule conduit.

6.4.2 Couche stratégique

La couche stratégique est la partie du modèle en charge de déterminer le comportement à adopter sur des périodes longues. Elle prend donc en compte un grand nombre d'éléments du comportement, dont notamment les questions de suivi d'itinéraire, une part importante de la sélection de voie de circulation ainsi que la sélection de la vitesse de croisière adoptée par le véhicule. Dans le cadre des mouvements longitudinaux, elle s'intéresse donc à la gestion de deux régimes durables distincts :

Le régime libre caractérisant un véhicule n'étant constraint par aucun prédécesseur.

Dans cette situation, le véhicule peut sans encombre circuler sur l'infrastructure à sa vitesse désirée.

Le régime constraint stable caractérisant un véhicule en situation de suivi. Dans cette situation, le véhicule ne peut pas atteindre sa vitesse désirée du fait de la présence de son prédécesseur sur la chaussée et doit s'adapter aux conditions de trafic.

Lorsque le véhicule est en situation non contrainte (absence de prédécesseur ou prédécesseur trop loin pour nécessiter une adaptation), le véhicule adopte sa vitesse désirée, notée v_d . Cette valeur de vitesse désirée est généralement influencée par les caractéristiques de l'infrastructure ainsi que la réglementation qui lui est appliquée (la vitesse maximale autorisée sur autoroute par beau temps est 130km/h, par temps de pluie est 110, sur route nationale la vitesse est de 90km/h, 80 par temps de pluie ...). Dans le cadre de cette présentation, nous nous concentrerons sur le comportement de véhicules en des zones précises du circuit. Nous pouvons donc faire l'approximation que la vitesse désirée v_d d'un agent conducteur est un paramètre du modèle. Dans le cas d'infrastructures hétérogènes — pouvant contenir simultanément des portions autoroutières, de route de campagne ou urbaines — un agent adapte sa vitesse désirée en fonction de la réglementation applicable à l'infrastructure sur laquelle il évolue.

Lorsque le véhicule est en situation d'interaction, c'est à dire que le conducteur est constraint par un véhicule le précédent, il cherche à atteindre une situation de suivi stable maximisant pour lui deux critères simultanément : (1) sa sécurité et (2) sa vitesse. Pour ce faire, il tend à adopter la même vitesse que son prédécesseur (vitesse maximale qu'il puisse adopter) tout en minimisant l'espace entre lui et le véhicule le précédent. La plus petite distance acceptable correspond à la marge de sécurité voulue par l'agent, elle est donnée par un TIV. Le TIV ciblé par un agent est donné par la formule suivante :

$$\text{TIV} = \alpha * 0.7 + (1 - \alpha) * 2.5 \quad (6.12)$$

Dans cette formule, α est un paramètre du modèle prenant une valeur réelle comprise entre 0 et 1. 0.7s est donc le plus petit temps inter-véhiculaire que peut cibler un agent, et 2.5s le plus grand temps inter-véhiculaire possible.

Ainsi, un véhicule constraint par un prédécesseur circulant sur l'infrastructure à une vitesse \dot{x}_p cherche à obtenir un gap face à lui donné par :

$$\Delta x = \dot{x}_p (0.7\alpha + 2.5(1 - \alpha)) \quad (6.13)$$

La circulation en maintenant ce créneau garantit bien une vitesse maximale (égale à celle de la contrainte) tout en garantissant une marge de sécurité nécessaire.

A l'aide de la description des deux régimes existants, nous pouvons écrire quels sont les états stables — les états dans lesquels le modèle tend à se trouver en régime stable — donnés par le modèle ARCHIPL. Ces états recherchés sont donnés par l'équation suivante :

$$\dot{x}(\Delta x) = \min \left(\frac{\Delta x}{0.7\alpha_n + 2.5(1 - \alpha_n)}, v_d \right) \quad (6.14)$$

La figure 6.11 est une représentation de ces états dans le plan gap / vitesse. Nous pouvons y retrouver les deux régimes contraint et libre. Dans les situations où le véhicule vise des vitesses inférieures à sa vitesse désirée, le véhicule subit la présence de son prédécesseur. Si le véhicule peut circuler à sa vitesse désirée, il n'est alors pas contraint.

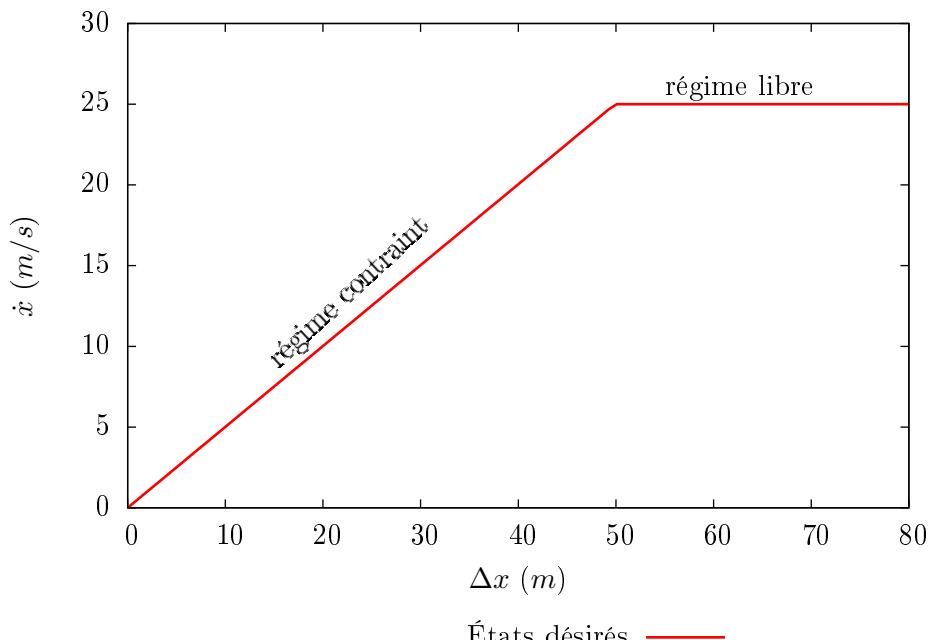


FIGURE 6.11 – États désirables pour un véhicule ARCHIPL avec $v_d = 25m.s^{-1}$ et $\alpha = 0.28$

Nous pouvons observer que la couche stratégique du modèle ARCHIPL correspond parfaitement au modèle de NEWELL [Newell, 1993] que nous avons présenté dans la partie 2.3.1, aux paramètres près.

Il apparaît donc particulièrement intéressant de pouvoir isoler cette couche stratégique puisque, conformément au processus de modélisation de [Newell, 1993], elle influence directement l'écoulement du trafic, quand celui-ci se trouve dans un état stable. Les perturbations apparaissant dans des états instables et transitoires du trafic sont donc, elles, le fait de l'influence des couches inférieures.

6.4.3 Couche tactique

La couche tactique du modèle ARCHIPL est en charge de gérer les situations temporaires. Ces situations ne durent en général que quelques secondes, dizaines de secondes au plus. Elle correspondent aux phases instables ou transitoires du trafic qu'un conducteur est en général en capacité d'anticiper et auquel il peut s'adapter.

Nous pouvons distinguer deux classes de phénomènes transitoires auxquels peuvent être assujettis les conducteurs :

- Les contraintes amenées à disparaître. Elle présentent un élément contraignant le véhicule mais qui dans un futur proche ne sera plus en interaction. Ainsi, dans un futur proche, le véhicule ne sera plus sujet à cette contrainte et peut la considérer comme faible jusqu'à sa disparition.
- Les contraintes en cours de formation. Elles sont au moment de la perception faibles, et ne constituent pas nécessairement une gêne directe. Cependant, il est possible de prévoir qu'elles vont évoluer en contraintes fortes et stables dans un futur proche. Il est donc possible pour le véhicule de commencer son adaptation afin d'anticiper l'état futur du trafic.

Afin d'identifier ces situations, le modèle ARCHIPL procède de la manière suivante. À chaque pas de temps le conducteur analyse l'impact de chaque véhicule étant ou pouvant arriver sur la trajectoire qu'il envisage de suivre lui-même. La contrainte engendrée par chacun de ces véhicules est caractérisée afin de déterminer si elle sera durable ou non. En fonction de cette caractérisation, il est possible de déterminer le type de comportement requis pour faire face à la contrainte, et donc quelle est l'accélération nécessaire. Étant donné que nous nous focalisons ici sur les comportements longitudinaux, nous n'abordons pas les situations où une contrainte peut être dissipée par un changement de voie, comme le propose le modèle général de [Saad, 1994].

6.4.3.1 Caractérisation de la durée

Les contraintes de courte durée sont celles qui sont considérées comme amenées à disparaître prochainement. Dans les situations de suivi classique, le modèle ARCHIPL reconnaît trois situations comme étant des contraintes temporaires :

1. lorsque le véhicule perçu est en train de quitter la voie sur laquelle circule l'agent,
2. lorsque l'agent est en train de quitter la voie sur laquelle circule le véhicule contraignant,
3. lorsque la contrainte évolue à une vitesse supérieure à l'agent et qu'il est en phase d'accélération.

Nous avons évoqué plus tôt que face à une contrainte de courte durée, un conducteur cherche à adopter une stratégie d'adaptation dite courte. Dans le modèle ARCHIPL, cela se traduit par une modification du TIV acceptable par l'agent. Celui-ci prend une faible valeur, entraînant un plus faible espace-temps acceptable. La valeur de $0.7s$ est utilisée par défaut.

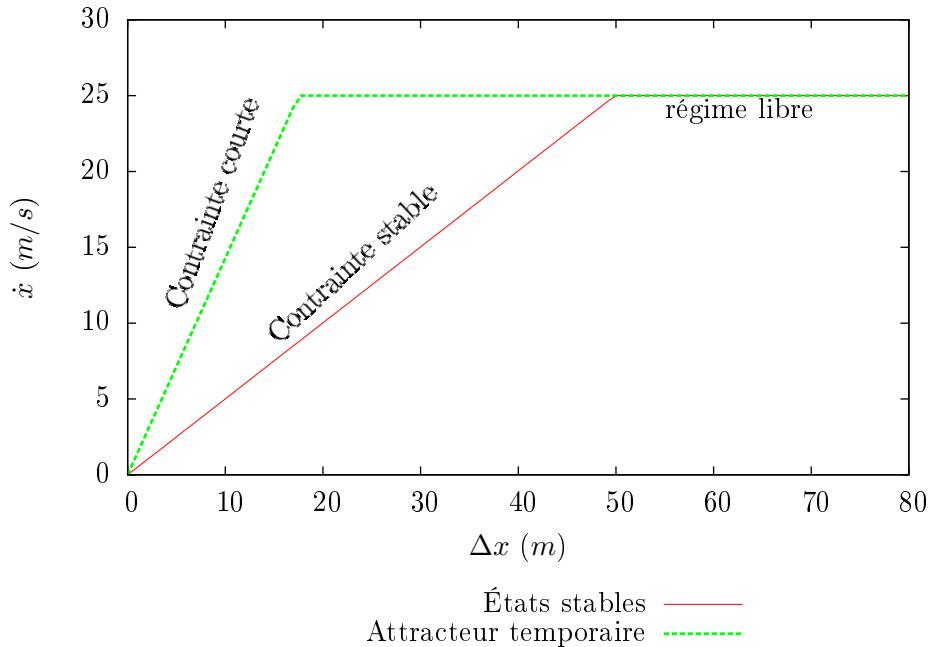


FIGURE 6.12 – Apparition d'un attracteur du plan gap / vitesse en cas de contrainte de courte durée

La modification du TIV acceptable d'un agent se caractérise par l'apparition d'un nouvel attracteur *temporaire* observable dans le plan gap / vitesse comme le montre la figure 6.12. Cet attracteur se situe dans la zone d'états dits sur-contraints que le conducteur cherche généralement à atténuer en abaissant sa vitesse. Dans cette situation, le fait que la contrainte soit temporaire implique nécessairement que l'espace disponible face au conducteur conducteur augmentera sans action de sa part.

Toutes les contraintes n'entrant pas dans la catégorie de courte durée sont considérées comme des contraintes longues ou en formation, et le TIV ciblé par le conducteur est celui proposé par la couche stratégique du comportement.

6.4.3.2 Calcul de l'accélération produite

À partir de la caractérisation d'une contrainte générée par un véhicule, le conducteur ARCHIPL détermine quelle est l'accélération qu'il doit adopter afin de s'adapter à la contrainte perçue. Le détail du calcul de l'accélération désirée pour s'adapter à une contrainte est détaillé dans la partie 6.2.2.1. L'accélération «idéale» ainsi obtenue est transmise à la couche opérationnelle.

6.4.4 Couche opérationnelle

La couche opérationnelle est celle en charge de contrôler le véhicule. Elle détermine donc, à partir de la sortie de la couche tactique (une accélération souhaitée), quel est le déplacement effectif du véhicule sur l'infrastructure. Cette couche prend en compte les aspects dynamiques du véhicule.

Cette couche limite donc l'accélération demandée par la couche supérieure selon plusieurs critères :

- les limites intrinsèques du véhicule,
- le lissage de l'accélération afin de limiter le jerk⁶.

La méthode utilisée pour déterminer l'accélération maximale que le véhicule peut adopter est celle que nous avons présenté dans la section 6.3.2. Nous ne revenons donc pas ici sur les détails de ce modèle.

Par ailleurs, le modèle ARCHIPL reprend un mécanisme de lissage de l'accélération déjà présent dans le modèle ARCHISIM initial. Ainsi, l'accélération effective d'un véhicule est donnée par la moyenne entre l'accélération maximale présentée dans la section 6.3.2 avec les accélérations adoptées lors des quatre derniers pas de temps. L'objectif d'un tel lissage est de limiter la vitesse de changement d'accélération d'un véhicule, et donc de borner son jerk.

6.5 Étude expérimentale à l'échelle macroscopique

En complément des différentes expérimentations menées tout au long de nos travaux visant à s'assurer de la validité des comportements individuels modélisés, nous avons mené une série d'expérimentations visant à étudier et confirmer le comportement macroscopique d'une population de véhicules.

Plusieurs raisons nous ont conduit à ne pas utiliser les scénarios du projet NGSIM afin de mener cette étude macroscopique. Comme nous l'avons précédemment mentionné, les enregistrements liés à ce projet sont effectués sur des infrastructures aux voies nombreuses. La stratégie de gestion de ces voies observée dans les enregistrements est différente de celle implantée dans le modèle ARCHISIM. Ainsi les expérimentations préliminaires effectuées sur ce jeu de données ont montré des divergences importantes grandement dues à ces différences de gestion des voies de circulation. Par ailleurs, les enregistrements disponibles ne couvrent que des situations proches de la congestion. Ces données ne sont donc utilisables que pour reconstruire une sous partie du diagramme fondamental caractérisant l'infrastructure.

Afin de pouvoir étudier l'impact des véhicules lourds que nous avons modélisé, nous avons préféré étudier un scénario abstrait permettant de couvrir l'ensemble des situations de trafic. Nous avons réalisé un scénario de trafic s'écoulant sur une infrastructure composée de deux voies de circulation en ligne droite. Après deux kilomètres, nous avons modélisé un rétrécissement par la gauche. La fin du circuit est effectué sur une infras-

6. Le jerk est la dérivée de l'accélération par rapport au temps. Il s'agit donc de la dérivée au troisième de la position par rapport au temps.

tructure n'ayant qu'une seule voie. Ce rétrécissement a pour objectif de limiter le débit pouvant passer en ce point et favoriser la formation d'une congestion lorsque la demande provenant de la partie à deux voies dépasse la capacité de la section à une voie de l'infrastructure.

Le trafic à l'entrée est généré afin de reproduire le débit spécifié dans le tableau 6.4. Le trafic est généré aléatoirement afin de reproduire cette répartition par les outils associés à la plate-forme de simulation ARCHISIM présentés dans la partie 4.2.4. Le trafic utilisé comprend deux pics de demande de trafic et permet ainsi de couvrir différents états de trafic comprenant un trafic fluide, la formation d'une congestion, l'état congestionné et enfin le retour à un trafic fluide.

Plusieurs capteurs virtuels simulant le comportement de boucles électromagnétiques sont placées sur le circuit. Les boucles sont placées aux points kilométriques 1500, 1700 et 2500m. Ainsi deux boucles sont en amont du point où l'infrastructure passe de deux à une voie, et un capteur se trouve en aval de cette difficulté.

Les véhicules empruntant l'infrastructure sont générés de manière à s'adapter à une réglementation similaire à celle pratiquée sur une autoroute. Ainsi les véhicules légers peuvent rouler à une vitesse atteignant $130\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ tandis que les véhicules lourds ne peuvent pas dépasser la vitesse de $90\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$.

TABLE 6.4 – Variation du débit entrant de véhicules sur l'infrastructure de deux voies simulée

Heure (h : m : s)	Débit demandé (vh/h)
00 : 00 : 00	10
00 : 20 : 00	1000
00 : 40 : 00	2500
01 : 00 : 00	100
01 : 20 : 00	2500
01 : 40 : 00	10

Les figures 6.13, 6.14 et 6.15 montrent les diagrammes fondamentaux construits à l'aide des différents capteurs virtuels placés sur la chaussée de la route d'étude. Les figures présentées sont réalisées en utilisant une durée d'agrégation des données des capteurs d'une minute. Ces diagrammes permettent de mettre en avant différents impacts que peuvent avoir les véhicules lourds sur l'écoulement du trafic.

Tout d'abord le capteur situé en aval de la difficulté nous permet de construire la figure 6.13. Ce diagramme permet de montrer le comportement fluide comprenant des véhicules lourds. En effet, en aval de la difficulté rien ne constraint le trafic et celui-ci s'écoule librement. Le débit évolue linéairement par rapport à la densité, comme nous l'avions présenté dans la partie 2.2.1. Nous pouvons également remarquer que la pente du diagramme décroît au fur et à mesure que la concentration de véhicules lourds augmente. Ceci est expliqué par la différence entre les vitesses maximales pratiquées par les véhicules

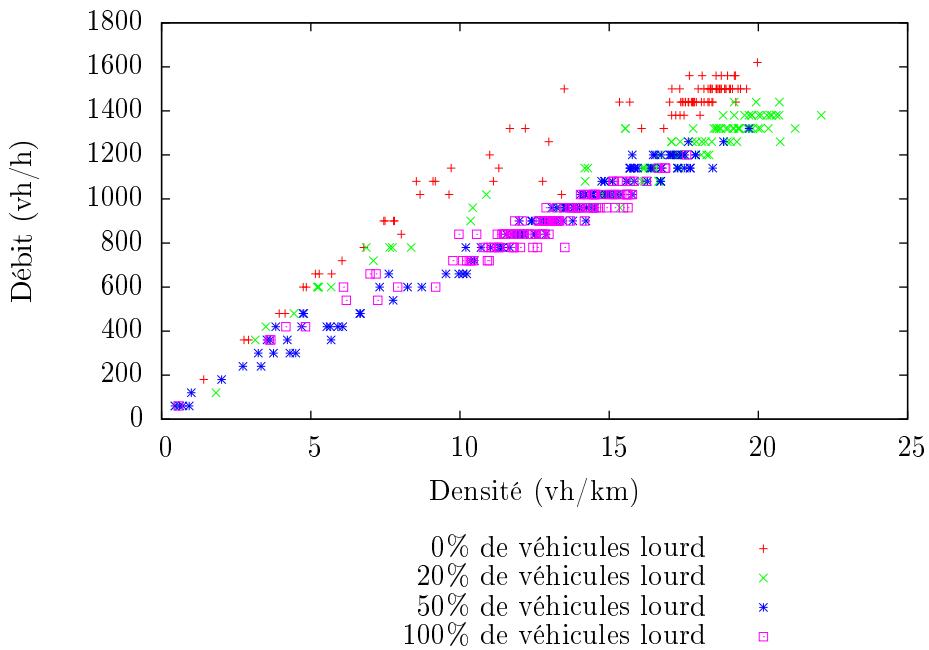


FIGURE 6.13 – Comparaison des diagrammes fondamentaux pour les différentes concentrations de PL à 2500m (soit 500m après le goulot d'étranglement). Les diagrammes sont caractéristiques de ceux de trafics fluides. Les différences de pente observées correspondent aux vitesses moyennes pratiquées sur la section.

lourds et les véhicules légers. En effet, la pente de la partie linéaire du diagramme fondamental correspond à la vitesse libre pratiquée sur l'infrastructure. L'effet observé est donc directement lié à la différence de réglementation appliquée aux différentes catégories de véhicules.

Les figures 6.14 et 6.15 correspondent à des diagrammes fondamentaux construits à partir des deux boucles situées en amont de la difficulté. Ces deux séries de diagrammes ont des propriétés très similaires. Tout d'abord nous pouvons confirmer qu'apparaissent aussi bien des situations fluides que des situations congestionnées telles que nous avons cherché à les faire apparaître dans nos scénarios d'étude.

Les diagrammes des deux capteurs montrent que plus la concentration de véhicules lourds augmente, plus la concentration critique⁷ ainsi que le débit maximal diminuent. Cet effet est résumé schématiquement dans la figure 6.16. Cet résultat est tout à fait cohérent avec les précédents modèles présents dans la littérature. En particulier, nous pouvons remarquer que la figure 6.17, issue de [Chanut, 2005], présente un résultat similaire. De plus, aussi bien les travaux de [Chanut, 2005] que les résultats des figures 6.14 et 6.15 montrent que la chute de la concentration critique et du débit maximal sont

7. Concentration critique : concentration marquant la séparation entre régime fluide et régime congestionné du trafic.

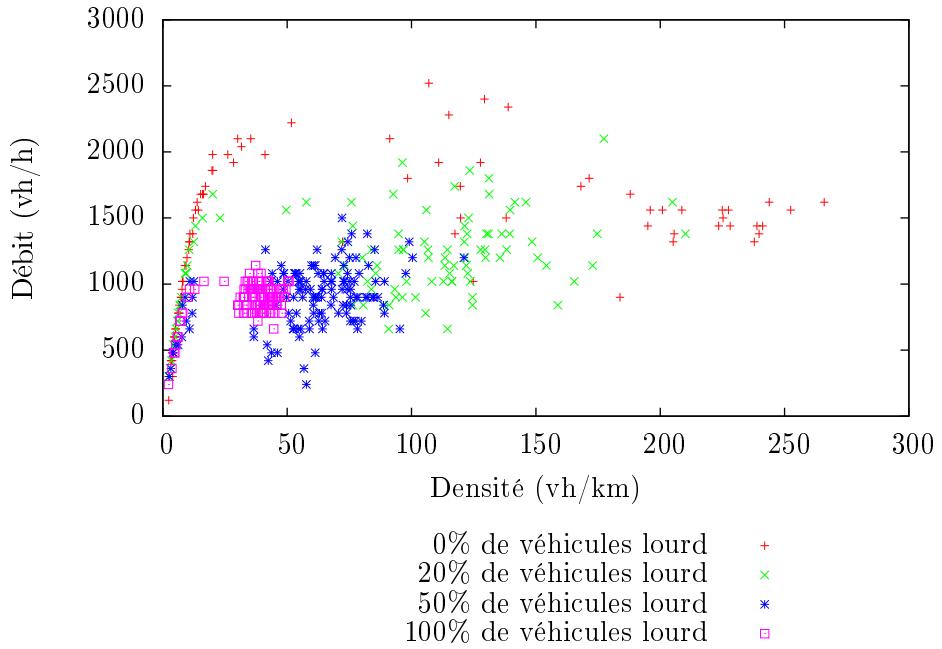


FIGURE 6.14 – Comparaison des diagrammes fondamentaux pour les différentes concentrations de PL à 1500m (soit 500m avant le goulot d'étranglement).

nettement plus marquées pour des concentrations de poids lourds faibles. *A contrario*, pour des concentrations élevées, la concentration critique continue à décroître au fur et à mesure que la part de véhicules lourds augmente mais à un rythme moindre.

Nous pouvons également observer que les trafics hétérogènes ont une tendance à montrer une plus grande variation que les trafics homogènes.

Cet étalement des diagrammes fondamentaux liés aux trafics hétérogènes est lié, selon nous, à une plus grande instabilité du trafic. L'interaction entre véhicules légers, prompts à changer de régime pour s'adapter aux perturbations, et les véhicules lourds, cherchant à maintenir une vitesse plus stable, semble conduire à une dégradation des conditions de trafic. Les réactions conjuguées des différents conducteurs semblent plus propice à l'amplification des perturbations que dans le cas de trafics homogènes.

6.6 Conclusion

Ce chapitre a été l'occasion de présenter un modèle de véhicule lourd qui a été développé au cours des travaux présentés dans ce manuscrit. Afin d'aboutir à ce modèle nous avons appliqué la méthode de développement incrémentale que nous avons présenté dans le chapitre 4. Nous avons ainsi présenté deux incrémentations successives que nous avons apporté à un modèle préexistant afin d'obtenir la version actuelle du modèle ARCHIPL. Le premier incrément que nous avons présenté ici a été réalisé grâce à l'outil d'analyse

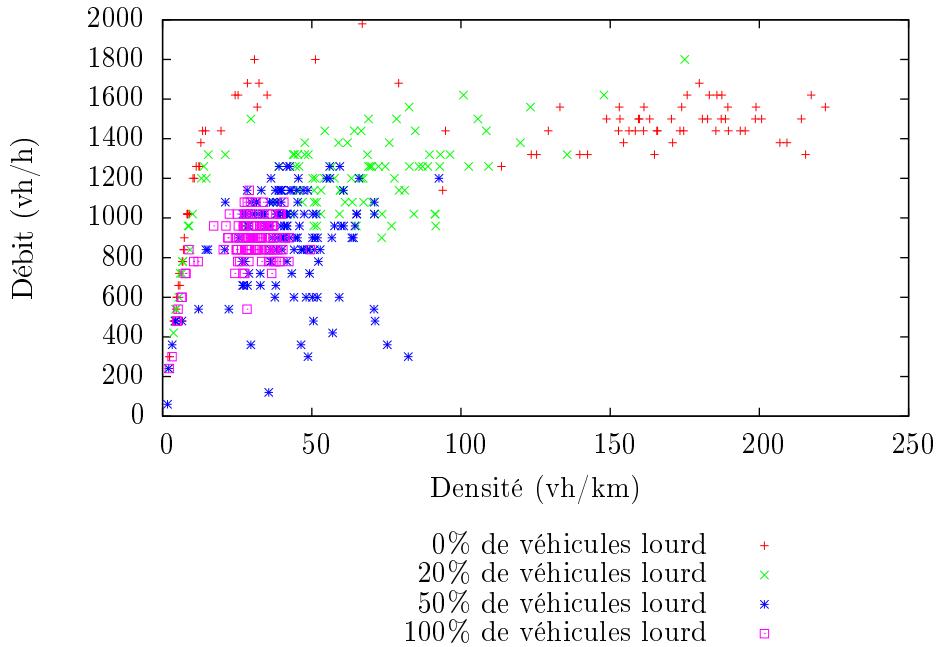


FIGURE 6.15 – Comparaison des diagrammes fondamentaux pour les différentes concentrations de PL à 1700m (soit 300m avant le goulot d'étranglement).

des comportements que nous avions présenté et développé dans le chapitre 5. Nous avons également pu mettre en avant comment la méthode VIM4MAS nous permet d'opérer une réorganisation de l'implantation du modèle auquel nous avons contribué.

Au cours de ce chapitre, nous avons également mis à l'épreuve le modèle que nous proposons. Nous avons ainsi pu montrer en quoi les résultats qu'il permet d'obtenir sont cohérents avec la littérature préexistante sur ce sujet.

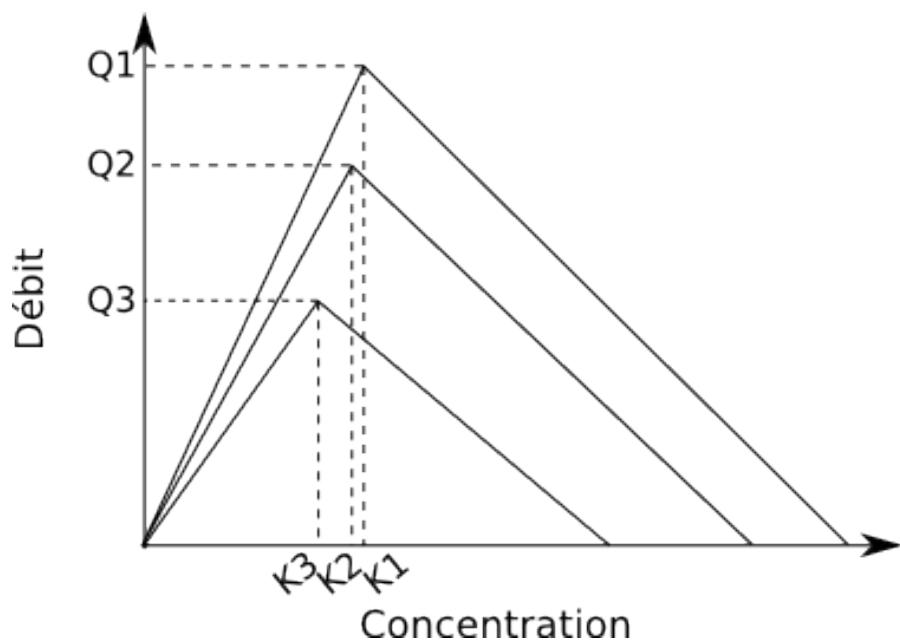


FIGURE 6.16 – Forme schématique du diagramme fondamental pour différentes concentrations de PL. Schéma basée sur les observations faites des figures 6.13, 6.14 et 6.15. Pour trois trafics contenant une part de respectivement c_1 , c_2 et c_3 véhicules lourds tels que $c_1 < c_2 < c_3$, nous pouvons constater que la concentration critique des trois diagrammes fondamentaux respectent $k_1 > k_2 > k_3$. Les débits maximaux eux respectent $q_1 > q_2 > q_3$.

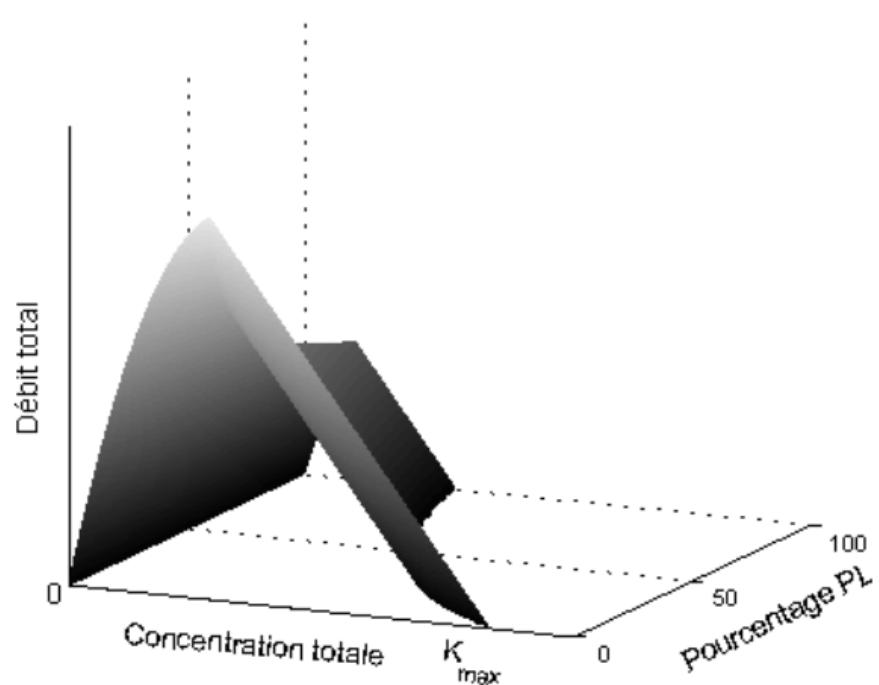


FIGURE 6.17 – Diagramme fondamental multi-classes en fonction de la concentration des PL. Diagramme extrait de [Chanut, 2005]

Chapitre 7

Conclusion et perspectives

La compréhension des phénomènes de congestion, de leurs formations, de leurs évolutions et de leurs impacts est un enjeu majeur de notre société moderne. Ces questions sont donc depuis plus d'un demi siècle l'objet d'un grand nombre de travaux de recherche. Cependant, malgré l'impact reconnu des véhicules lourds sur les phénomènes de congestion, relativement peu de travaux se sont intéressés à leurs spécificités. La majorité des outils de simulation microscopiques ne différencie pas le comportement de ces véhicules de celui des autres véhicules. Les véhicules lourds adoptent des comportements similaires aux véhicules de tourisme à l'exception de quelques paramètres tels que l'encombrement des véhicules ou les limitations qui leurs sont appliquées.

Cette thèse s'est donc attachée à la question de savoir si les véhicules lourds se comportaient comme des véhicules légers. Nous avons cherché à savoir dans quelles mesures ces différences de comportements peuvent affecter l'écoulement du trafic. Si les comportements des véhicules lourds se distinguent par certains aspects de ceux des véhicules légers, il est nécessaire de rechercher quels sont les aspects communs entre les comportements. Enfin, si un socle se dégage, comme le suppose la littérature, alors il convient de chercher à réaliser un modèle de comportement de véhicules lourds en tirant parti des modèles de véhicules légers existants.

7.1 Contributions

Dans cette thèse, nous avons suivi l'hypothèse générale de la littérature selon laquelle un modèle de conduite de véhicule lourd peut être approché par un modèle de conduite de véhicules légers. Nous avons proposé la méthode VIM4MAS permettant de tendre vers un modèle de véhicules lourds en partant d'un modèle de véhicules légers. Cette méthode est fortement inspirée des approches de développement incrémentales dirigées par les tests. Pour chaque incrément apporté au modèle, nous cherchons à «mettre en échec» le modèle courant sur un point particulier. La mise en échec est exprimée par un ou plusieurs tests, spécifiés de manière formelle ou non, et caractérisant un aspect du comportement que le modèle courant ne peut reproduire. Dans le cas où l'aspect incorrectement reproduit influence de façon significative les comportements de groupe

(phénomènes émergents), il est nécessaire de proposer une modification au modèle. Cette modification doit permettre au modèle de se conformer aux nouveaux tests, ainsi qu'à tout ancien test. Dans le cas contraire, une itération de développement n'est pas justifiée du point de vue de l'objectif de simulation, étant donné que les comportements émergents ne sont pas significativement affectés.

Afin de pouvoir caractériser et spécifier une partie du comportement longitudinal des conducteurs, nous avons développé une méthode basée sur l'étude des phénomènes d'hystérésis. Cette méthode permet d'étudier un comportement tel une boîte noire. Aucune connaissance sur l'objet étudié n'est nécessaire à l'étude. Seules les réactions du comportement étudié sont utilisées. Cette méthode permet de distinguer dans un comportement quelles sont les actions influencées par les stratégies de court, moyen et long terme. Ce découpage des actions selon différentes couches de comportements est cohérent avec les travaux de psychologie de la conduite, notamment ceux de MICHON. Ceci nous permet d'analyser un comportement dans un cadre théorique éprouvé. Ainsi cette méthode permet, en accord avec une grande partie de la littérature existante, d'analyser et de comprendre les stratégies longitudinales des conducteurs.

Nous avons ensuite montré comment différentes stratégies d'adaptation à court terme de la part des conducteurs peuvent engendrer différents phénomènes à l'échelle du trafic. Ce constat nous conforte dans l'idée que si des différences significatives apparaissent dans les comportement des conducteurs de véhicules lourds par rapport à ceux des conducteurs de véhicules légers, ils doivent être correctement reproduits par les modèles de simulation. Forts de ce constat, nous avons étudié les données de trajectoires mises à disposition par le projet américain NGSIM. Cette analyse a permis de mettre en avant des différences significatives dans la stratégie d'adaptation des véhicules lourds. Ces derniers doivent anticiper très fortement toute phase de décélération, leur comportement faisant apparaître des capacités d'anticipation très prononcées.

Nous proposons dans cette thèse le modèle de simulation ARCHIPL afin de reproduire ces capacités d'anticipation importante. Ce modèle est construit sur les bases du modèle ARCHISIM. Il est construit de manière incrémentale en enrichissant le modèle original à chaque incrément. Ainsi, le premier incrément s'attache à reproduire les comportements de décélération majoritaires observés dans les données du projet NGSIM. Un second incrément améliore la modélisation des accélérations des véhicules lourds, dans la mesure où les observations originales menaient à des résultats irréalistes. Enfin, une dernière itération a permis de ré-organiser la base de code d'ARCHIPL afin de faire apparaître clairement les trois couches de comportement que sont les couches opérationnelles, tactiques et stratégiques telles que proposées par MICHON.

Le modèle ARCHIPL a ensuite été évalué dans des simulations de trafic comprenant aussi bien des véhicules lourds que légers (modélisés avec le modèle ARCHISIM). Cette évaluation montre des résultats cohérents avec la littérature existante sur le sujet, et particulièrement avec les résultats de modélisation macroscopique proposées par S. CHANUT. Notons que bien que ces résultats soient encourageants, ils ne montrent pas d'apport de connaissance nouvelle au niveau macroscopique. Cependant, le fait que nos hypothèses de modélisation microscopique soient ainsi corroborées constitue une avancée significative

et avalise notre démarche. Cela permet également de conforter nos hypothèses relatives à la cause des phénomènes macroscopiques déjà reproduits dans la démarche descriptive des modèles macroscopiques.

7.2 Perspectives

Les suites envisageables des travaux présentés dans cette thèse se regroupent selon deux catégories. La première partie des perspectives de recherche est motivée par le besoin applicatif d'une meilleure modélisation pour une compréhension des phénomènes liés aux véhicules lourds et à leurs impacts. La seconde partie des perspectives s'intéresse au champ théorique des systèmes multi-agents ainsi qu'aux méthodes et outils associés.

Concernant la simulation de trafic routier, nos travaux se sont essentiellement intéressés à l'étude, l'analyse et la reproduction des comportements longitudinaux des véhicules lourds. Il semble dorénavant important de s'intéresser aux comportements latéraux de ces véhicules, et donc à leurs comportements de changements de voie. Cet aspect n'a pas été traité durant cette thèse mais ne peut être omis dans le cadre de la réalisation d'un modèle de simulation complet. L'étude des comportements de sélection de voie ainsi que des réglementations associées (interdiction de dépassement des véhicules lourds, interdiction d'utilisation de certaines voies) est important aussi bien pour l'étude des écoulements sur les infrastructures que pour leur sécurité. Par exemple, certaines réglementations comme une interdiction de dépassement peuvent aboutir à des files continues de véhicules lourds sur la voie la plus à droite rendant difficile voir dangereuse les manœuvres de rabattement en vue de l'approche d'une sortie de l'infrastructure. En plus de la modélisation des comportements des véhicules lourds, il est important de reproduire le comportement des autres usagers de la route en présence de poids lourds. Ainsi, certains travaux s'intéressent au phénomène de gêne subie lorsqu'un conducteur suit un véhicule lourd. D'autres études ont montré que le nombre de changements de voie observables sur une infrastructure augmente avec le taux de véhicules lourds. Ce descripteur est généralement mal reproduit en simulation : le nombre de changements de voie est largement surestimé et / ou les taux d'occupation moyens des voies de circulations sont souvent mal reproduits.

Pour chacun des aspects suscités, la méthode de développement incrémentale dirigée par la vérification VIM4MAS est susceptible d'être utilisée. Le principal défi scientifique à venir de ce point de vue réside dans l'identification de descripteurs pertinents des comportements des conducteurs permettant de mettre en défaut les modèles actuels. Les résultats actuellement obtenus permettent de confirmer que le modèle que nous proposons avec cette méthode de développement est cohérent avec la littérature et permet de reproduire les grandes lois du trafic. La suite de ces travaux peut potentiellement apporter de nouveaux résultats améliorant notre connaissance du domaine.

Pour affiner la modélisation des comportements des véhicules lourds et pour améliorer notre compréhension des causes de ces comportements particuliers, il serait intéressant d'évaluer des modèles brisant le couple véhicule / conducteur. Dans une telle configuration, le conducteur doit interagir avec son véhicule et s'adapter à ses réactions (accéléra-

tion franches ou longues, manœuvrabilité aisée ou non...). Avec une telle architecture, le comportement observable d'un véhicule est le résultat de l'apprentissage et de l'adaptation du conducteur aux caractéristiques de son véhicule. Cette approche se situe donc dans une démarche explicative contrairement à celle présentée dans cette thèse qui est principalement descriptive.

Enfin, l'approche basée sur l'étude des phénomènes d'hystérésis apparaissant dans les comportements peut être étendue à bien d'autres comportements. Par exemple, l'étude de la propagation des réactions (et donc des latences dans la propagation) peut se montrer particulièrement intéressante dans un grand nombre de domaines. En particulier l'étude des phénomènes de foules, et plus particulier le cas de propagations émotionnelles, peut montrer des phénomènes d'hystérésis intéressants.

Table des matières

1	Introduction générale	9
2	La simulation de trafic routier	13
2.1	Introduction	13
2.2	Différentes échelles de simulation	14
2.2.1	L'approche macroscopique	14
2.2.2	L'approche microscopique	17
2.2.3	Autres approches	19
2.2.3.1	Les approches mésoscopiques	19
2.2.3.2	L'approche multi-niveau	20
2.2.3.3	Les approches à base d'automates cellulaires	20
2.2.3.4	L'approche nanoscopique	20
2.2.4	Synthèse	21
2.3	Modèles de simulation microscopique	22
2.3.1	Le modèle de NEWELL	23
2.3.2	Les modèles dynamiques simples	24
2.3.2.1	Le modèle de GAZIS et ses dérivés	24
2.3.2.2	Le modèle «Optimal Velocity» (OV)	25
2.3.3	Les modèles comportementaux	25
2.3.3.1	Le modèle de GIPPS	26
2.3.3.2	Le modèle «Intelligent Driver Model» (IDM)	27
2.3.3.3	Les modèles avec perception étendue	29
2.4	Prise en compte des véhicules lourds	29
2.4.1	Capacités intrinsèques	29
2.4.2	Une réglementation spécifique	30
2.4.3	Spécificité de la conduite d'un poids lourd	31
2.4.4	Impact des poids lourds sur leur voisinage	32
2.5	Conclusion	32
3	Les systèmes à base d'agents	35
3.1	Introduction	35
3.2	L'approche SMA	35
3.2.1	Une façon de modéliser le monde	37

3.2.2	Approche microscopique ou SMA ?	39
3.2.2.1	Les agents et leur environnement	39
3.2.2.2	Des agents autonomes et indépendants	40
3.2.2.3	État du monde, perception et connaissance sur le monde	42
3.2.3	Classification des agents	44
3.2.3.1	Agents situés ou agents communicants	44
3.2.3.2	Agents réactifs ou agents délibératifs	44
3.3	Les SMA pour le trafic	45
3.3.1	Perception et représentation de l'environnement	46
3.3.1.1	Vision égocentrique	46
3.3.1.2	Perception incomplète	48
3.3.2	Processus de décision	48
3.3.2.1	De nouvelles façons de décrire le comportement	48
3.3.2.2	Gestion de conflits	49
3.4	Conclusion	51
4	Outils et méthodes de travail	53
4.1	Introduction	53
4.2	La plate-forme ARCHISIM	54
4.2.1	Objectifs de la plate-forme ARCHISIM	54
4.2.2	La gestion du temps	56
4.2.3	Architecture basée sur un serveur de vision	57
4.2.3.1	Interface de communication	57
4.2.3.2	Ordonnancement et «balises fantômes»	59
4.2.3.3	Parallélisation naturelle	59
4.2.4	Outils associés	60
4.3	Méthodes de développement	61
4.3.1	Limites des méthodes généralistes pour le développement des SMA	61
4.3.2	Méthodes de développement de système à base d'agents	63
4.3.3	Méthodes de conception itératives	66
4.3.3.1	Méthodes agiles et développement dirigé par les tests	66
4.3.3.2	Le développement en spirale	68
4.4	Vers une méthode de développement incrémental : VIM4MAS	70
4.4.1	Présentation générale	70
4.4.2	Facette du comportement et système	71
4.4.2.1	Identification d'une facette de comportement	71
4.4.2.2	Facette du comportement et émergence	71
4.4.2.3	Spécification du comportement attendu	72
4.4.3	Implémentation dirigée par la vérification	73
4.4.4	Planification	75
4.5	Conclusion	75

5 Étude des comportements grâce à l'hystéresis	77
5.1 Introduction	77
5.2 Méthode d'Analyse des comportements par l'hystéresis	78
5.2.1 Le phénomène d'hystéresis	78
5.2.2 L'hystéresis dans les comportements de suivi des conducteurs	79
5.2.3 Présentation de l'analyse basée sur l'hystéresis	82
5.2.3.1 Les états d'équilibre	82
5.2.3.2 Les phases de transition	83
5.3 Illustration de la méthode d'étude	84
5.3.1 Présentation des modèles de référence et étude de leurs équilibres	85
5.3.1.1 Analyse du modèle « Optimal Velocity »	85
5.3.1.2 Analyse du modèle « Intelligent Driver Model »	88
5.3.1.3 Le modèle ARCHISIM	89
5.3.2 Comparaison des états d'équilibre	91
5.3.3 Étude des comportements individuels	93
5.3.3.1 Comportement dynamique du modèle OV	94
5.3.3.2 IDM	95
5.3.3.3 ARCHISIM	97
5.3.3.4 Synthèse	98
5.3.4 Temporalité des décisions et modèle en trois couches	98
5.4 Hystéresis et émergence	100
5.4.1 Étude de la propagation d'une perturbation	101
5.4.2 Étude de la réaction d'un peloton	101
5.4.2.1 Optimal Velocity	101
5.4.2.2 Intelligent Driver Model	102
5.4.2.3 ARCHISIM	102
5.4.3 Réaction à une insertion à basse vitesse	103
5.5 Conclusion	104
6 Le modèle ArchiPL	109
6.1 introduction	109
6.2 La décélération des PL	110
6.2.1 Comportement de référence : utilisation des données NGSIM	110
6.2.1.1 Pertinence des données	112
6.2.1.2 Réduction du bruit	114
6.2.1.3 Analyse des comportements réels de décélération	115
6.2.2 La gestion des décélérations dans le modèle ARCHIPL	119
6.2.2.1 Modèle proposé	119
6.2.2.2 Vérification	121
6.3 L'accélération des véhicules lourds	123
6.3.1 Les capacités d'accélération des PL ARCHISIM	123
6.3.2 Modifications pour le modèle ARCHIPL	124
6.3.3 Évaluation des capacités d'accélération du modèle ARCHIPL	127

6.4	L'architecture finale du modèle ARCHIPL	129
6.4.1	Architecture générale du modèle ARCHIPL	129
6.4.2	Couche stratégique	131
6.4.3	Couche tactique	133
6.4.3.1	Caractérisation de la durée	133
6.4.3.2	Calcul de l'accélération produite	134
6.4.4	Couche opérationnelle	135
6.5	Étude expérimentale à l'échelle macroscopique	135
6.6	Conclusion	138
7	Conclusion et perspectives	143
7.1	Contributions	143
7.2	Perspectives	145
Glossaire		151

Glossaire

NGSIM «*Next Generation SIMulation*». 7, 109, 110, 112, 115, 135, 149, 150

créneau Espace existant entre l'avant d'un véhicule et l'arrière du véhicule le précédent sur l'infrastructure.. 80, 150

diagramme temps position Un diagramme temps-position, ou diagramme (x, t) , est une construction graphique dans laquelle la position de l'ensemble des véhicules est représentée en fonction du temps. Ainsi la trajectoire d'un véhicule à l'arrêt est représentée par une droite horizontale, et celle d'un véhicule évoluant à vitesse constante par une droite dont la pente donne la vitesse du véhicule.. 23, 150

FHWA «*Federal Highway Administration*». 110, 150

GL génie logiciel. 150

génie logiciel Le génie logiciel (*software engineering* en anglais) est une science de génie industriel qui étudie les méthodes de travail et les bonnes pratiques des ingénieurs qui développent des logiciels. 61, 62, 150, 151

HDM Human Driver (meta-)Model. 29, 100, 150

hystérésis Phénomène de retard de l'effet par rapport à la cause ayant engendré cet effet.. 78, 150

IDM Intelligent Driver Model. 7, 27, 28, 30, 31, 85, 88, 89, 91, 93, 150

incrémental Le développement incrémental consiste à réaliser successivement des éléments fonctionnels utilisables, plutôt que des composants techniques. Voir <http://referentiel.institut-agile.fr/incremental.html>. 54, 66, 150

itératif Le développement itératif implique de découper un projet en un certain nombre de cycles, ou itérations, au cours desquelles on prévoit de répéter les mêmes activités. Voir <http://referentiel.institut-agile.fr/iterative.html>.. 54, 66, 150

OV Optimal Velocity. 7, 25, 29, 85–89, 91, 93, 150

SMA Système Multi-Agents. 35, 39, 41, 44, 45, 148, 150

TIV Temps Inter Véhiculaire. 90, 131, 133, 134, 150

USDOT «*United States Department of Transportation*». 110, 150

validation Processus par lequel on s'assure qu'un modèle peut répondre à la question d'intérêt sur l'objet d'étude.. 62, 74, 150

vitesse désirée Paramètre usuel des modèles microscopiques décrivant la vitesse que conducteur souhaite atteindre.. 23, 26, 28, 30, 80, 150

vérification Processus par lequel on s'assure de l'adéquation entre le modèle conceptuel recherché et le modèle exécutable produit. 62, 74, 150

Bibliographie

- [Axtell et al., 1996] Axtell, R., Axelrod, R., Epstein, J., and Cohen, M. (1996). Aligning simulation models : A case study and results. *Computational & Mathematical Organization Theory*, 1(2) :123–141.
- [Bando et al., 1998] Bando, M., Hasebe, K., Nakanishi, K., and Nakayama, A. (1998). Analysis of optimal velocity model with explicit delay. *Arxiv preprint patt-sol/9805002*.
- [Bando et al., 1994] Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata, A., and Sugiyama, Y. (1994). Structure stability of congestion in traffic dynamics. *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, 11 :203–223.
- [Bando et al., 1995] Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata, A., and Sugiyama, Y. (1995). Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation. *Physical Review E*, 51 :1035–1042.
- [Bazzan et al., 1999] Bazzan, A., Wahle, J., and Klügl, F. (1999). Agents in traffic modelling—from reactive to social behaviour. *KI-99 : Advances in Artificial Intelligence*, pages 696–696.
- [Beck, 1999] Beck, K. (1999). Embracing change with extreme programming. *Computer*, 32(10) :70–77.
- [Ben-Akiva et al., 2006] Ben-Akiva, M., Choudhury, C., and Toledo, T. (2006). Lane changing models. In *Proceedings of the International Symposium of Transport Simulation, Lausanne, Switzerland*.
- [Blanchette et al., 2012] Blanchette, F., Waters, A., and Kim, A. (2012). Modeling huddling penguins. *Bulletin of the American Physical Society*, 57.
- [Board, 2000] Board, T. R. (2000). Highway capacity manual.
- [Boehm, 1988] Boehm, B. W. (1988). A spiral model of software development and enhancement. *Computer*, 21(5) :61–72.
- [Bornard, 2012] Bornard, J.-C. (2012). *Développement d'un modèle du conducteur automobile : De la modélisation cognitive à la simulation numérique*. PhD thesis, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.
- [Bourdieu, 1974] Bourdieu, P. (1974). Avenir de classe et causalité du probable. *Revue française de sociologie*, pages 3–42.

- [Box and Draper, 1987] Box, G. E. and Draper, N. R. (1987). Empirical model-building and response surfaces : Wiley series in probability and mathematical statistics. *Empirical model-building and response surfaces : Willey series in probability and mathematical statistics*.
- [Brackstone and McDonald, 1999] Brackstone, M. and McDonald, M. (1999). Car-following : a historical review. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 2(4) :181–196.
- [Bresciani et al., 2004] Bresciani, P., Perini, A., Giorgini, P., Giunchiglia, F., and Mylopoulos, J. (2004). Tropos : An agent-oriented software development methodology. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 8(3) :203–236.
- [Briot and Demazeau, 2001] Briot, J. and Demazeau, Y. (2001). Principes et architecture des systèmes multi-agents (traité ic2, informatique et systèmes d'information). *Hermès Lavoisier*.
- [Brockfeld et al., 2003] Brockfeld, E., Kühne, R., Skabardonis, A., and Wagner, P. (2003). Toward benchmarking of microscopic traffic flow models. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1852 :124–129.
- [Buisson and Lesort, 2010] Buisson, C. and Lesort, J.-B. (2010). *Comprendre le trafic routier. Méthodes et calculs*.
- [Busetta et al., 1999] Busetta, P., Rönnquist, R., Hodgson, A., and Lucas, A. (1999). Jack intelligent agents-components for intelligent agents in java. *AgentLink News Letter*, 2(1) :2–5.
- [Butz et al., 2003] Butz, M., Sigaud, O., and Gérard, P. (2003). *Anticipatory behavior in adaptive learning systems : foundations, theories, and systems*, volume 2684. Springer Verlag.
- [Casare, 2012] Casare, S. J. (2012). *Medee : A method framework for multiagent systems*. PhD thesis, Universidade de São Paulo.
- [Champion, 2003] Champion, A. (2003). *Mécanisme de Coordination Multi-agent fondé sur des jeux : Application à la simulation comportementale de trafic routier en situation de carrefour*. PhD thesis, Université de Valenciennes.
- [Champion et al., 2003] Champion, A., Espié, S., Mandiau, R., Auberlet, J., and Kolski, C. (2003). A game-based, multi-agent coordination mechanism-application to road traffic and driving simulations. In *Summer Computer Simulation Conference*, pages 644–649. Society for Computer Simulation International ; 1998.
- [Chandler et al., 1958] Chandler, R., Herman, R., and Montroll, E. (1958). Traffic dynamics : studies in car following. *Operations Research*, pages 165–184.
- [Chanut, 2005] Chanut, S. (2005). *Modélisation dynamique macroscopique de l'écoulement d'un trafic routier hétérogène poids lourds et véhicules légers*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [Chevrier and Fatès, 2010] Chevrier, V. and Fatès, N. (2010). An example of a multi-agent system described as a discrete dynamical system. In *European Workshop on Multi-agent Systems (EuMAS)*, volume 1, page 17.

- [Cohen, 1990] Cohen, S. (1990). *Ingénierie du trafic routier. Eléments de théorie du trafic et applications.*
- [community,] community, N. *The NGSIM project.*
- [Dai and Li, 2010] Dai, J. and Li, X. (2010). Multi-agent systems for simulating traffic behaviors. *Chinese Science Bulletin*, 55 :293–300.
- [David et al., 2003] David, N., Sichman, J., and Coelho, H. (2003). Towards an emergence-driven software process for agent-based simulation. *Multi-Agent-Based Simulation II*, pages 49–78.
- [Davis, 2003] Davis, L. (2003). Modifications of the optimal velocity traffic model to include delay due to driver reaction time. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 319 :557–567.
- [Deguet et al., 2006] Deguet, J., Demazeau, Y., and Magnin, L. (2006). Elements about the emergence issue : A survey of emergence definitions. *ComPLEXUs*, 3(1-3) :24–31.
- [DeLoach et al., 2001] DeLoach, S. A., Wood, M. F., and Sparkman, C. H. (2001). Multi-agent systems engineering. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*, 11(03) :231–258.
- [Donatini and Frosini, 2009] Donatini, P. and Frosini, P. (2009). Natural pseudo-distances between closed curves. In *Forum Mathematicum*, volume 21, page 981.
- [Doniec, 2006] Doniec, A. (2006). *Prise en compte des comportements anticipatifs dans la coordination multi-agent : application à la simulation de trafic en carrefour.* PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.
- [Doniec et al., 2006] Doniec, A., Espié, S., Mandiau, R., and Piechowiak, S. (2006). Multi-agent coordination and anticipation model to design a road traffic simulation tool. In *4th European Workshop on Multi-Agent Systems*.
- [Dorigo and Gambardella, 1997] Dorigo, M. and Gambardella, L. M. (1997). Ant colony system : A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 1(1) :53–66.
- [Drogoul, 1993] Drogoul, A. (1993). *De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes : une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agents.* PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie.
- [Drogoul et al., 2003] Drogoul, A., Vanbergue, D., and Meurisse, T. (2003). Multi-agent based simulation : Where are the agents ? In *Multi-agent-based simulation II*, pages 1–15. Springer.
- [Duret, 2010] Duret, A. (2010). *Hétérogénéités du trafic autoroutier. Identification, qualification, modélisation et impact sur l'écoulement.* PhD thesis, Ecole nationale des travaux publics de l'état.
- [El Hadouaj, 2004] El Hadouaj, S. (2004). *Conception de comportements de résolution de conflits et de coordination : Application à une simulation multi-agent du trafic routier.* PhD thesis, Thèse de Doctorat de l'Université de Paris 6, France.

- [Espié, 2004] Espié, S. (2004). *Simulation comportementale et réalité virtuelle : vers une simulation globale du système de trafic*. PhD thesis, UPMC. Habilitation thesis.
- [Espié et al., 2007a] Espié, S., Auberlet, J., et al. (2007a). Archisim : a behavioral multi-actors traffic simulation model for the study of a traffic system including its aspects.
- [Espié et al., 2007b] Espié, S., Auberlet, J., et al. (2007b). Archisim : a behavioral multi-actors traffic simulation model for the study of a traffic system including its aspects.
- [Espié et al., 1994] Espié, S., Saad, F., Schnetzler, B., Bourlier, F., and Djemane, N. (1994). Microscopic traffic simulation and driver behaviour modelling : the archisim project. *Road Safety in Europe and Strategic Highway Research Program*, pages 22–31.
- [Ewing, 1890] Ewing, J. (1890). Contributions to the molecular theory of induced magnetism. *Proceedings of the Royal Society of London*, 48(292-295) :342–358.
- [Ferber and Müller, 1996] Ferber, J. and Müller, J. (1996). Influences and reaction : a model of situated multiagent systems. In *2nd International Conference on Multi-agent Systems, Japan, AAAI Press*.
- [Ferber and Perrot, 1995] Ferber, J. and Perrot, J. (1995). *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. InterEditions.
- [Forbes et al., 1958] Forbes, T., Zagorski, H., Holshouser, E., and Deterline, W. (1958). Measurement of driver reactions to tunnel conditions. In *Highway Research Board Proceedings*.
- [Franklin and Graesser, 1997] Franklin, S. and Graesser, A. (1997). Is it an agent, or just a program ? : A taxonomy for autonomous agents. *Intelligent Agents III Agent Theories, Architectures, and Languages*, pages 21–35.
- [Galán et al., 2009] Galán, J., Izquierdo, L., Izquierdo, S., Santos, J., Del Olmo, R., López-Paredes, A., and Edmonds, B. (2009). Errors and artefacts in agent-based modelling. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 12(1) :1.
- [Gazis, 2002] Gazis, D. (2002). The origins of traffic theory. *Operations Research*, pages 69–77.
- [Gazis et al., 1959] Gazis, D., Herman, R., and Potts, R. (1959). Car-following theory of steady-state traffic flow. *Operations Research*, pages 499–505.
- [Gazis et al., 1961] Gazis, D., Herman, R., and Rothery, R. (1961). Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow. *Operations Research*, 9(4) :545–567.
- [Gipps, 1981] Gipps, P. (1981). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B : Methodological*, 15(2) :105–111.
- [Gipps, 1986] Gipps, P. (1986). A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B : Methodological*, 20(5) :403–414.
- [Göcke, 2002] Göcke, M. (2002). Various concepts of hysteresis applied in economics. *Journal of Economic Surveys*, 16(2) :167–188.
- [Gomez, 2009] Gomez, A. (2009). Se repérer dans l'espace pour mémorier : Approche neuromatique du lien entre la mémoire et l'espace.

- [Gómez-Sanz et al., 2004] Gómez-Sanz, J. J., Gervais, M.-P., and Weiss, G. (2004). A survey on agent-oriented oriented software engineering research. In *Methodologies and Software Engineering for Agent Systems*, pages 33–62. Springer.
- [Green and Yoo, 1999] Green, P. and Yoo, H. (1999). Driver behavior while following cars, trucks, and buses. Technical report.
- [Hayden, 2013] Hayden, E. C. (2013). Mozilla plan seeks to debug scientific code. *Nature*, 501(7468) :472–472.
- [Heavy route, 2008] Heavy route (2008). Heavy route : Intelligent route guidance for heavy vehicles. Technical report.
- [Helbing, 2001] Helbing, D. (2001). Traffic and related self-driven many-particle systems. *Reviews of modern physics*, 73 :1067.
- [Helbing and Tilch, 1998] Helbing, D. and Tilch, B. (1998). Generalized force model of traffic dynamics. *Physical Review E*, 58(1) :133.
- [Hidas, 2002] Hidas, P. (2002). Modelling lane changing and merging in microscopic traffic simulation. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 10(5-6) :351–371.
- [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.
- [Hoogendoorn et al., 2010] Hoogendoorn, R., Hoogendoorn, S., Brookhuis, K., and Daamen, W. (2010). Anticipation and hysteresis : Parameter value changes and model performance in simple and multi-anticipative car-following models.
- [Hoogendoorn and Bovy, 2001] Hoogendoorn, S. and Bovy, P. (2001). State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering*, 215(4) :283–303.
- [Hoogendoorn, 2009] Hoogendoorn, S. P. (2009). *Multiclass Continuum Modelling of Multilane Traffic Flow*. PhD thesis, Delft University of Technology ; Faculty of Civil Engineering and Geosciences.
- [Jennings, 1999] Jennings, N. (1999). Agent-oriented software engineering. *Multi-Agent System Engineering*, pages 1–7.
- [Jennings et al., 1998] Jennings, N., Sycara, K., and Wooldridge, M. (1998). A roadmap of agent research and development. *Autonomous agents and multi-agent systems*, 1(1) :7–38.
- [Jiang et al., 2001] Jiang, R., Wu, Q., and Zhu, Z. (2001). Full velocity difference model for a car-following theory. *Physical Review E*, 64 :017101.
- [Kesting et al., 2007] Kesting, A., Treiber, M., and Helbing, D. (2007). General lane-changing model mobil for car-following models. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1999 :86–94.
- [Ketenci et al., 2011] Ketenci, U., Bremond, R., Auberlet, J., et al. (2011). Simulation de perception humaine limitee : etude de l'influence d'un parametre de seuil. *Journées francophones sur les systèmes multi-agents (JFSMA)*.

- [Ketenci et al., 2010] Ketenci, U., Brémond, R., Auberlet, J., and Grislin-Le Strugeon, E. (2010). Bounded active perception.
- [Ketenci, 2013] Ketenci, U. G. (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.
- [Kikuchi and Chakroborty, 1992] Kikuchi, S. and Chakroborty, P. (1992). *Car-following model based on fuzzy inference system*. Number 1365.
- [Koning, 2009] Koning, M. (2009). La congestion du boulevard périphérique parisien : Estimations, évolution 2000-2007, discussions.
- [Kruchten, 2004] Kruchten, P. (2004). *The rational unified process : an introduction*. Addison-Wesley Professional.
- [Ksontini, 2013] Ksontini, F. (2013). *Modèle d'agent fondé sur les affordances : application à la simulation de trafic routier*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.
- [Ksontini et al., 2012] Ksontini, F., Espié, S., Guessoum, Z., and Mandiau, R. (2012). A driver ego-centered environment representatoin in traffic behavioral simulation. In *Advances on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems*, pages 249–253. Springer.
- [Ksontini et al., 2013] Ksontini, F., Guessoum, Z., Mandiau, R., and Espié, S. (2013). Using ego-centered affordances in multi-agent traffic simulation. In *Proceedings of the 2013 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems*, pages 151–158. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- [Laval and Daganzo, 2006] Laval, J. and Daganzo, C. (2006). Lane-changing in traffic streams. *Transportation Research Part B : Methodological*, 40(3) :251–264.
- [Lenz et al., 1999] Lenz, H., Wagner, C., and Sollacher, R. (1999). Multi-anticipative car-following model. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 7(2) :331–335.
- [Lighthill and Whitham, 1955] Lighthill, M. and Whitham, G. (1955). On kinematic waves. ii. a theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 229(1178) :317.
- [Luo and Bölöni, 2012] Luo, Y. and Bölöni, L. (2012). Modeling the conscious behavior of drivers for multi-lane highway driving. *Workshop on Agents in Traffic and Transportation*, pages 93–103.
- [Martin,] Martin, F. *Developing a testbed for evaluating the impacts of truck performances on surrounding traffic*. PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [McDonald et al., 1997] McDonald, M., Wu, J., and Brackstone, M. (1997). Development of a fuzzy logic based microscopic motorway simulation model. In *Intelligent Transportation System, 1997. ITSC'97., IEEE Conference on*, pages 82–87. IEEE.

- [Meurisse, 2004] Meurisse, T. (2004). *Simulation multi-agent : du modèle à l'opérationnalisation*. PhD thesis, Paris 6.
- [Michon, 1985] Michon, J. (1985). A critical view of driver behavior models : What do we know, what should we do. *Human behavior and traffic safety*, pages 485–520.
- [Minsky, 1965] Minsky, M. (1965). Matter, mind and models.
- [model for the structure of lane-changing decisions, 1986] model for the structure of lane-changing decisions, A. (1986). Gipps, p.g. *Transportation Research Part B : Methodological*, 20(5) :403–414.
- [Nagel et al., 1992] Nagel, K., Schreckenberg, M., et al. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 2(12) :2221–2229.
- [Nakanishi et al., 1997] Nakanishi, K., Itoh, K., Igarashi, Y., and Bando, M. (1997). Solvable optimal velocity models and asymptotic trajectory. *Physical Review E*, 55(6) :6519.
- [Newell, 1993] Newell, G. (1993). A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part i : General theory. *Transportation Research Part B : Methodological*, 27(4) :281–287.
- [Odell et al., 2002] Odell, J., Van Dyke Parunak, H., Fleischer, M., and Brueckner, S. (2002). Modeling agents and their environment. In *Proceedings of the 3rd international conference on Agent-oriented software engineering III*, pages 16–31. Springer-Verlag.
- [Padgham and Winikoff, 2003] Padgham, L. and Winikoff, M. (2003). Prometheus : A methodology for developing intelligent agents. In *Agent-Oriented Software Engineering III*, pages 174–185. Springer.
- [Papageorgiou, 1998] Papageorgiou, M. (1998). Some remarks on macroscopic traffic flow modelling. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 32(5) :323–329.
- [Pavón et al., 2005] Pavón, J., Gómez-Sanz, J. J., and Fuentes, R. (2005). The ingenias methodology and tools. *Agent-oriented methodologies*, 9 :236–276.
- [Peeta et al., 2005] Peeta, S., Zhang, P., and Zhou, W. (2005). Behavior-based analysis of freeway car-truck interactions and related mitigation strategies. *Transportation Research Part B*, 39(5) :417–451.
- [Peeta et al., 2004] Peeta, S., Zhou, W., and Zhang, P. (2004). Modeling and mitigation of car-truck interactions on freeways. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1899(-1) :117–126.
- [Pipes, 2009] Pipes, L. (2009). An operational analysis of traffic dynamics. *Journal of applied physics*, 24(3) :274–281.
- [PLInfra, 2010] PLInfra (2010). Programme pl-infra : La gestion du trafic lié aux pl. Technical report.
- [Rakha et al., 2001] Rakha, H., Lucic, I., Demarchi, S., Setti, J., and Aerde, M. (2001). Vehicle dynamics model for predicting maximum truck acceleration levels. *Journal of transportation engineering*, 127(5) :418–425.

- [Richards, 1956] Richards, P. (1956). Shock waves on the highway. *Operations research*, pages 42–51.
- [Rothery, 1992] Rothery, R. (1992). Car following models. *Trac Flow Theory*.
- [Royce, 1970] Royce, W. W. (1970). Managing the development of large software systems. In *proceedings of IEEE WESCON*, volume 26. Los Angeles.
- [Russell et al., 1995] Russell, S., Norvig, P., Canny, J., Malik, J., and Edwards, D. (1995). *Artificial intelligence : a modern approach*, volume 74. Prentice hall Englewood Cliffs, NJ.
- [Saad, 1994] Saad, F ; Schnetzler, B. (1994). Un modèle conceptuel du comportement des conducteurs en conduite en file sur autoroute. Technical report, INRETS, Convention INRETS / DRAST.
- [Sargent, 2000] Sargent, R. (2000). Verification, validation, and accreditation : verification, validation, and accreditation of simulation models. In *Proceedings of the 32nd conference on Winter simulation*, pages 50–59. Society for Computer Simulation International.
- [Sayer, 2000] Sayer, J. R. (2000). The effect of lead-vehicle size on driver following behavior.
- [Shannon et al., 2004] Shannon, M., Miller, G., and Prewitt Jr, R. (2004). *Software Testing Techniques : Finding the Defects that Matter*. Cengage Learning.
- [Six et al., 2013] Six, L., Guessoum, Z., Saunier, J., and Ieng, S.-S. (2013). Towards a truck-driver model using a hysteresis based analysis and verification approach. In *Proceedings of the 2013 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems*, pages 1219–1220. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- [Six et al., 2012a] Six, L., Ieng, S., Saunier, J., and Guessoum, Z. (2012a). Les boucles d'hystérésis comme outil d'analyse des comportements de conducteurs. *Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents*.
- [Six et al., 2012b] Six, L., Ieng, S., Saunier, J., and Guessoum, Z. (2012b). Understanding simulated driver behavior using hysteresis loops. *13-th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems*.
- [Spanoudakis, 2009] Spanoudakis, N. (2009). *The agent systems engineering methodology (ASEME)*. PhD thesis, Paris 5.
- [Tattegrain-Veste et al., 1996] Tattegrain-Veste, H., Bellet, T., Pauzié, A., and Chapon, A. (1996). Computational driver model in transport engineering : Cosmodrive. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1550(-1) :1–7.
- [Thiemann et al., 2008] Thiemann, C., Treiber, M., and Kesting, A. (2008). Estimating acceleration and lane-changing dynamics from next generation simulation trajectory data. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2088(-1) :90–101.

- [Toledo, 2003] Toledo, T. (2003). *Integrated driving behavior modeling*. PhD thesis, Massachusetts institute of technology.
- [Toledo et al., 2007] Toledo, T., Koutsopoulos, H., and Ben-Akiva, M. (2007). Integrated driving behavior modeling. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 15(2) :96–112.
- [Toledo et al., 2009] Toledo, T., Koutsopoulos, H., and Ben-Akiva, M. (2009). Estimation of an integrated driving behavior model. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 17(4) :365–380.
- [Treiber and Helbing, 1999] Treiber, M. and Helbing, D. (1999). Explanation of observed features of self-organization in traffic flow. *Arxiv preprint cond-mat/9901239*.
- [Treiber et al., 2000a] Treiber, M., Hennecke, A., and Helbing, D. (2000a). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E*, 62(2) :1805.
- [Treiber et al., 2000b] Treiber, M., Hennecke, A., and Helbing, D. (2000b). Microscopic simulation of congested traffic. In *Traffic and Granular Flow*, volume 99, pages 365–376.
- [Treiber et al., 2006] Treiber, M., Kesting, A., and Helbing, D. (2006). Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 360 :71–88.
- [Treiterer and Myers, 1974] Treiterer, J. and Myers, J. A. (1974). The hysteresis phenomenon in traffic flow. In *Transportation and Traffic Theory, Proceedings*, volume 6.
- [Treuil et al., 2008] Treuil, J., Drogoul, A., and Zucker, J. (2008). *Modélisation et simulation à base d'agents : exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques*. Dunod.
- [Turing, 1950] Turing, A. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59(236) :433–460.
- [Van Dyke Parunak et al., 1998] Van Dyke Parunak, H., Savit, R., and Riolo, R. (1998). Agent-based modeling vs. equation-based modeling : A case study and users' guide. In *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, pages 277–283. Springer.
- [Weyns and Holvoet, 2004] Weyns, D. and Holvoet, T. (2004). A formal model for situated multi-agent systems. *Fundamenta Informaticae*, 63(2-3) :125–158.
- [Weyns et al., 2004] Weyns, D., Steegmans, E., and Holvoet, T. (2004). Towards active perception in situated multi-agent systems. *Applied Artificial Intelligence*, 18(9) :867–883.
- [Wood and Arnold, 1997] Wood, R. and Arnold, J. (1997). An automata based simulation of co-operative decision making. *Application of AI in Engineering*, pages 105–109.
- [Wu et al., 2000] Wu, J., Brackstone, M., and McDonald, M. (2000). Fuzzy sets and systems for a motorway microscopic simulation model. *Fuzzy sets and systems*, 116(1) :65–76.

- [Yu, 1995] Yu, E. S.-K. (1995). *Modelling strategic relationships for process reengineering*. PhD thesis, University of Toronto.
- [Zambonelli et al., 2001] Zambonelli, F., Jennings, N. R., and Wooldridge, M. (2001). Organisational abstractions for the analysis and design of multi-agent systems. In *Agent-Oriented Software Engineering*, pages 235–251. Springer.
- [Zhang, 1999] Zhang, H. (1999). A mathematical theory of traffic hysteresis. *Transportation Research Part B : Methodological*, 33(1) :1–23.