



HAL
open science

Etude et prévisions spatio-temporelles des systèmes urbains de transport : application au trafic urbain de Bamako

Youssef Kone

► **To cite this version:**

Youssef Kone. Etude et prévisions spatio-temporelles des systèmes urbains de transport : application au trafic urbain de Bamako. Modélisation et simulation. Université Clermont Auvergne; Université du Mali, 2021. Français. NNT : 2021UCFAC011 . tel-03563886

HAL Id: tel-03563886

<https://theses.hal.science/tel-03563886v1>

Submitted on 10 Feb 2022

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

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

N° d'ordre : D. U :
EDSPIC :



UNIVERSITE CLERMONT AUVERGNE
ECOLE DOCTORALE SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE CLERMONT-FERRAND
&
UNIVERSITE DES SCIENCES, TECHNIQUES ET TECHNOLOGIES DE BAMAKO

T h è s e

Présentée par

Youssef KONE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITÉ

SPECIALITE : Informatique

Titre de la thèse :

**Etude et prévisions spatio-temporelles des systèmes
urbains de transport :**
Application au trafic urbain de Bamako

Soutenue publiquement le 12 Février 2021

Membres du jury

| | | |
|------------------------|--|--------------------------|
| M. Ouaténi DIALLO | Professeur, Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako | Co-Directeur de thèse |
| Mme Claudia FRYDMAN | Professeur, Université Aix-Marseille | Rapporteur |
| M. David HILL | Professeur, Université Clermont Auvergne | Président |
| Mme Jacqueline KONATE | Maître de Conférences, Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako | Examineur |
| M. Oumar MAÏGA | Maître Assistant, Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako | Examineur |
| M. Mamadou Kaba TRAORE | Professeur, Université de Bordeaux | Directeur de thèse |
| M. Gregory ZACHAREWICZ | Professeur, Institut Mines-Télécom Alès | Rapporteur |

*À la mémoire de mon père Feu Adama KONE
pour avoir œuvré toute sa vie pour ma réussite.
Que ton âme repose en Paix. Amen !*

Résumé

Notre travail de thèse porte sur la proposition d'un cadre de modélisation et simulation (M&S) des systèmes de transport urbain. Un système de transport urbain est un système complexe généralement constitué de plusieurs sous-systèmes autonomes et dont le fonctionnement peut s'exprimer à travers plusieurs niveaux d'abstraction. L'étude d'un tel système nécessite l'usage de la M&S pour une meilleure appréhension de cette complexité.

Nous adoptons, dans la M&S des systèmes de transport urbain, l'approche de modélisation multi-perspective et de simulation holistique (Multi-Perspective Modeling and Holistic Simulation, MPM&HS) afin de mieux prendre en compte les différents niveaux d'abstraction dans ces systèmes. L'approche MPM&HS, qui a été définie dans des travaux récents, est une démarche méthodologique d'analyse des systèmes complexes qui consiste à construire des modèles distincts selon différentes perspectives d'un système complexe et à les intégrer ensemble pour une meilleure compréhension de sa complexité. Elle a été mise en œuvre dans le cas des systèmes de santé et a donné des résultats prometteurs.

L'application de l'approche MPM&HS permet de structurer notre cadre de M&S basé sur une ontologie du domaine des systèmes de transport urbain qui capitalise sur les modèles conventionnels existants dans ce domaine. Nous utilisons le formalisme SES/MB (System Entity Structure/Model Base) pour spécifier cette ontologie, et le formalisme HiLLS (High Level Language for System Specification) pour spécifier les modèles conventionnels. SES/MB est un formalisme d'ontologie connu et bien établi, qui a été créé dans le cadre de la théorie DEVS (Discrete Event System Specification). HiLLS, lui, est un formalisme visuel créé pour simplifier la spécification des modèles de simulation DEVS et permet ainsi de faciliter l'échange avec les experts du domaine des systèmes de transport urbain lors de la spécification des modèles de simulation.

Nous proposons dans la dernière partie du travail une mise en œuvre de notre cadre sur une étude de cas de trafic urbain dans un secteur localisé de la ville de Bamako, au Mali.

Mots clés : Systèmes de transport urbain, Trafic urbain, Théorie du trafic routier, Systèmes complexes, Ontologie, Modélisation et Simulation, Discrete Event System Specification (DEVS), System Entity Structure/Model Base (SES/MB), High Level Language for System Specification (HiLLS), Multi-Perspective Modeling & Holistic Simulation (MPM&HS).

Abstract

Our thesis work focuses on the proposal of a modeling and simulation (M&S) framework for urban transportation systems. A transportation system is a complex system generally made up of several autonomous subsystems, which behavior can be expressed through several levels of abstraction. The study of such a system requires the use of M&S for a better understanding of its complexity.

We adopt the Multi-Perspective Modeling and Holistic Simulation (MPM&HS) approach to M&S of urban transportation systems, in order to better take into account all required levels of abstraction. The MPM&HS approach, which has been introduced in recent research works, is a complex systems analysis methodology that consists in building distinct models of the same system from various relevant perspectives and then integrating them together for a better understanding of the system's complexity. It has successfully applied to healthcare systems and has shown promising results.

Our MPM&HS-structured M&S framework is based on an ontology of the domain of urban transport systems, which capitalize on existing conventional models. We use the SES/MB (System Entity Structure/Model Base) formalism to specify this ontology, and the HiLLS (High Level Language for System Specification) formalism to specify the conventional models. While SES/MB is a well-established ontological formalism that has been defined within the DEVS (Discrete Event System Specification) theory, HiLLS is a visual formalism that has been created to simplify the specification of DEVS simulation models and, which thus facilitates discussion with experts in the domain of urban transportation systems when specifying simulation models.

In the last part of the work, we propose a complete application of our framework on a case study of urban traffic M&S within a localized area of the city of Bamako, in Mali.

Keywords: Urban transportation systems, Urban traffic, Road traffic theory, Complex systems, Ontology, Modeling and Simulation, Discrete Event System Specification (DEVS), System Entity Structure/Model Base (SES/MB), High Level Language for System Specification (HiLLS), Multi-Perspective Modeling & Holistic Simulation (MPM&HS).

Remerciements

Les résultats de ces travaux de recherche, réalisés pendant mes années de thèse, sont le fruit d'une thèse en cotutelle entre l'Université Clermont Auvergne et l'Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako. Ce travail de recherche doctorale a été financé par le Service d'Action Culturelle (SCAC) de l'Ambassade de la France au Mali en collaboration avec le gouvernement malien.

Je tiens donc à remercier l'Ambassade de la France au Mali pour le financement de mes séjours scientifiques en France.

Je remercie particulièrement mon directeur de thèse Professeur Mamadou Kaba TRAORE et mon co-directeur de thèse Professeur Ouaténi DIALLO pour la confiance qu'ils m'ont accordée et pour leur investissement dans la réalisation de ce travail.

J'adresse toute ma gratitude à Mamadou Kaba TRAORE pour toutes les idées sans lesquelles mes travaux n'auraient pu aboutir, pour les relectures méticuleuses de ce manuscrit et les corrections proposées. Il m'a fait profiter de sa grande culture informatique et j'ai beaucoup appris à ses côtés. Pour tout cela, je lui exprime mes plus vifs remerciements.

Je témoigne aussi ma profonde reconnaissance à Ouaténi DIALLO pour avoir guidé mes premiers pas dans le monde de la recherche et prodigué de précieux conseils qui m'ont fait progresser. Je le remercie du fond du cœur pour sa disponibilité, sa patience et pour m'avoir constamment rassuré et encouragé.

Je remercie les membres de mon jury de soutenance qui m'ont honoré par leur présence et pour le temps qu'ils ont passé à lire mon manuscrit.

Je tiens à remercier Madame Claudia FRYDMAN, Professeur à l'Université Aix-Marseille et Monsieur Gregory ZACHAREWICZ, Professeur à l'Institut Mines-Télécom Alès pour avoir rapporté ma thèse et pour les remarques pertinentes qu'ils m'ont faites.

Je remercie également Monsieur David HILL, Professeur à l'Université Clermont Auvergne pour avoir assuré le rôle de président de jury ainsi que Madame Jacqueline KONATE, Maître de Conférences à l'Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako et Monsieur Oumar MAÏGA, Maître Assistant à l'Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako pour avoir accepté d'apprécier ce travail en tant que examinateurs.

Mes remerciements vont également à Farouk TOUMANI et tous les membres du LIMOS pour avoir facilité mes conditions de travail et pour leur convivialité.

Je remercie également tous mes collègues de l'Ecole Normale Supérieure (ENSup) de Bamako, de la Faculté des Sciences et Technique (Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako, Mali) et du Département de Génie Informatique (Université de Ségou, Mali) sur lesquels j'ai toujours pu compter. Merci pour les conseils avisés qu'ils m'ont dispensé et toutes leurs remarques scientifiques et culturelles souvent constructives.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis pour leur soutien moral indéfectible. Je tiens à remercier spécialement ma mère Dioba MARIKO dont le soutien constant et les encouragements ont été une source de motivation.

Table des matières

| | |
|--|-------------|
| Résumé | ii |
| Abstract | iii |
| Remerciements | iv |
| Liste des figures | viii |
| Liste des tableaux | x |
| Abréviations et Acronymes | xi |
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre 1. Modélisation et simulation des systèmes de transport urbain | 5 |
| 1.1 Introduction | 5 |
| 1.2 Offre de transport..... | 6 |
| 1.3 Demande de transport..... | 6 |
| 1.4 Modélisation des systèmes de transport urbain | 6 |
| 1.4.1 Approche de modélisation macroscopique..... | 6 |
| 1.4.1.1 Modèle de premier ordre..... | 8 |
| 1.4.1.2 Modèles de second ordre ou d'ordre supérieur..... | 8 |
| 1.4.1.3 Outils de simulation macroscopiques | 9 |
| 1.4.2 Approche de modélisation microscopique | 9 |
| 1.4.2.1 Modèles de poursuite (lois de poursuite) | 11 |
| 1.4.2.2 Modèles de changement de voie | 15 |
| 1.4.2.3 Outils de simulation microscopique..... | 16 |
| 1.4.3 Approche de modélisation mésoscopique | 17 |
| 1.4.3.1 Modèles basés sur la cinétique des gaz..... | 17 |
| 1.4.3.2 Modèles basés sur l'utilisation des pelotons de véhicules | 19 |
| 1.4.3.3 Outils de simulation mésoscopiques | 20 |
| 1.4.4 Approches de modélisation hybride du trafic..... | 21 |
| 1.4.5 Modèles de trafic par automates cellulaires | 23 |
| 1.5 Conclusion | 24 |
| Chapitre 2. Formalismes et méthodes utilisés dans le cadre du travail | 25 |
| 2.1 Introduction | 25 |
| 2.2 DEVS..... | 25 |
| 2.2.1 DEVS Classique..... | 25 |
| 2.2.2 DEVS Parallèle | 27 |
| 2.2.3 DEVS Paramétrique | 27 |
| 2.3 Formalisme HiLLS | 29 |
| 2.4 Approche SES/MB | 31 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 2.4.1 | SES | 31 |
| 2.4.2 | MB..... | 32 |
| 2.4.3 | Pruning | 32 |
| 2.5 | Approche MPM&HS | 33 |
| 2.5.1 | Ontologie générique | 33 |
| 2.5.2 | Processus de mise en œuvre de MPM&HS..... | 35 |
| 2.5.3 | Intégration des perspectives | 36 |
| 2.6 | Conclusion | 36 |
| Chapitre 3. Construction de l'ontologie de M&S des STU | | 37 |
| 3.1 | Introduction | 37 |
| 3.2 | Analyse du domaine | 38 |
| 3.2.1 | Niveau système | 38 |
| 3.2.2 | Niveau perspective | 39 |
| 3.2.3 | Niveau échelle | 39 |
| 3.2.4 | Niveau modèle..... | 40 |
| 3.3 | Spécification de fiche de véhicule | 42 |
| 3.4 | Spécification des modèles conventionnels | 43 |
| 3.4.1 | Modèle de Chandler | 43 |
| 3.4.2 | Modèle de Gipps | 44 |
| 3.4.3 | Modèle OVM | 45 |
| 3.4.4 | Modèle IDM..... | 46 |
| 3.5 | Spécification des modèles non conventionnels | 47 |
| 3.5.1 | Route microscopique..... | 47 |
| 3.5.2 | Feu tricolore | 49 |
| 3.5.3 | Générateur microscopique de véhicules..... | 50 |
| 3.5.4 | Accumulateur microscopique de véhicules..... | 51 |
| 3.6 | Conclusion | 51 |
| Chapitre 4. Implémentation et mise en œuvre du cadre de M&S des STU | | 53 |
| 4.1 | Introduction | 53 |
| 4.2 | Environnement de Simulation Anylogic | 53 |
| 4.2.1 | Modélisation basée sur les agents | 53 |
| 4.2.2 | Modélisation à évènement discret..... | 55 |
| 4.2.3 | Modélisation de la dynamique de système..... | 55 |
| 4.3 | Implémentation Anylogic des modèles HiLLS | 55 |
| 4.3.1 | Fiche d'information..... | 58 |
| 4.3.2 | Modèles conventionnels | 59 |
| 4.3.2.1 | Modèle de Chandler | 59 |

| | | |
|----------------------------------|---|-----------|
| 4.3.2.2 | Modèle de Gipps | 61 |
| 4.3.2.3 | Modèle OVM | 61 |
| 4.3.2.4 | Modèle IDM..... | 62 |
| 4.3.3 | Modèles non conventionnels | 62 |
| 4.4 | Mise en œuvre du cadre de M&S des STU | 62 |
| 4.4.1 | Contexte de l'étude..... | 63 |
| 4.4.2 | Périmètre de l'étude | 64 |
| 4.4.3 | Taille de l'ontologie | 65 |
| 4.4.3.1 | Modèle macroscopique fonctionnel de production..... | 68 |
| 4.4.3.2 | Modèle d'animation | 72 |
| 4.4.4 | Simulation holistique..... | 73 |
| 4.4.5 | Exécution et animation de la simulation | 75 |
| 4.5 | Conclusion | 78 |
| Conclusion générale | | 79 |
| Bibliographie..... | | 81 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1: Représentation macroscopique d'une route à 3 voies..... | 7 |
| Figure 2: Diagramme fondamental de (Greenshields et al., 1935) débit-concentration. | 8 |
| Figure 3: Représentation des variables microscopiques | 10 |
| Figure 4: Représentation microscopique d'une route à 3 voies | 10 |
| Figure 5: Intention de changement de voie | 15 |
| Figure 6: Représentation de la fonction de distribution de vitesse | 18 |
| Figure 7: Représentation de la vitesse en fonction de la position dans l'espace..... | 18 |
| Figure 8: Diagramme du débit local en fonction de la concentration | 19 |
| Figure 9: Notion de peloton dans une route à 3 voies | 19 |
| Figure 10: Définition d'un modèle hybride (Bourrel & Lesort, 2003) | 21 |
| Figure 11: Zone de transition macro-micro dans le modèle de (Flekkøy et al., 2000) | 22 |
| Figure 12: Position des cellules de transition (Bourrel & Lesort, 2003)..... | 22 |
| Figure 13: Schéma d'hybridation (El Hmam et al., 2008) | 22 |
| Figure 14: Transition macro-micro (El Hmam et al., 2008) | 23 |
| Figure 15: Transition micro-macro (El Hmam et al., 2008) | 23 |
| Figure 16: Modèle atomique DEVS Paramétrique | 27 |
| Figure 17: Couplage versus intégration de modèle DEVS paramétrique | 28 |
| Figure 18: Classe et Système HiLLS | 30 |
| Figure 19: Concepts de SES (Ören et al., 1985) | 31 |
| Figure 20: Relation entre SES et MB (Zeigler et al., 2000)..... | 32 |
| Figure 21: Méthodologie SES/MB (Wainer & Mosterman, 2016)..... | 33 |
| Figure 22: Approche de Modélisation Multi-Perspective | 34 |
| Figure 23: Ontologie générique pour les systèmes complexes (Traoré, 2019)..... | 34 |
| Figure 24: Processus de construction du modèle d'un système complexe (Traoré, 2019) | 35 |
| Figure 25: Principe général de l'approche MPM&HS (Traoré, 2019)..... | 36 |
| Figure 26: Démarche de construction d'un cadre de M&S des STU | 37 |
| Figure 27: Niveau système de l'ontologie pour la M&S des STU | 38 |
| Figure 28: Niveaux Système et Perspective de l'ontologie pour la M&S des STU..... | 39 |
| Figure 29: Niveaux Système, Perspective et Echelle de l'ontologie pour la M&S des STU ... | 40 |
| Figure 30: Ontologie pour la M&S des STU | 41 |
| Figure 31: Aperçu des informations d'une fiche de voiture..... | 42 |
| Figure 32: Spécification d'une fiche d'information | 42 |
| Figure 33: Spécification HiLLS du modèle de Chandler | 43 |
| Figure 34: Spécification HiLLS du modèle de Gipps | 45 |
| Figure 35: Spécification HiLLS du modèle de OVM | 46 |
| Figure 36: Spécification HiLLS du modèle de IDM..... | 47 |
| Figure 37: Spécification HiLLS d'une route microscopique | 48 |
| Figure 38: Spécification HiLLS du feu tricolore | 49 |
| Figure 39: Spécification HiLLS d'un générateur microscopique de véhicules | 50 |
| Figure 40: Spécification HiLLS d'un accumulateur microscopique de véhicules..... | 51 |
| Figure 41: Eléments de création d'un modèle à base d'agents (Borschchev, 2013)..... | 54 |
| Figure 42: Représentation d'une fiche d'information dans Anylogic | 58 |
| Figure 43: Exemple de diagramme statechart du comportement d'un agent véhicule | 59 |
| Figure 44: Diagramme statechart du modèle de Chandler | 60 |
| Figure 45: Définition du corps de la fonction computeAcceleration | 60 |
| Figure 46: Diagramme statechart du modèle de Gipps | 61 |

| | |
|---|----|
| Figure 47: Définition du corps de la fonction computeSpeed..... | 61 |
| Figure 48: Diagramme statechart du modèle OVM | 61 |
| Figure 49: Diagramme statechart du modèle IDM..... | 62 |
| Figure 50: Carte de délimitation de la ville de Bamako..... | 63 |
| Figure 51: Périmètre d'étude..... | 64 |
| Figure 52: Choix de la catégorie de STU à étudier | 65 |
| Figure 53: Choix des perspectives mises en œuvre..... | 65 |
| Figure 54: Choix des échelles spatio-temporelles | 66 |
| Figure 55: Taille (pruning) de l'ontologie..... | 67 |
| Figure 56: Résultat de la taille d'ontologie | 68 |
| Figure 57: Entrées et sorties du périmètre de l'étude de cas | 69 |
| Figure 58: Parcours véhicules dans le système | 70 |
| Figure 59: Modèle macroscopique fonctionnel de production (logique du réseau urbain)..... | 72 |
| Figure 60: Réseau routier passant à côté de la cité administrative de Bamako..... | 73 |
| Figure 61: Intégration holistique des perspectives de l'étude de cas | 74 |
| Figure 62: Intégration holistique des perspectives de l'étude de cas | 75 |
| Figure 63: Aperçu de la simulation en 2D de l'étude de cas..... | 75 |
| Figure 64: Quelques scénarios de congestion selon le réglage du feu tricolore..... | 76 |
| Figure 65: Aperçu de la simulation en 3D de l'étude de cas..... | 76 |
| Figure 66: Aperçu de la distribution dynamique de densité de flux de l'étude de cas..... | 77 |
| Figure 67: Aperçu de la vue d'un usager dans l'étude de cas | 77 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1: Paramètres de validation du modèle de Chandler (May, 1990) | 12 |
| Tableau 2: Paramètres de validation du modèle de Gipps (Gipps, 1981) | 13 |
| Tableau 3: Paramètres de validation du modèle IDM (Treiber et al., 2000)..... | 14 |
| Tableau 4: Critères de choix..... | 15 |
| Tableau 5 : Comparaison entre les modèles macroscopiques, microscopiques et mésoscopiques..... | 20 |
| Tableau 6 : Synthèse des logiciels de simulation | 21 |
| Tableau 7: Correspondance entre les concepts HiLLS et Anylogic..... | 58 |

Abréviations et Acronymes

DEVS : Discrete Event System Specification

EF : Experimental Frame

ENSup : Ecole Normale Supérieure

HiLLS : High Level Language for System Specification

IDM : Intelligent Driver Model

LIMOS : Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes

MPM&HS : Multi-Perspective Modeling and Holistic Simulation

M&S : Modélisation et Simulation

OVM : Optimal Velocity Model

PL : Poids Lourd

SES/MB : System Entity Structure/Model Base

STU : Système de Transport Urbain

TC : Transport Collectif

TGV : Train à Grande Vitesse

UML : Unified Modeling Language

USTTB : Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako

VP : Voiture Particulière

Introduction générale

Contexte de la recherche

Notre travail se situe dans le cadre de la proposition d'une plateforme de modélisation et de simulation pour **l'étude et les prévisions spatio-temporelles des systèmes de transport urbain**.

Un système de transport urbain (STU) représente une composante essentielle pour toutes les activités urbaines (économie, éducation, santé des populations, développement durable, ...). Les STU sont confrontés à plusieurs défis majeurs (Cohen, 1993). Parmi ces défis nous pouvons citer :

- ✓ la croissance continue des besoins en mobilité due à l'augmentation de la population urbaine;
- ✓ l'insuffisance des infrastructures de transport liée au manque de prévisions d'évolution adéquate et aux coûts très élevés des travaux de construction de nouvelles infrastructures;
- ✓ l'augmentation permanente des encombrements qui génère des congestions;
- ✓ la nécessité d'une plus grande sécurité due à l'augmentation des taux d'accidents;
- ✓ la pollution de l'environnement liée aux rejets des gaz toxiques dans l'air;
- ✓ les difficultés à effectuer directement des mesures en temps réel;
- ✓ la prise en compte de l'évolution technologique;
- ✓ la gestion des espaces de stationnement qui permet une meilleure utilisation des espaces publics;
- ✓ l'optimisation du coût d'exploitation des infrastructures de transport;
- ✓ la rentabilité des transports en commun;
- ✓ la mise en œuvre de la multi-modalité et de l'intermodalité qui consiste à utiliser des trajets concourants ou la complémentarité de différents moyens de transport;
- ✓ la production d'information aux voyageurs;

Pour faire face à ces multiples défis, les gestionnaires en charge des systèmes de transport urbain doivent mettre en place un ensemble d'actions afin de rendre le flux de trafic plus sûr, fluide et confortable pour faciliter la mobilité d'un plus grand nombre d'utilisateurs (des personnes, des biens et des marchandises). Ceci nécessite donc une gestion harmonieuse et proactive dans l'optimisation des infrastructures de transport existantes, mais aussi l'évaluation des projets d'implantation de nouvelles infrastructures.

C'est dans ce contexte que nous nous proposons de réaliser, à travers le formalisme visuel HiLLS (High Level Language for System Specification) un cadre de modélisation et simulation (M&S) informatique des STU. Le choix du formalisme HiLLS n'est pas fortuit car il nous apporte plus de facilité dans la spécification des modèles de simulation selon le paradigme DEVS (Discrete Event System Specification). Ceci ouvre la voie à une compréhension fine (à l'échelle microscopique ou mésoscopique) ou une compréhension globale (à l'échelle macroscopique) de tels systèmes et à des prédictions de qualité sur leur comportement dans le temps.

La M&S constitue une aide précieuse pour reproduire le comportement partiel ou global des systèmes de transport urbain. L'étude de ces systèmes nécessite la prise en compte de plusieurs niveaux d'explication, en raison de leur complexité :

- ✓ la dynamique de circulation;
- ✓ la dynamique des usagers (piétons, conducteurs, ...);
- ✓ la dynamique de l'environnement (feux de régulation, météo, ...);
- ✓ etc.

Ces niveaux d'explication correspondent à des perspectives dont les échelles spatio-temporelles diffèrent très souvent en fonction du phénomène à exprimer.

Question de recherche

Pour mieux prendre en compte les différents niveaux d'explication cités précédemment, nous nous proposons de répondre à la question de recherche ci-dessous dans une approche globale : *Comment concilier différentes perspectives (donc différents niveaux d'abstraction) du système de transport urbain dans une démarche de modélisation et simulation holistique ?*

Objectif et intérêt de la recherche

Le travail de thèse proposé vise à construire un cadre de modélisation et de simulation holistique pour l'étude des systèmes de transport urbain. Pour la mise en œuvre de ce cadre, nous avons décidé d'appliquer l'approche MPM&HS (Djitog et al., 2017), (Djitog et al., 2018), (Traoré et al., 2018), (Traoré, 2019) et de spécifier les modèles conventionnels dans le formalisme HiLLS (Maïga, 2015), (Aliyu et al., 2016). La plateforme de M&S doit être facilement utilisable par les experts en charge des STU et doit leur permettre de mieux concevoir, améliorer ou étendre leurs réseaux de transport urbain. L'originalité de ce travail par rapport à l'existant est la mise en place d'une approche de modélisation multi-perspective et de simulation holistique pour mieux prendre en compte d'une part, le lien entre la structure et le comportement émergent des composants de ces systèmes, et d'autre part de permettre l'interaction entre plusieurs perspectives du même système pour une meilleure compréhension afin de mieux étudier l'évaluation des impacts socio-économiques dus aux embouteillages, à la pollution, aux bruits et aux accidents.

Notre cadre de modélisation et de simulation holistique doit permettre la simplification des études sur les STU en réduisant les coûts d'expérimentation réels et en facilitant l'observation des phénomènes du trafic urbain très connus comme : la fluidité, la congestion, le ralentissement, ...

Démarche adoptée

Dans ce travail, nous nous appuyons sur l'approche MPM&HS. Cette approche décrit l'étude d'un système complexe en plusieurs phases.

Nous commençons par une première phase de modélisation multi-perspective MPM (Multi-Perspective Modeling) qui nous conduit à la construction d'une ontologie pour la modélisation et simulation des STU. L'ontologie générique proposée par l'approche MPM&HS et l'analyse des connaissances du domaine des STU constituent le point de départ de notre travail de construction d'une ontologie spécifique. Nous construisons cette ontologie spécifique comme le résultat de l'analyse des connaissances du domaine des STU et qui s'appuie sur les modèles conventionnels existants de la théorie du trafic. Cette ontologie peut facilement évoluer en incluant de nouveaux modèles conventionnels qui seront obtenus dans les recherches futures de la théorie du trafic.

L'ontologie spécifique construite dans la première phase fait apparaître les différents modèles conventionnels et nous conduit vers la seconde phase qui consiste à spécifier les différents modèles conventionnels dans le formalisme HiLLS. L'utilisation de HiLLS nous permet à travers sa représentation visuelle une meilleure communication avec les gestionnaires des systèmes de transport urbain.

Dans la troisième phase, les modèles conventionnels spécifiés sont à leur tour implémentés dans une librairie de modèles de simulation.

La phase de synthèse qui représente la quatrième phase de l'approche adoptée, permet de construire un modèle particulier de STU sous étude, en vue de sa simulation. Cette démarche consiste à tailler (pruning) l'ontologie pour obtenir la structure arborescente du modèle à bâtir. Les feuilles (branches terminales) de l'arbre ainsi obtenu sont les modèles conventionnels déjà définis dans les différentes perspectives mise en évidence dans l'ontologie (ou de nouveaux modèles de base à spécifier).

La dernière phase, celle de l'intégration, permet de mettre en œuvre la simulation holistique en intégrant dans un seul modèle de simulation global les modèles feuilles sélectionnés dans la phase précédente.

Organisation de la thèse

Le présent document est organisé en 4 chapitres :

- ✓ Le chapitre 1 est consacré à la description des modèles conventionnels de la théorie du trafic routier et de brèves descriptions de quelques outils logiciels de simulation.
- ✓ Le chapitre 2 est consacré à la présentation des formalismes et des méthodes utilisés dans le cadre de notre travail.
- ✓ Le chapitre 3 présente les différentes étapes de la construction de l'ontologie spécifique à la M&S des STU, et donne la spécification en HiLLS des modèles conventionnels mis en évidence.
- ✓ Le chapitre 4 décrit l'implémentation des différents modèles spécifiés dans le chapitre précédent, et montre la mise en œuvre du cadre de M&S ainsi érigé sur un cas d'étude.

Une conclusion générale récapitule l'ensemble des efforts fournis, discute des résultats de ce travail, de ses apports et de ses limites, et évoque les perspectives de recherche futures.

Publications

Publiés :

- ✓ Koné Y., Maïga O., Traoré K. M. (2020). Application of Multi-Perspective Modeling and Holistic Simulation to Urban Transportation Systems. *Proceedings of the 32nd European Modeling & Simulation Symposium (EMSS 2020)*, pp. 93-102. DOI: <https://doi.org/10.46354/i3m.2020.emss.013>
- ✓ Koné, Y., Maïga, O., Traoré, M. K. (2020). Using HiLLS as a Common Concrete Syntax for SES and DEVS: Application to Microscopic Simulation of Traffic. *SummerSim '20: Proceedings of the 2020 Summer Simulation Conference, July 2020, Article No 29, pages 1–11.*

En cours de soumission :

- ✓ Koné, Y., Maïga, O., Traoré, M. K. (2020). Study and Spatio-Temporal Predictions of Urban Transportation Systems. Submitted to "*Simulation and Process Modelling in Industry and Logistics: New Advances in Theory, Methods and Applications*" special issue of the *International Journal of Simulation and Process Modelling*.

Chapitre 1. Modélisation et simulation des systèmes de transport urbain

1.1 Introduction

L'accroissement continu des besoins de transport dû à la croissance rapide de la population urbaine (Bonnafous & Puel, 1983) et l'évolution de l'industrie automobile ont donné naissance à l'élaboration des modèles de la théorie du trafic. Ces modèles permettent de décrire, d'expliquer ou de prévoir le comportement individuel ou global de l'ensemble des véhicules du système de transport.

Un système de transport est un système complexe caractérisé par un ensemble d'éléments en interaction (Cascetta, 2009). Il est constitué de véhicules (moyens de mobilités), d'infrastructures de transport (réseaux routiers, ferroviaires, ...), de techniques d'exploitation, d'entreprises de transport et de règlements qui les régissent. Les objectifs d'un système de transport urbain sont de :

- ✓ faciliter la mobilité de la population ;
- ✓ minimiser les coûts de transport lors des déplacements ;
- ✓ réduire les durées des trajets ;
- ✓ assurer une bonne qualité des services de transport.

Dans les travaux de (Bonnafous, 1996), l'auteur exprime qu'un système de transport urbain est un système de transport qui concourt à une plus grande mobilité des flux de biens et de personnes d'une ville.

Généralement un système de transport est caractérisé par plusieurs modes d'accessibilité :

- ✓ L'accessibilité monomodale : c'est l'utilisation d'un seul mode de transport pour accomplir un déplacement.
- ✓ L'accessibilité intermodale : c'est la combinaison de plusieurs modes de transport pour effectuer un déplacement.
- ✓ L'accessibilité multimodale : c'est l'utilisation parallèle de plusieurs modes de transport pour se déplacer.

Pour effectuer un déplacement, les usagers d'un système de transport peuvent utiliser différents modes de transport. Parmi ces modes transport nous avons :

- ✓ les transports collectifs (TC) : bus, taxis, minibus, etc.,
- ✓ les transports individuels : voitures particulières (VP), les motos, les vélos, etc.,
- ✓ les transports des biens et des marchandises,
- ✓ les transports ferroviaires : trains, TGV, etc.,
- ✓ les transports fluviaux : pirogues, bateaux, etc.,
- ✓ les transports aériens.

L'analyse des systèmes de transport urbain permet de caractériser deux aspects essentiels qui sont l'offre et la demande de transport (Banos & Thévenin, 2010). La qualité d'un bon

système de transport dépend de l'équilibre entre l'offre et la demande de transport qui sont interdépendantes.

1.2 Offre de transport

Selon l'ingénierie du trafic (Buisson & Lesort , 2010), l'offre de transport correspond aux possibilités d'écoulement des infrastructures de transport et elle est dépendante de l'échelle de représentation. Sur l'ensemble du réseau de transport, l'offre représente les flux de trafic qu'il peut globalement écouler, et à un point particulier du réseau, l'offre représente le flux de trafic qui peut s'écouler en ce point. L'offre de transport, selon (Burghout, 2005), correspond au réseau de transport (les routes, les intersections, les panneaux de signalisation, les feux tricolores, ...).

1.3 Demande de transport

La demande de transport représente la quantité de trafic qui cherche à s'écouler sur une infrastructure de transport et qui doit s'écouler s'il n'y a pas de contraintes (Buisson & Lesort , 2010). Lorsque la demande de transport est aussi dépendante de l'échelle de représentation, on parle de demande de déplacements. A l'échelle du réseau de transport, la demande de déplacements est la demande globale de déplacements qui souhaite utiliser le réseau de transport selon les modes de transport disponibles, et à l'échelle d'un point précis sur une route, c'est l'ensemble de véhicules qui sont présents et qui cherchent à s'écouler. La demande de transport, selon (Burghout, 2005), est caractérisée par les usagers du réseau et de leurs comportements.

1.4 Modélisation des systèmes de transport urbain

La modélisation des systèmes de transport vise à construire une représentation simplifiée des phénomènes liés à l'offre et à la demande de transport. L'utilisation de l'offre de transport par la demande de transport génère le trafic (les conditions de déplacements). Plusieurs travaux ont été réalisés dans la littérature sur la modélisation du trafic. Dans la théorie du trafic, trois grandes approches de modélisation ont été initialement définies : l'approche macroscopique, l'approche microscopique et l'approche mésoscopique (Hoogendoorn & Bovy, 2001), (Barceló, 2010).

1.4.1 Approche de modélisation macroscopique

L'approche macroscopique décrit un haut niveau d'agrégation (vision globale) des phénomènes du trafic. Les modèles macroscopiques sont utilisés pour des opérations de planification et de contrôle sur des grands réseaux et sur de longues périodes de temps. Les

véhicules sont considérés dans leur ensemble comme un flux unidirectionnel (par analogie à la mécanique des fluides) qui s'écoule de façon continue. Le flux de véhicules est caractérisé par trois variables macroscopiques qui décrivent la dynamique du trafic : le débit, la concentration et la vitesse moyenne des véhicules (Gazis, 2002).

- ✓ Le débit représente la répartition des véhicules dans le temps en un point de la route. On note le débit par Q , qui correspond au nombre de véhicules passant en un point d'une section de route pendant une période de temps. Il est exprimé en nombre de véhicules par unité de temps (veh/h ou veh/s). Il s'obtient par la formule suivante :

$$Q = \frac{\text{Nombre de véhicules passant en un point d'une section de route}}{\text{Durée de la période de temps}}$$

- ✓ La densité ou la concentration représente la répartition des véhicules dans l'espace à un instant donné. On note la concentration par K , qui correspond au nombre de véhicules présents dans une section de route à un temps t . Elle est exprimée en nombre de véhicules par unité de distance (veh/km ou veh/m). Elle s'obtient par la formule suivante :

$$K = \frac{\text{Nombre de véhicules dans la section de route}}{\text{Longueur de la section}}$$

- ✓ La vitesse du flot de véhicules notée par U : est la vitesse moyenne des véhicules exprimée en km/h ou m/s.

La figure 1 résume les variables macroscopiques d'une route à 3 voies. Pour chaque voie (Lane 1, Lane 2, ou Lane 3) de la route les différentes variables macroscopiques sont déterminées :

- ✓ U_1, U_2 et U_3 pour les vitesses moyennes,
- ✓ Q_1, Q_2 et Q_3 pour les débits, et
- ✓ K_1, K_2 et K_3 pour les densités.

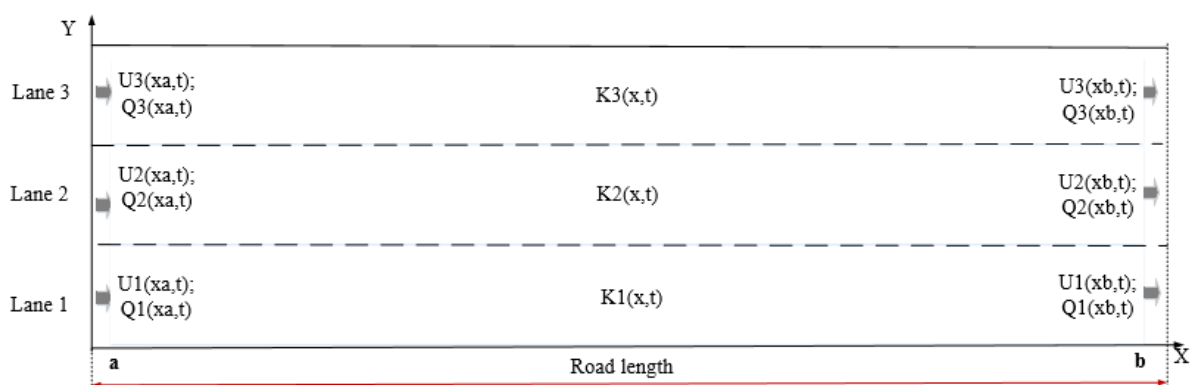


Figure 1: Représentation macroscopique d'une route à 3 voies

Il existe deux familles de modèles macroscopiques : les modèles de premier ordre et les modèles de second ordre.

1.4.1.1 Modèle de premier ordre

C'est l'un des premiers modèles macroscopiques proposé par Lighthill, Witham et Richards dénommé le modèle LWR (Lighthill & Witham, 1955), (Richards, 1956). Le modèle LWR appelé aussi modèle de premier ordre décrit le trafic dans un état d'équilibre permanent. C'est un modèle d'écoulement défini par les équations suivantes :

$$Q(x, t) = K(x, t) \times U(x, t) \quad (1)$$

$$\frac{\delta Q(x, t)}{\delta x} + \frac{\delta K(x, t)}{\delta t} = 0 \quad (2)$$

$$U(x, t) = U_e(K(x, t)) \text{ ou } Q(x, t) = Q_e(K(x, t)) \quad (3)$$

L'équation (1) décrit la relation fondamentale de la mécanique des fluides. Elle établit la relation entre le débit, la concentration et la vitesse. L'équation (2) représente le principe de la conservation des véhicules. L'équation (3) représente le diagramme fondamental illustré par la figure 2, où U_e et Q_e sont respectivement la vitesse et le débit d'équilibre du trafic. U_l est la vitesse libre du flux de trafic. L'évolution du trafic est représentée par le diagramme fondamental qui est en fonction du débit et de la concentration.

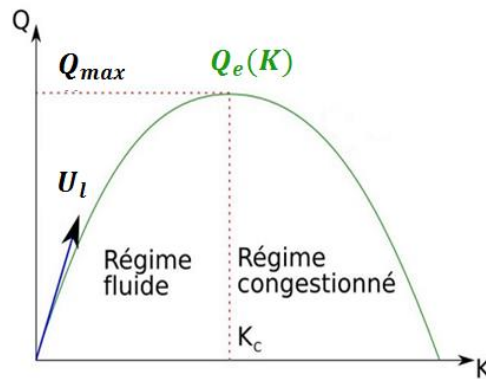


Figure 2: Diagramme fondamental de (Greenshields et al., 1935) débit-concentration.

La figure 2 fait apparaître deux régimes d'écoulement du trafic : un régime fluide et un régime congestionné. Le régime fluide exprime un état de fluidité du trafic qui est caractérisé par une augmentation du débit du flot de véhicules par rapport à la concentration (fait apparaître une croissance de la vitesse moyenne) jusqu'à atteindre un débit de saturation Q_{max} correspondant à une concentration critique K_c . Le débit de saturation signifie que la section de route a atteint sa capacité maximale. Le régime congestionné représente l'état congestionné du trafic caractérisé par la chute brusque du débit du flot de véhicules qui est liée à l'augmentation de la concentration.

1.4.1.2 Modèles de second ordre ou d'ordre supérieur

Les modèles de second ordre (appelés aussi modèles d'ordre supérieur) ont été proposés pour apporter des réponses aux insuffisances des modèles de premier ordre dues à leur principe de fonctionnement stationnaire. Plusieurs auteurs ont proposé des modèles d'ordre supérieur

caractérisés par une équation de dynamique sur la vitesse des véhicules : l'accélération est la somme des termes de relaxation et d'anticipation. Une première approche, introduite par (Payne, 1971), est représentée par l'équation suivante :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \times \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{1}{T} [u_e(k) - u] - \frac{v}{k(x, t)} \times \frac{\partial k(x, t)}{\partial x}$$

Où

T : le temps de relaxation,

v : le paramètre d'anticipation

u_e : la vitesse d'équilibre du flot de véhicules.

D'autres auteurs (Daganzo, 1995), (Aw & Rascle, 2000), (Zhang, 2002) ont proposé des modèles pour apporter des améliorations au modèle initial de (Payne, 1971).

Compte tenu de leur complexité, les modèles d'ordre supérieur sont peu utilisés et généralement mis en œuvre dans l'affectation dynamique. Certains outils de simulation sont basés sur ce modèle, comme METACOR (Haj-Salem et al., 1994).

1.4.1.3 Outils de simulation macroscopiques

Les outils logiciels de simulation macroscopique les plus connus dans la littérature sont :

- ✓ **METACOR** : l'outil METACOR (Haj-Salem et al., 1994) permet de simuler les phénomènes de flux de trafic, y compris la modélisation d'affectation de trafic au sein d'un réseau mixte (autoroutes et réseaux routiers urbains). Le modèle mathématique utilisé est capable de décrire des phénomènes de trafic complexes.
- ✓ **METANET** : l'outil METANET (Messner & Papageorgiou, 1990) permet de réaliser une simulation macroscopique réaliste d'un véritable réseau autoroutier à grande échelle. Il est basé sur un modèle de flux de trafic du second ordre. Une procédure de validation quantitative rigoureuse est appliquée aux liaisons de réseau individuelles, puis une procédure de validation qualitative heuristique est employée au niveau du réseau.

1.4.2 Approche de modélisation microscopique

Cette approche de modélisation définit la représentation la plus fine du flux de trafic. Un modèle microscopique décrit à la fois le comportement spatio-temporel des véhicules considérés individuellement et leurs interactions. C'est une modélisation caractérisée par la description individuelle de chaque véhicule (ou couple véhicule-conducteur). Les modèles microscopiques permettent de reproduire le comportement d'un véhicule et des interactions avec son environnement (les autres véhicules et l'infrastructure de transport).

Soit un véhicule i , qui est caractérisé à l'instant t sur un tronçon de route par plusieurs grandeurs (Leutzbach, 1988), (Buisson et Lesort, 2010). Parmi ces grandeurs citons :

- ✓ $x_i(t)$: est la position longitudinale dans l'espace, exprimée en km ou en m.
- ✓ $v_i(t) = \dot{x}_i(t) = \frac{dx_i(t)}{dt}$: est la vitesse instantanée, exprimée en km/h ou m/s.

- ✓ $L_i(t)$: est la longueur du véhicule, exprimée en m ou cm.
- ✓ T_i^{in} : est la date d'entrée sur un tronçon de route, exprimée en h, mn, ou s.
- ✓ T_i^{out} : est la date de sortie sur un tronçon de route, exprimée en h, mn, ou s.
- ✓ $T_{in \rightarrow out} = T_i^{out} - T_i^{in}$: est le temps de passage de l'entrée à la sortie du tronçon de route, exprimé en h, mn, ou s.
- ✓ $a_i(t) = \dot{x}_i(t) = \frac{dv_i(t)}{dt}$: est l'accélération, exprimée en km/h² ou en m/s².

Certaines grandeurs peuvent impliquer plusieurs véhicules comme :

- ✓ $\Delta x_i(t) = x_{i-1}(t) - x_i(t)$: la distance inter-véhiculaire (inter-distance) est la distance qui sépare l'avant ou l'arrière des véhicules successifs (le véhicule suiveur i et son leader $i - 1$) d'une même voie à un instant, exprimée en m ou cm.
- ✓ $s_i = \Delta x_i - L_{i-1}$: le créneau spatial est la distance qui sépare l'arrière et l'avant des véhicules successifs (les véhicules i et $i - 1$) d'une même voie.
- ✓ $\Delta v(t) = \dot{x}_{i-1}(t) - \dot{x}_i(t)$: est la vitesse relative du véhicule i par rapport à son leader $i - 1$.
- ✓ h : le temps inter-véhiculaire est le temps qui s'écoule entre les instants de passage de l'avant ou de l'arrière des véhicules successifs en un point de la route.
- ✓ Créneau temporel : est le temps qui s'écoule entre les instants de passage l'arrière d'un véhicule du passage de l'avant du véhicule suivant en point de la route.

La figure 3 résume quelques-unes des variables citées précédemment, alors que la figure 4 donne une représentation microscopique d'une route à 3 voies contenant différents types de véhicules.

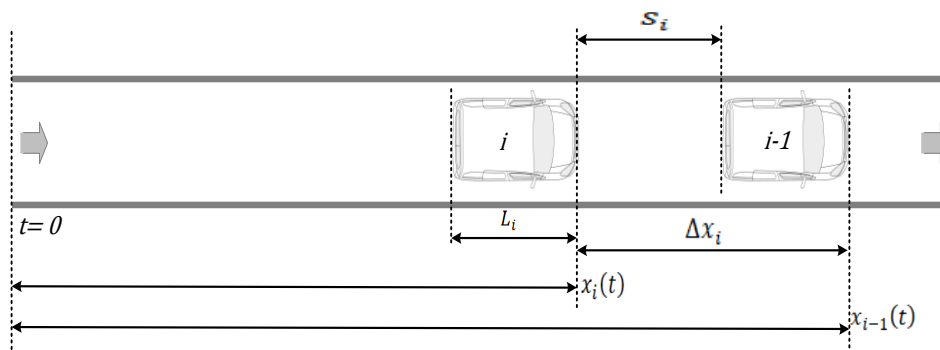


Figure 3: Représentation des variables microscopiques

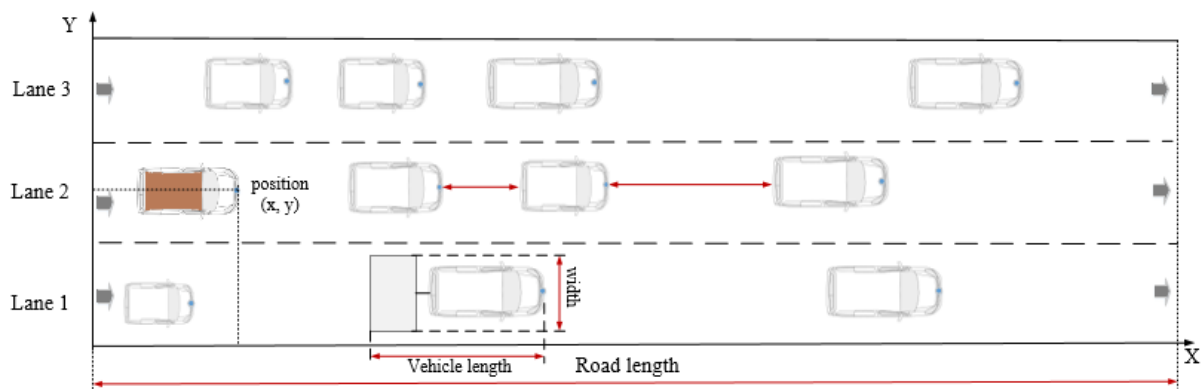


Figure 4: Représentation microscopique d'une route à 3 voies

Sur la figure 4 nous avons :

- ✓ **position(x,y)** qui correspond à la position longitudinale (par rapport à l'axe des x) et la position latérale (par rapport à l'axe des y) d'un véhicule ;
- ✓ **width** est la largeur d'un véhicule ;
- ✓ **vehicule length** est la longueur du véhicule.

Les modèles microscopiques sont utilisés le plus souvent pour reproduire le plus fidèlement possible le comportement réel des véhicules considérés individuellement. Ces modèles sont basés sur une représentation simplifiée de la tâche de conduite.

Dans la littérature, plusieurs études ont été menées dans le domaine de la modélisation microscopique. Il existe plusieurs familles de modèles microscopiques : les modèles continus basés sur les équations différentielles, les modèles discrets basés sur les automates cellulaires et les modèles basés sur les systèmes multi-agents.

Les modèles microscopiques continus décrivent la tâche de conduite qui se résume généralement en deux types de contrôles : le contrôle de l'accélération (mouvement longitudinal) et le contrôle de la direction (mouvement latéral). Le contrôle de l'accélération est pris en compte par les modèles de poursuite et celui de la direction par les lois de changement de voie.

1.4.2.1 Modèles de poursuite (lois de poursuite)

Plusieurs modèles de poursuite ont été proposés dans la littérature. Ils sont basés sur le comportement du conducteur ou du couple véhicule-conducteur, parmi lesquels nous avons :

- ✓ le modèle linéaire basé sur le principe de stimulus-réponse,
- ✓ le modèle de GHR (Gazis, Herman et Rothery) basé sur la distance inter-véhiculaire,
- ✓ les modèles basés sur le respect de la distance de sécurité et de la vitesse de sécurité,
- ✓ le modèle basé sur la vitesse optimale, et
- ✓ le modèle du conducteur intelligent (IDM).

✓ **Le modèle linéaire**

Le modèle linéaire est basé sur le principe de stimulus-réponse (Chandler et al., 1958), (Gazis et al., 1961), (Gerlough & Huber, 1975). La réponse d'un conducteur peut être soit d'accélérer ou de ralentir par rapport à l'importance du stimulus lié au comportement du véhicule de devant qu'il perçoit à un instant t et avec un temps de réaction T_r . Cette réponse est proportionnelle à l'importance du stimulus et à la sensibilité du conducteur à ce stimulus, et se résume par l'équation suivante :

$$Response(t+T_r) = Sensitivity \times Stimulus(t)$$

Dans cette équation, la réponse du conducteur correspond à l'accélération du véhicule. La sensibilité est un paramètre du modèle et elle est inversement proportionnelle à l'espacement entre le véhicule leader et le véhicule immédiatement situé derrière ce dernier (le véhicule suiveur). Le stimulus est dépendant des comportements des autres véhicules de l'environnement.

Ce modèle établit une relation linéaire entre l'accélération et la vitesse relative du véhicule. Ainsi, l'accélération d'un véhicule à la position x_i par rapport au véhicule leader (de devant) à la position x_{i-1} est donnée par :

$$\ddot{x}_i(t + T_r) = \lambda \times [\dot{x}_{i-1}(t) - \dot{x}_i(t)]$$

Où :

- ❖ λ : la sensibilité du conducteur ;
- ❖ T_r : le temps de réaction du conducteur ;
- ❖ $\ddot{x}_i(t + T_r)$: l'accélération du véhicule i ;
- ❖ $\dot{x}_{i-1}(t), \dot{x}_i(t)$: respectivement la vitesse du véhicule leader $i - 1$ et celle de son suiveur i .

Le tableau 1 résume les valeurs des paramètres utilisés pour valider le modèle de (Chandler et al., 1958).

| Valeur mesurée | Temps de réaction T_r | Sensibilité λ |
|----------------|-------------------------|-----------------------|
| Minimum | 1.0 | 0.17 |
| Moyenne | 1.55 | 0.37 |
| Maximum | 2.2 | 0.74 |

Tableau 1: Paramètres de validation du modèle de Chandler (May, 1990)

✓ Le modèle basé sur l'inter-distance

Le modèle linéaire défini précédemment ne prend pas compte la distance entre les véhicules. Donc pour apporter des améliorations sur le modèle linéaire, le modèle GHR (Gazis, Herman and Rothery) proposé dans (Gazis et al., 1959) prend en compte la distance inter-véhiculaire. Ce modèle est représenté par la relation suivante :

$$\ddot{x}_i(t + T_r) = \lambda \times (\dot{x}_{i-1}(t) - \dot{x}_i(t)) \times \frac{\dot{x}_i^m(t + T_r)}{(x_{i-1}(t) - x_i(t))^l}$$

Où :

- ❖ $\ddot{x}_i(t + T_r)$: l'accélération du véhicule i ;
- ❖ $\dot{x}_{i-1}(t), \dot{x}_i(t)$: respectivement la vitesse du véhicule leader $i - 1$ et celle de son suiveur i .
- ❖ $x_{i-1}(t) - x_i(t)$: l'espace entre les véhicules $i - 1$ et i (distance inter-véhiculaire);
- ❖ T_r : le temps de réaction du conducteur du véhicule i ;
- ❖ λ, T_r, m et l : les paramètres du modèle.

Pour $m = 0$ et $l = 0$, on obtient le modèle linéaire (Chandler et al., 1958). Plusieurs travaux ont été réalisés pour le calibrage des paramètres m , l et c , dont l'un des plus complets par (Brackstone & McDonald, 1999). Dans leurs travaux de (Jameel & Hamid, 2009), les auteurs examinent des limites du modèle GHR.

✓ Le modèle de poursuite de Gipps :

Dans (Gipps, 1981), l'auteur propose un modèle basé sur la vitesse de sécurité d'un véhicule n par rapport au véhicule leader $n - 1$. Ce modèle s'appuie sur le comportement du conducteur dans un trafic réel. Les paramètres du modèle prennent en compte les

caractéristiques observées sur les conducteurs et les véhicules. La vitesse de sécurité est liée à deux composantes dépendant du comportement du conducteur: l'accélération et la décélération du véhicule. L'équation de la vitesse est établie en prenant le minimum entre les deux composantes et s'obtient par l'équation suivante :

$$v_n(t + \tau) = \min \left\{ v_n(t) + 2.5 \times a_n \times \tau \times \left(1 - \frac{v_n(t)}{V_n}\right) \times \sqrt{0.025 + \frac{v_n(t)}{V_n}}, b_n \times \tau + \sqrt{\left(b_n^2 \times \tau^2 - b_n \times \left[2 \times [x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - v_n(t) \times \tau - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{b}}\right]\right)} \right\}$$

Où :

- ❖ a_n : l'accélération maximum du conducteur de véhicule n ;
- ❖ b_n : le plus sévère freinage (décélération) du conducteur du véhicule n ($b_n < 0$) ;
- ❖ s_n : la taille effective du véhicule n , la longueur réel du véhicule plus une marge ;
- ❖ V_n : la vitesse désirée du conducteur du véhicule n ;
- ❖ $x_n(t)$: la position de l'avant du véhicule n à l'instant t ;
- ❖ $v_n(t)$: la vitesse du véhicule n à l'instant t ;
- ❖ τ : le temps de réaction du conducteur, qui est constant pour tous les véhicules ;
- ❖ \hat{b} : l'estimation de la décélération du véhicule leader $n - 1$.

La validation du modèle de Gipps a été effectuée avec les paramètres ci-dessous (tableau 2).

| a_n | b_n | S_n | V_n | τ | \hat{b} |
|--|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------|---|
| [1.7 ; 0.3 ²] m/s ² | $-2.0 \times a_n$ | [6.5 ; 0.3 ²] m | [20.0 ; 3.2 ²] m/s | 2/3 s | $[-3.0 ; (b_n - 3.0)/2]$ m/s ² |

Tableau 2: Paramètres de validation du modèle de Gipps (Gipps, 1981)

✓ Le modèle à vitesse optimale

Dans ce modèle appelé OVM (**Optimal Velocity Model**), chaque véhicule adapte sa vitesse en fonction d'une vitesse optimale qui dépend de la distance avec le véhicule de devant (Bando et al., 1995a; Bando et al., 1995b). Le modèle est représenté par la relation suivante :

$$\ddot{x}_n = a \{V(\Delta x_n) - \dot{x}_n\}$$

Où :

- ✓ $\Delta x_n = x_{n+1} - x_n$: la distance entre le véhicule de devant $n + 1$ et le véhicule suiveur n à l'instant t ;
- ✓ a : une constante qui représente la sensibilité de chaque conducteur ;
- ✓ $V(\Delta x_n)$: la vitesse optimale du véhicule n dépendant de Δx_n représentée par la relation suivante : $V(\Delta x) = V_0 [\tanh m (\Delta x - b_f) - \tanh m (b_c - b_f)]$

Où

les paramètres V_0 , m , b_f et b_c sont déterminés à partir des données observées sur le comportement individuel de chaque véhicule.

La vitesse maximum d'un véhicule est définie par la relation suivante :

$$V_{max} = V_0[1 - \tanh m (b_c - b_f)]$$

✓ **Le modèle IDM :**

Le modèle IDM – Intelligent Driver Model (Treiber et al., 2000) est un modèle de poursuite basé sur un comportement raisonnable du conducteur alors que ce dernier essaie d'éviter les accidents. L'accélération du véhicule n par rapport au leader $n - 1$ est définie par une fonction continue basée sur la vitesse v_n , l'inter-distance s_n et la vitesse relative Δv_n par l'équation suivante :

$$\dot{v}_n = a^{(n)} \times \left[1 - \left(\frac{v_n}{v_0^{(n)}} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n} \right)^2 \right]$$

$$s^*(v_n, \Delta v_n) = s_0^{(n)} + s_1^{(n)} \times \sqrt{\frac{v_n}{v_0^{(n)}}} + T^{(n)} \times v_n + \frac{v_n \times \Delta v_n}{2 \times \sqrt{a^{(n)} \times b^{(n)}}}$$

Où :

- ❖ $a^{(n)}$: l'accélération maximum du véhicule n ;
- ❖ $b^{(n)}$: la décélération maximale du véhicule n ;
- ❖ v_n : la vitesse du véhicule n ;
- ❖ Δv_n : la vitesse relative du véhicule n par rapport à son leader $n - 1$;
- ❖ $v_0^{(n)}$: la vitesse désirée du véhicule n ;
- ❖ s_n : l'inter-distance nette entre les véhicules n et $n - 1$; $s_n = \Delta x_n - L_{n-1}$;
- ❖ $s^*(v_n, \Delta v_n)$: l'inter-distance optimale du véhicule n ;
- ❖ T : le temps inter-véhiculaire minimum ;
- ❖ δ : l'exposant de l'accélération ;
- ❖ s_0 et s_1 : deux distances qui caractérisent l'état de la congestion.

La validation du modèle IDM a été effectuée avec les paramètres ci-dessous (tableau 3).

| $a^{(n)}$ | $b^{(n)}$ | δ | T | s_0 |
|-----------------------|------------------------|----------|-------|-------|
| 0.73 m/s ² | 1.97 m/ s ² | 4 | 1.9 s | 2.0 m |

Tableau 3: Paramètres de validation du modèle IDM (Treiber et al., 2000)

Le choix du modèle de poursuite dépend de plusieurs critères donnés par le tableau 4.

| Modèles | (Chandler et al., 1958) | GHR(Gazis et al., 1959) | (Komeami et al., 1959) | (Gipps 1981) | OVM(Bando and Hesebe, 1995) | IDM(Treiber et al., 2000) |
|---|-------------------------|-------------------------|------------------------|--------------|-----------------------------|---------------------------|
| Anticipation temporelle | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui |
| Conformité aux limites réelles des véhicules | non | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui |
| Respect des limites de l'onde cinématique | non | Oui | Oui | Oui | Oui | Oui |

| Paramètres d'étalonnage | $\lambda ; T_r$ | c, m, l, T | $\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_0, \beta_0, T_r$ | $a_n, b_n, V_n, T_r, \hat{b}$ | S_e | $a_{n,0}, T, \delta$ |
|-------------------------|-----------------|------------|---|-------------------------------|-------|----------------------|
| Etalonnage facile | Oui | Non | Non | Oui | Oui | Oui |
| Outils | × | MITSIM | × | AIMSUN | × | × |

Tableau 4: Critères de choix

1.4.2.2 Modèles de changement de voie

Les modèles de changement de voie permettent de représenter les déplacements latéraux des véhicules dans un trafic sur une section de route à plusieurs voies. Une intention de changement de voie est illustrée par la figure 5.

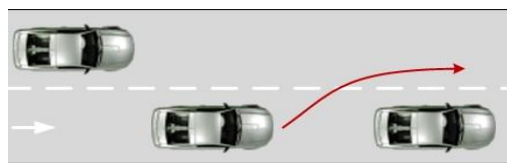


Figure 5: Intention de changement de voie

Un véhicule peut changer de voie pour plusieurs raisons :

- ❖ le changement de voie de confort ou discrétionnaire, qui vise à améliorer son confort de conduite et éviter les gênes des autres véhicules ;
- ❖ le changement de voie obligatoire qui vise à rejoindre une autre voie pour atteindre une destination spécifique.

Le conducteur d'un véhicule effectue généralement un changement de voie discrétionnaire afin de circuler à la vitesse qu'il désire : ce sont les manœuvres de dépassement et de rabattement classiquement observées sur les sections de route ayant plusieurs voies de circulation. Le conducteur est confronté à un changement de voie obligatoire lorsqu'il doit se rendre à une autre destination ou qu'il constate le blocage de la voie actuelle ou la fusion de la voie actuelle avec une autre voie.

Dans la littérature, les travaux ne sont pas aussi abondants comme dans le cas des modèles de poursuite mais il existe quelques travaux qui ont été proposés sur la modélisation du changement de voie. Les travaux majeurs sont présentés dans cette section.

Les modèles de changement de voie sont basés sur une chaîne de décisions élémentaires liée au conducteur. Chaque conducteur doit :

- ❖ évaluer la voie occupée (sa voie courante) et la voie cible (sa future voie) pour prendre la décision de changer ou non de voie ;
- ❖ prendre la décision de changer de voie lorsque les conditions de changement de voie sont remplies ;
- ❖ effectuer le changement de voie.

✓ **Le modèle de changement de voie de Gipps**

Dans (Gipps, 1986), l'auteur propose l'un des premiers modèles de changement de voie microscopique. C'est un modèle de décision qui évalue successivement la nécessité, le désir et la sécurité inhérente au changement de voie (la faisabilité). Chaque fois que le changement de voie est nécessaire, désiré et faisable pour un véhicule, alors la manœuvre est déclenchée. Ce modèle de changement a été implémenté dans l'outil de simulation AIMSUN (Barceló et al., 1994), (Barceló et al., 1998).

✓ **Le modèle MOBIL**

Dans les travaux de (Kesting et al., 2007), les auteurs proposent le modèle MOBIL (Minimizing Overall Braking Induced by Lane Changes). C'est un modèle de changement de voie assez complet car il permet de décrire un changement de voie discrétionnaire et un changement de voie obligatoire.

✓ **Le modèle de Leclercq et Laval**

Dans leurs travaux (Laval & Leclercq, 2008), les auteurs ont proposé un modèle récent de changement de voie discret. Ce modèle calcule la probabilité de changer de voie en fonction de la différence de vitesse entre les voies. C'est le modèle qui est implémenté dans la plateforme de simulation SymuVia (Leclercq & Becarie, 2012).

1.4.2.3 Outils de simulation microscopique

Plusieurs outils logiciels de simulation microscopique existent dans la littérature et dont les plus connus sont :

✓ **AIMSUN2**

L'outil AIMSUN2 (Barceló et al., 1994), (Barceló, Casas, Ferrer, & García, 1998) est utilisé pour l'évaluation des nouvelles stratégies de système de contrôle ou la création de nouvelles infrastructures. L'outil logiciel AIMSUN2 utilise un éditeur graphique pour construire le réseau de transport. Il permet la simulation de différents types de véhicule : voitures, bus, camions, etc.

✓ **HUTSIM**

L'outil HUTSIM (Kosonen, 1996) est un simulateur spécifique pour la planification du contrôle des signaux du trafic. L'outil propose une interface graphique intuitive qui permet une meilleure modélisation du système à étudier.

✓ **MICROSIM**

L'outil MICROSIM (Rickert & Wagner, 1996) est un simulateur qui utilise les automates cellulaires. Les voies sont représentées par des grilles dans lesquelles une intersection peut contenir ou non une particule (voiture).

✓ PARAMICS

L'outil PARAMICS (Cameron & Duncan, 1996) permet de construire le réseau à l'aide d'un graphe constitué de nœuds et d'arcs. Il utilise des files d'attente comme unité de données. Une file d'attente a un tableau qui peut contenir ou non des véhicules.

✓ ANYLOGIC

L'outil ANYLOGIC (Borschchev, 2013) et (Grigoryev, 2015) est un environnement multi-méthode qui permet de combiner plusieurs types de méthodes de simulation. Il utilise les systèmes multi-agents pour mettre œuvre une simulation microscopique du trafic routier très réaliste. AnyLogic possède un éditeur graphique qui facilite la représentation du système à simuler.

1.4.3 Approche de modélisation mésoscopique

La modélisation mésoscopique permet de représenter les grands réseaux. Les modèles mésoscopiques permettent une meilleure représentation de la dynamique du trafic et des comportements des véhicules par rapport aux modèles macroscopiques. Ils sont moins complexes et utilisent moins de paramètres que les modèles microscopiques.

L'approche mésoscopique combine les aspects microscopiques (effets des interactions entre les véhicules individuels) et les aspects macroscopiques (mesures sur la globalité des véhicules). Un modèle mésoscopique ne permet pas d'identifier les véhicules individuellement. Les modèles mésoscopiques ont été développés pour remédier à la complexité calculatoire des modèles microscopiques. Deux grandes familles de modèles mésoscopiques ont été proposées dans la littérature : les modèles mésoscopiques basés sur le principe de la cinétique des gaz utilisant des fonctions de distribution probabiliste, et les modèles mésoscopiques utilisant des pelotons ou paquets de véhicules pour représenter les flux du trafic.

1.4.3.1 Modèles basés sur la cinétique des gaz

L'un des premiers modèles mésoscopiques a été proposé par (Prigogine & Herman, 1971). Ce modèle est basé sur une fonction de distribution de vitesse $f(x, v, t)$. A l'instant t , le nombre de véhicules dN présents sur une section de route $[x, x + dx]$ et leur vitesse dans l'intervalle $[v, v + dv]$, permettent d'établir les équations suivantes :

$dN = f(x, v, t) dx dv$, le nombre de véhicules sur une section de route;

$c(x, t) = \int_0^{\infty} dv f(x, v, t)$, la concentration locale ;

$q = c\bar{v}(x, t) = \int_0^{\infty} v f(x, v, t) dv$, le débit local.

Les figures suivantes illustrent respectivement la représentation de la fonction de distribution de vitesse, celle de la vitesse en fonction de la position, et le diagramme du débit local.

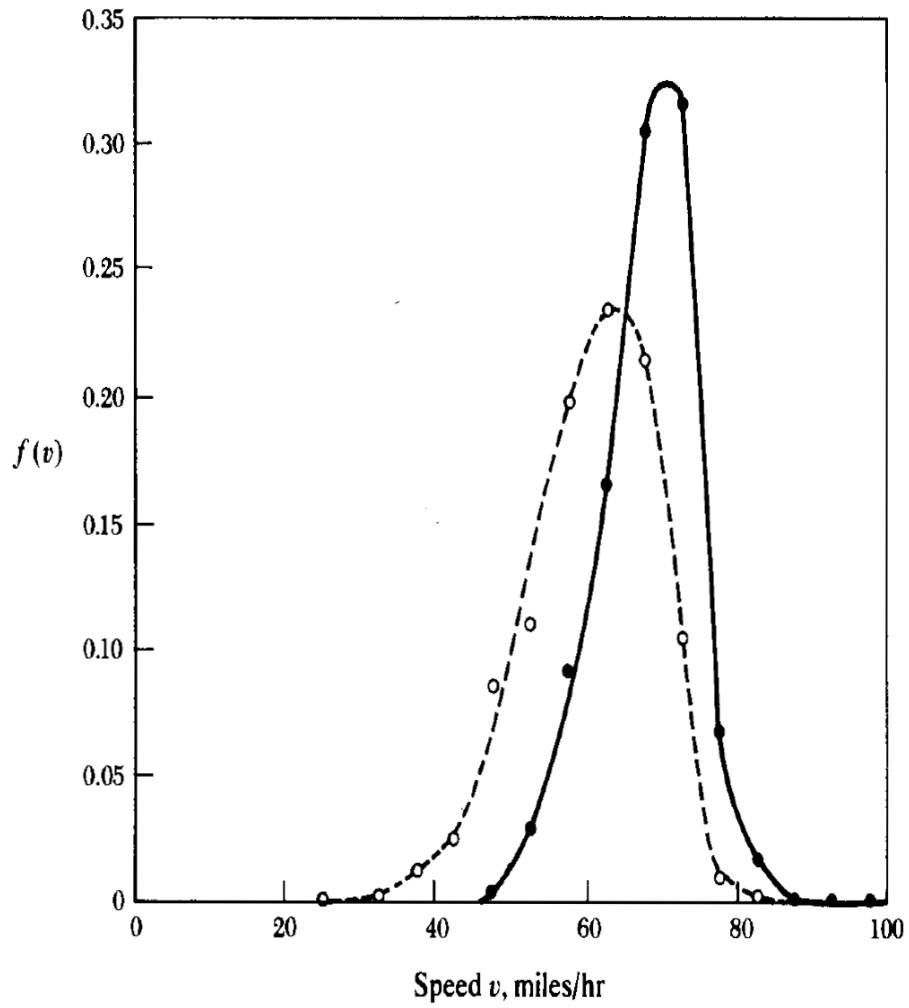


Figure 6: Représentation de la fonction de distribution de vitesse

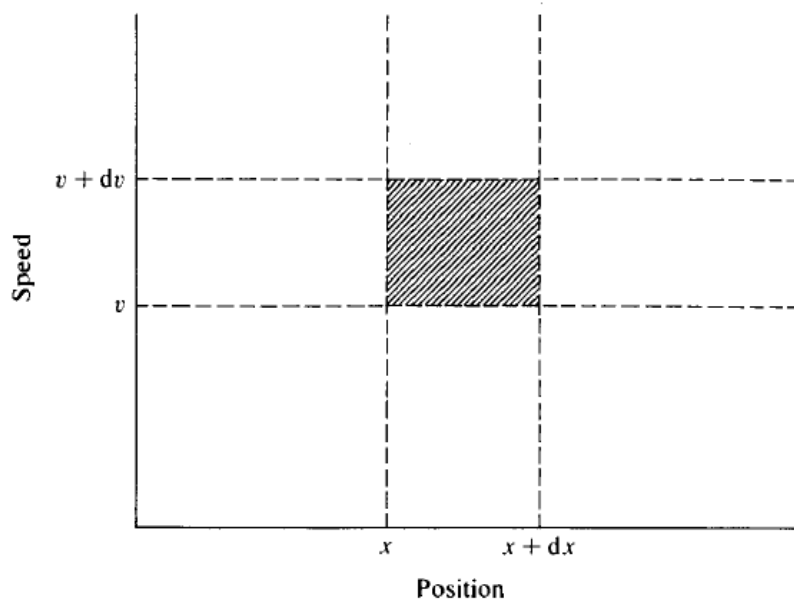


Figure 7: Représentation de la vitesse en fonction de la position dans l'espace

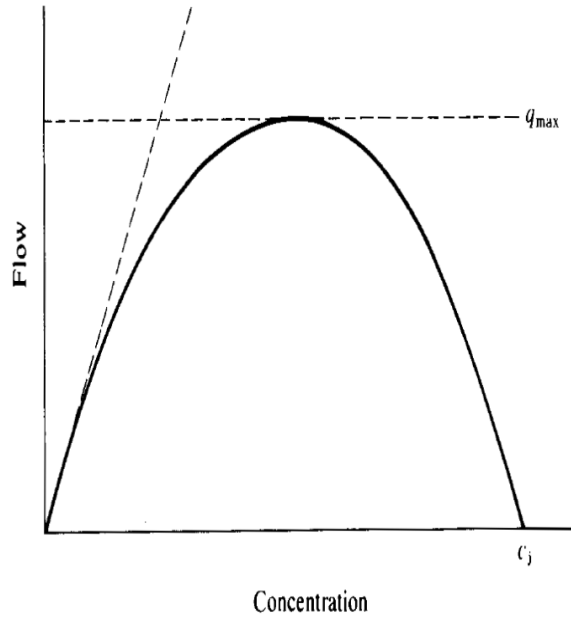


Figure 8: Diagramme du débit local en fonction de la concentration

1.4.3.2 Modèles basés sur l'utilisation des pelotons de véhicules

Dans ce type de modélisation mésoscopique, le modèle ne permet pas de différencier ou de suivre les véhicules individuellement, mais il considère le comportement des véhicules en termes probabilistes. Le flux du trafic est représenté par de petits groupes (pelotons) de véhicules. Un peloton est un groupe de véhicules ayant des caractéristiques communes (mêmes origines et mêmes destinations). La figure 9 illustre la notion de peloton dans une route à 3 voies.

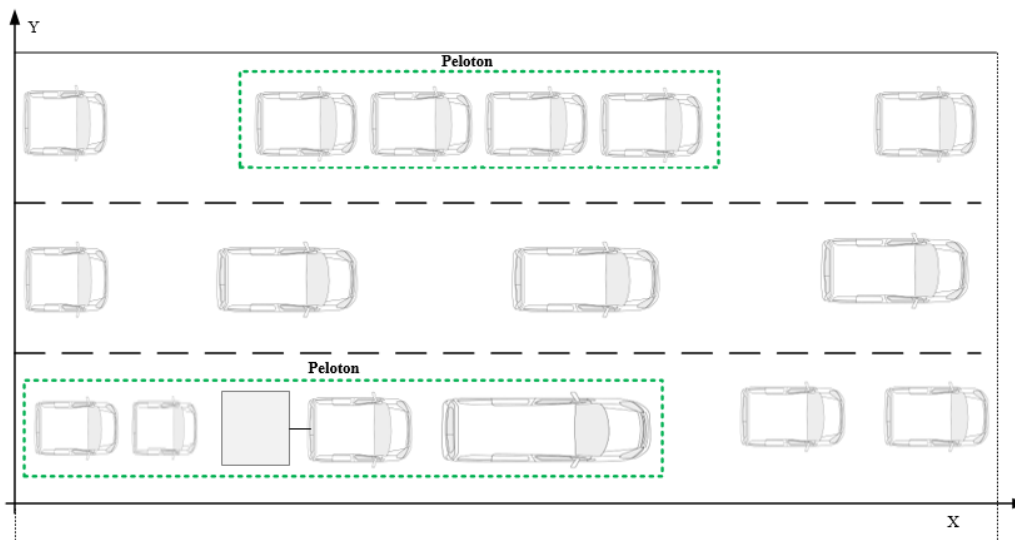


Figure 9: Notion de peloton dans une route à 3 voies

Le tableau 5 donne une comparaison entre les trois types de modèles classiques de trafic.

| Modèles macroscopiques | Modèles microscopiques | Modèles mésoscopiques |
|--|---|--|
| Représentation globale du flux de véhicules | Représentation individuelle de chaque véhicule | Représentation par groupes (paquets) de véhicules |
| Très peu de paramètres | Trop de paramètres | Peu de paramètres |
| Validation et calibrage faciles | Validation et calibrage partiels | Validation et calibrage faciles |
| Temps d'exécution court | Temps d'exécution long | Temps d'exécution moyen |
| Peu coûteux | Très coûteux | Coûteux (traitement des paquets de véhicules) |
| Problèmes de planification stratégique, régulation | Problèmes complexes liés aux comportements des usagers, résolution des conflits | Problèmes de planification stratégique à moyen terme, informations aux voyageurs |
| Champ d'application : Autoroutes | Champ d'application : réseaux urbains | Champ d'application : réseaux urbains et autoroutes |

Tableau 5 : Comparaison entre les modèles macroscopiques, microscopiques et mésoscopiques

1.4.3.3 Outils de simulation mésoscopiques

Les outils logiciels de simulation mésoscopiques les plus couramment utilisés sont :

✓ **CONTRAM**

L'outil CONTRAM (Leonard et al., 1989) représente le réseau routier par des nœuds et des arcs. Les véhicules sur les arcs sont groupés en pelotons qui se déplacent de l'origine à la destination (cas particulier : un peloton peut être constitué d'un seul véhicule).

✓ **DYNAMIT**

L'outil DYNAMIT (Ben-Akiva et al., 2001) utilise des véhicules individuels qui se déplacent le long des segments sur la base des relations vitesse-densité et des modèles files d'attente. Les files d'attente sont spécifiques à chaque voie. Les opérations sur les intersections sont représentées en fonction de leur capacité.

✓ **DYNASMART**

L'outil DYNASMART (Jayakrishnan et al., 1994) utilise aussi la relation vitesse-densité, mais permet une représentation plus détaillée des intersections ayant des feux de signalisation.

✓ **FASTLANE**

L'outil FASTLANE (Gawron, 1998) représente les véhicules individuellement qui répondent aux relations vitesse-densité et utilise des serveurs stochastiques pour la gestion des files d'attente au niveau des nœuds pour justifier les retards dus aux feux de circulation.

✓ **DYNAMEQ**

L'outil DYNAMEQ (Mahut, 2001), (Mahut et al., 2003) fonctionne de façon similaire à l'outil précédent mais la dynamique des véhicules dans les liens est représentée par des relations simplifiées. Les différentes voies sont représentées de façon explicite, y compris les opérations de changement de voies.

Le tableau 6 présente les logiciels de simulation de systèmes de transport les plus connus par catégories de modèles.

| Microscopique | Mésoscopique | Macroscopique |
|--|--|--|
| AIMSUN ANYLOGIC CORSIM DRACULA DYNASIM HUTSIM MATSIM MICROSIM MITSIM PARAMICS SIMTRAFFIC TRANSMODELER VISSIM | AIMSUN CONTRAM CUBE DYNAMEQ DYNAMIT DYNASMART FASTLANE TRANSIMS TRANSMODELER | DYNEV EMME/2 METACOR METANET OMNITRANS OREMS TRANSCAD TRANSMODELER VISUM |

Tableau 6 : Synthèse des logiciels de simulation

Les outils de simulation existants sont basés sur les niveaux d'échelle mais ne prennent pas en compte plusieurs niveaux d'explication des systèmes de transport. Notre travail propose une approche multi-échelle et multi-perspective pour l'étude des systèmes de transport urbain.

1.4.4 Approches de modélisation hybride du trafic

Les travaux récents dans la théorie du trafic ont abouti à l'apparition d'une nouvelle famille de modélisation du trafic dite hybride. Il apparaît nécessaire d'intégrer les différentes approches de modélisation du flux de trafic afin d'adapter le modèle à l'échelle du phénomène étudié, car l'analyse des différents travaux ont montré qu'aucune approche n'est suffisante à elle seule pour représenter tous les phénomènes d'un réseau routier à grande échelle. Dans la littérature plusieurs axes de modélisation hybride existent :

- ✓ combinaison des modèles microscopiques et macroscopiques (Bourrel & Lesort, 2003), (Magne et al., 2000), (Sewall et al., 2011);
- ✓ combinaison des modèles mésoscopiques et macroscopiques (Van Vliet & Hall, 1997) ;
- ✓ combinaison des modèles microscopiques et mésoscopiques (Burgthout, 2004) ;
- ✓ combinaison des modèles microscopiques, macroscopiques et mésoscopiques (TransModeler, 2008), (Aimsun, 2002).

La figure 10 présente le modèle d'hybridation proposé dans (Bourrel & Lesort, 2003).

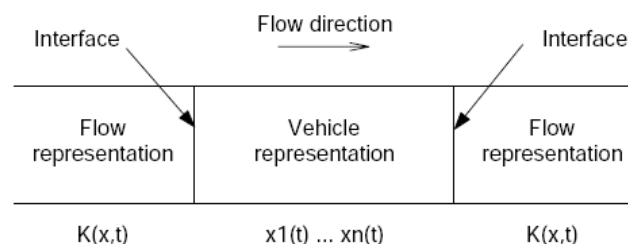


Figure 10: Définition d'un modèle hybride (Bourrel & Lesort, 2003)

Le principal problème créé par les modèles hybrides est l'interfaçage des modèles de différentes échelles. Plusieurs travaux ont été effectués pour apporter une solution au problème d'interfaçage. Dans la figure 11, les auteurs propose une solution en mécanique des fluides qui consiste à définir une zone de transition pour passer d'une zone microscopique à une zone macroscopique.

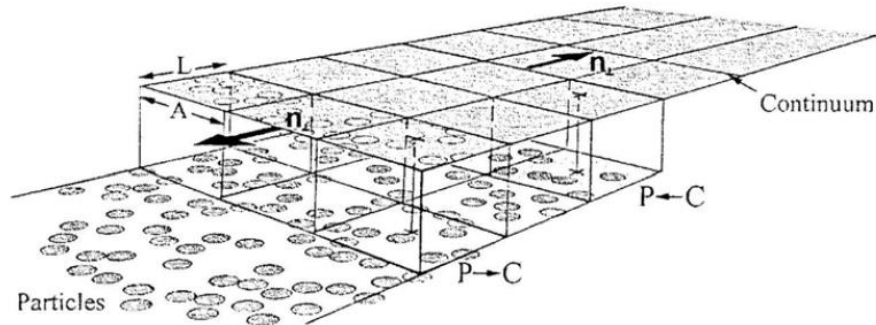


Figure 11: Zone de transition macro-micro dans le modèle de (Flekkøy et al., 2000)

Plusieurs travaux ont été proposés pour résoudre le problème d'interfaçage entre différents modèles. La figure ci-dessous propose une première solution de cellules de transition entre un modèle macroscopique et un modèle microscopique d'une part et d'autre part entre un modèle microscopique et un modèle macroscopique.

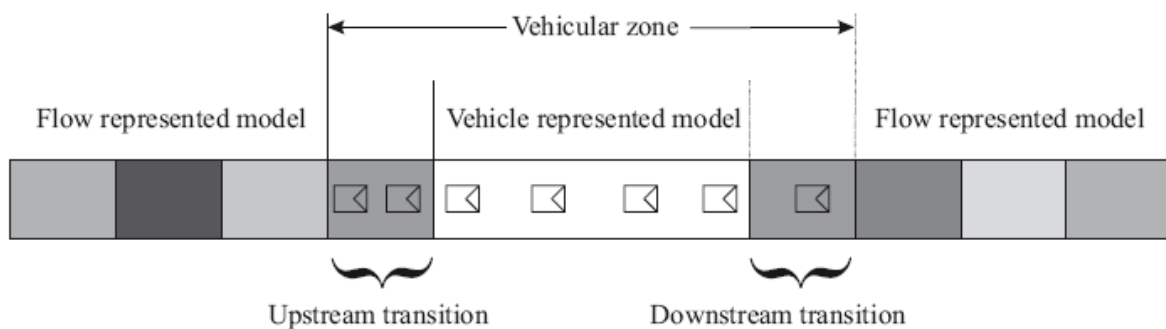


Figure 12: Position des cellules de transition (Bourrel & Lesort, 2003)

Les auteurs (El Hmam et al., 2008) ont travaillé un modèle d'hybridation présenté par les figures ci-dessous.

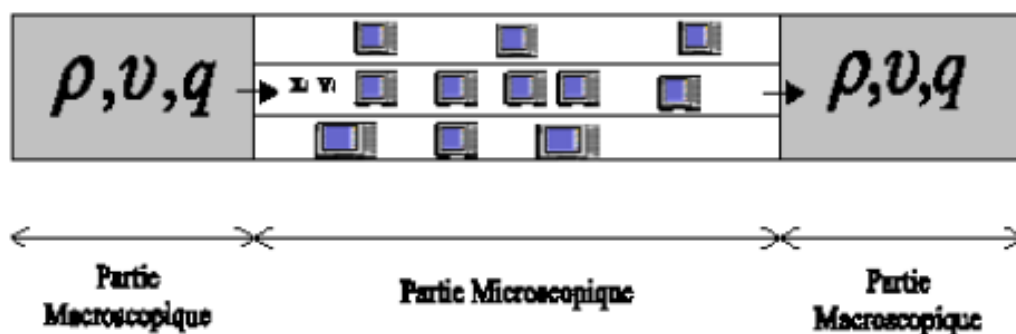


Figure 13: Schéma d'hybridation (El Hmam et al., 2008)

Pour mettre en œuvre le modèle d'hybridation de la figure 13, les auteurs (El Hmam, Jolly, Abouaissa, & Benasser, 2008) ont proposé deux zones de transition : la zone de Transition macro-micro (figure 14) et : la zone de Transition micro-macro (figure 15).

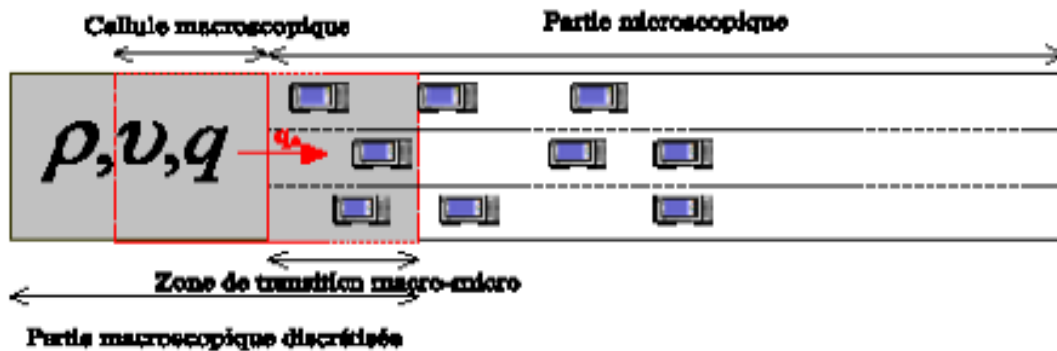


Figure 14: Transition macro-micro (El Hmam et al., 2008)

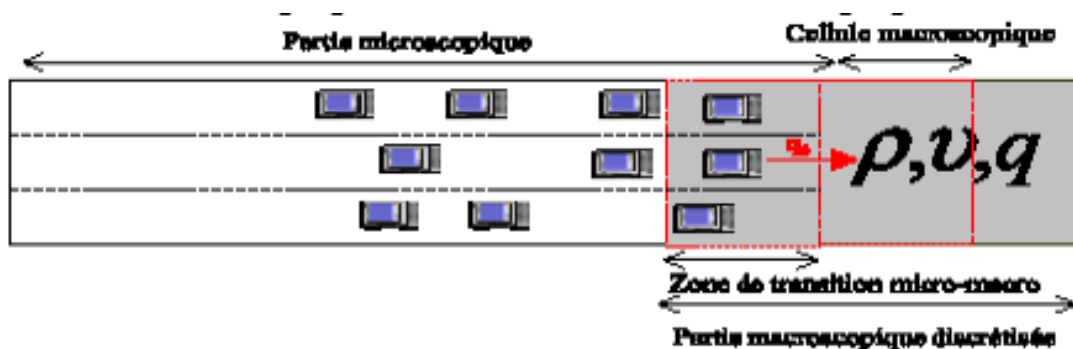


Figure 15: Transition micro-macro (El Hmam et al., 2008)

1.4.5 Modèles de trafic par automates cellulaires

Les modèles à base d'automates cellulaires sont récents dans la modélisation microscopique du flux de trafic. Ils décrivent la dynamique du flux de trafic de manière discrète. L'un des premiers modèles les plus connus a été proposé par (Nagel & Schreckenberg, 1992), un modèle d'automate cellulaire discret stochastique pour simuler le trafic sur une autoroute. Le modèle utilise une route à une voie divisée en cellules de taille identique. Chaque cellule peut être vide ou occupée par un véhicule. Un véhicule est caractérisé par une vitesse de type entier comprise entre 0 et v_{max} (sa vitesse maximale). Pour une configuration quelconque du système, sa mise à jour est constituée de quatre étapes basées sur l'accélération, le ralentissement, la variable aléatoire et le mouvement du véhicule. Ces étapes sont définies de la manière suivante :

- 1°) accélération : si la vitesse v du véhicule est inférieure à sa vitesse maximale ($v < v_{max}$) et la distance par rapport à son véhicule leader est supérieure à $v + 1$ alors le véhicule avance avec la nouvelle vitesse, $v \leftarrow v + 1$;
- 2°) ralentissement (lié aux autres véhicules) : si le véhicule i voit un véhicule dans la cellule suivante $i + j$ ($j \leq v$) alors il réduit sa vitesse à $j - 1$, $v \leftarrow j - 1$;

- 3°) variable aléatoire : avec une probabilité p , la vitesse de chaque véhicule ($v > 0$) est réduite pour prendre la nouvelle vitesse, $v \leftarrow v - 1$;
- 4°) mouvement du véhicule : chaque véhicule est avancé de v cellules.

Les quatre étapes sont effectuées parallèlement pour tous les véhicules. Ce modèle est utilisé dans le cas d'un système fermé (trafic circulaire) et permet d'obtenir les variables macroscopiques du flux de trafic. Dans les travaux de (Brockfeld et al., 2001), les auteurs proposent une extension plus réaliste du modèle de (Nagel & Schreckenberg, 1992) prenant en compte la dynamique au niveau des feux de signalisation.

1.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les principaux modèles conventionnels de la théorie du trafic. Nous avons aussi donné une brève description de quelques outils de simulation. Les modèles conventionnels constituent la base de connaissance de notre travail. Dans le chapitre suivant, nous abordons les outils théoriques et méthodologiques utiles à notre travail.

Chapitre 2. Formalismes et méthodes utilisés dans le cadre du travail

2.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les éléments conceptuels sur lesquels s'appuie la construction de notre cadre de M&S des STU.

2.2 DEVS

DEVS (Discrete Event Systems Specification) est un formalisme de M&S des systèmes dynamiques à événement discret, basé sur la théorie des systèmes (Zeigler et al., 2000). Il existe deux variantes de DEVS : la version classique (Classic DEVS) dans laquelle les différentes opérations du système dynamique sont effectuées séquentiellement, et la version parallèle (Parallel DEVS) qui permet de mieux exploiter le concept d'événements parallèles.

La spécification d'un système en théorie des systèmes comporte la spécification de sa structure et celle de son comportement. Pour la spécification de la structure du système, les concepts importants sont la décomposition et la composition. La décomposition définit la façon dont un système peut être décomposé en composants, alors que la composition est la façon dont des composants peuvent être couplés ensemble pour former un système plus grand. La théorie qui sous-tend DEVS garantit qu'une composition de modèles DEVS de système soit également le modèle d'un système.

Pour décomposer un système, il faut le diviser en parties significatives pouvant représenter des sous-composants du système. Chaque partie du système doit être caractérisée par des attributs bien définis pour la définition de son état interne et de ses interfaces. Les domaines des attributs peuvent être définis par des concepts et par la manière dont ils peuvent être manipulés. DEVS offre le moyen de définir les systèmes de manière hiérarchique et modulaire. Un composant de base du système est représenté par un modèle atomique et un composant décomposable est obtenu en interconnectant des modèles atomiques pour créer un modèle couplé. Un modèle couplé peut être constitué de modèles atomiques et d'autres modèles couplés.

2.2.1 DEVS Classique

Un modèle atomique DEVS peut posséder des ports d'entrée pour recevoir les événements d'entrée et des ports de sortie pour envoyer les sorties générées (événements de sortie) par le composant.

Un modèle atomique possédant des ports est représenté par la structure suivante :

$$M = \langle X, Y, S, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, ta \rangle$$

Où :

- ✓ $X = \{(p, v) | p \in InPorts, v \in X_p\}$: est l'ensemble des événements d'entrée, où $InPorts$ est l'ensemble des ports d'entrée et X_p représente l'ensemble des valeurs des ports d'entrée ;
- ✓ $Y = \{(p, v) | p \in OutPorts, v \in Y_p\}$: est l'ensemble des événements de sortie, où $OutPorts$ est l'ensemble des ports de sortie et Y_p représente l'ensemble des valeurs des ports de sortie ;
- ✓ S : est l'ensemble des états séquentiels ;
- ✓ $\delta_{int}: S \rightarrow S$, est la fonction de transition interne ;
- ✓ $\delta_{ext}: Q \times X \rightarrow S$, est la fonction de transition externe ;
Où : $Q = \{(s, e) | s \in S, 0 \leq e \leq ta(s)\}$ est l'ensemble total des états du système et e le temps écoulé dans l'état actuel depuis la dernière transition ;
- ✓ $\lambda : S \rightarrow Y$, est la fonction de sortie ;
- ✓ $ta : S \rightarrow \mathbb{R}_{0, \infty}^+$, est l'ensemble des réels positifs incluant 0 et ∞ , cet ensemble représente les durées des états.

Le formalisme DEVS permet de construire un modèle couplé en reliant les composants spécifiés en modèles DEVS à l'aide des relations de couplage. La spécification des composants et des relations de couplage qui les relient sont définis par le modèle suivant :

$$N = (X, Y, D, \{M_d | d \in D\}, EIC, EOC, IC, Select)$$

Où :

- ✓ $X = \{(p, v) | p \in IPorts, v \in X_p\}$ est l'ensemble des ports et des valeurs d'entrée
- ✓ $Y = \{(p, v) | p \in OPorts, v \in Y_p\}$ est l'ensemble des ports et des valeurs de sortie
- ✓ D est l'ensemble des noms des composants ;
- ✓ Chaque composant de nom $d \in D$ est représenté en DEVS par :

$$M_d = (X_d, Y_p, S, \delta_{ext}, \delta_{int}, \lambda, ta), \text{ avec :}$$

$$X_d = \{(p, v) | p \in IPorts_d, v \in X_p\}$$

$$Y_d = \{(p, v) | p \in OPorts_d, v \in Y_p\}$$
- ✓ Les couplages sont utilisés pour relier les composants du système :
 Le couplage d'entrée externe permet de connecter les entrées externes du modèle global aux entrées des composants :

$$EIC \subseteq \{(N, ip_N), (d, ip_d) | ip_N \in IPorts, d \in D, ip_d \in IPorts_d\}$$
 Le couplage de sortie externe permet de connecter les sorties des composants aux sorties du modèle global :

$$EOC \subseteq \{(d, op_d), (N, op_N) | op_N \in OPorts, d \in D, op_d \in OPorts_d\}$$
 Le couplage interne permet de connecter les sorties des composants aux entrées des autres composants :

$$IC \subseteq \{(a, op_a), (b, ip_b) | a, b \in D, op_a \in OPorts_a, ip_b \in IPorts_b\}$$
- ✓ $Select: 2^D - \{\} \rightarrow D$: est la fonction de sélection d'un modèle composant.

2.2.2 DEVS Parallèle

Un modèle atomique en DEVS Parallèle est défini par la structure suivante :

$$M_{Parallel\ DEVS} = \langle X, Y, S, \delta_{int}, \delta_{ext}, \delta_{conf}, \lambda, ta \rangle$$

Où :

- ✓ $X = \{(p, v) | p \in InPorts, v \in X_p\}$: est l'ensemble des événements d'entrée, où $InPorts$ est l'ensemble des ports d'entrée et X_p représente l'ensemble des valeurs des ports d'entrée ;
- ✓ $Y = \{(p, v) | p \in OutPorts, v \in Y_p\}$: est l'ensemble des événements de sortie, où $OutPorts$ est l'ensemble des ports de sortie et Y_p représente l'ensemble des valeurs des ports de sortie ;
- ✓ S : est l'ensemble des états séquentiels ;
- ✓ $\delta_{int}: S \rightarrow S$, est la fonction de transition interne ;
- ✓ $\delta_{ext}: Q \times X^b \rightarrow S$, est la fonction de transition externe ;
Où : $Q = \{(s, e) | s \in S, 0 \leq e \leq ta(s)\}$ est l'ensemble total des états du système et e le temps écoulé dans l'état actuel depuis la dernière transition ;
 X^b désigne l'ensemble des sacs d'événements de type X
- ✓ $\delta_{conf}: Q \times X^b \rightarrow S$, est la fonction de transition confluyente ;
- ✓ $\lambda : S \rightarrow Y$, est la fonction de sortie ;
- ✓ $ta : S \rightarrow \mathbb{R}_{0,\infty}^+$, est l'ensemble des réels positifs incluant 0 et ∞ , cet ensemble représente les durées des états.

La structure d'un modèle couplé de DEVS parallèle est identique à celle de DEVS classique sauf que la fonction de sélection est omise.

2.2.3 DEVS Paramétrique

DEVS paramétrique (Djitog et al., 2018), (Zeigler et al., 2019) est une extension de DEVS qui a été introduite dans le cadre de l'approche MPM&HS, pour prendre en compte la question de l'intégration holistique de modèles issus de différentes perspectives. Un modèle DEVS paramétrique (Figure 16) possède des paramètres qui diffèrent de ses variables d'états. Les paramètres sont des valeurs constantes que le modèle peut utiliser lors du déclenchement de ses fonctions de transition, ou au moment du calcul de ses sorties, ou encore lors de la détermination de la durée de ses états.

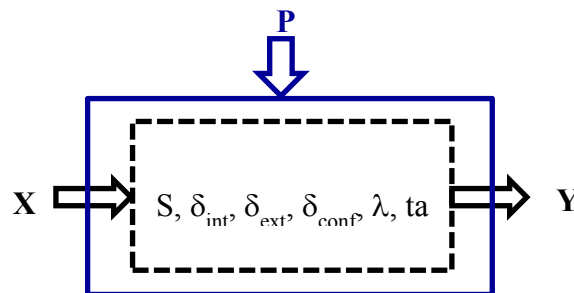


Figure 16: Modèle atomique DEVS Paramétrique

Un modèle atomique DEVS paramétrique est défini par la structure ci-dessous :

$$M_{PAD} = \langle X, Y, P, S, \delta_{int}, \delta_{ext}, \delta_{conf}, \lambda, ta \rangle$$

Où :

- ✓ $X^P = P \times X$: est l'ensemble des entrées du système ;
- ✓ $Y^P = Y$: est l'ensemble des sorties du système ;
- ✓ $P = \{(p_i, dom(p_i)) | i \in \mathbb{N}\}$: est l'ensemble des paires de paramètres dynamiques du système ;
- ✓ $S^P = P \times S \times \mathbb{R}_0^{+\infty}$: est l'ensemble des états séquentiels ;
- ✓ $\delta_{int}: S \times P \rightarrow S \times P$, est la fonction de transition interne ;
- ✓ $\delta_{ext}: Q \times X^b \times P \rightarrow S \times P$, est la fonction de transition externe ;
Où : $Q = \{(s, e) | s \in S, 0 \leq e \leq ta(s)\}$ est l'ensemble total des états du système et e le temps écoulé dans l'état actuel depuis la dernière transition;
- ✓ $\delta_{conf}: Q \times X^b \times P \rightarrow S \times P$, est la fonction de transition confluyente ;
- ✓ $\lambda : S \times P \rightarrow Y^b$, est la fonction de sortie ;
- ✓ $ta : S \times P \rightarrow \mathbb{R}_0^{+\infty}$, est l'ensemble des réels positifs incluant 0 et $+\infty$, cet ensemble représente les durées des états;

La Figure 17 représente la différence entre un couplage classique de modèles DEVS (sortie d'un modèle connectée à l'entrée d'un autre), et une intégration de modèles DEVS paramétriques (sortie d'un modèle liée au paramètre d'un autre).

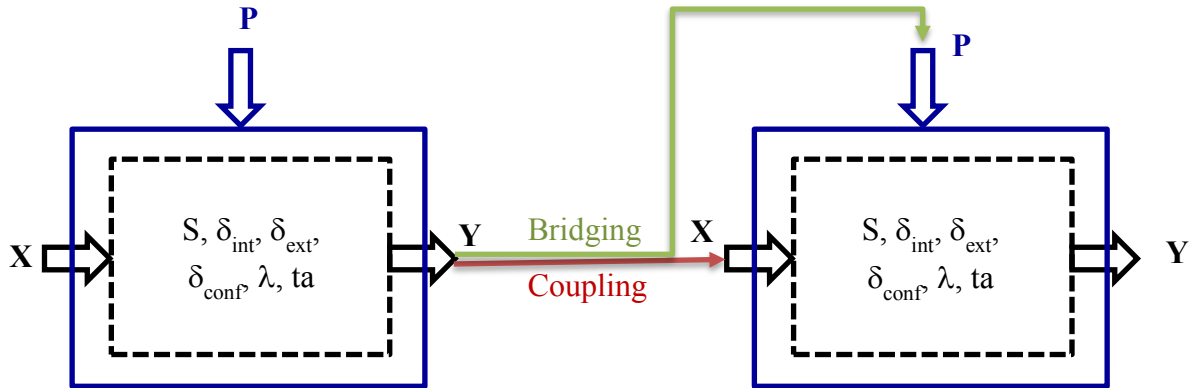


Figure 17: Couplage versus intégration de modèle DEVS paramétrique

Un modèle couplé DEVS Paramétrique est défini par la structure suivante :

$$\langle X_{self}^P, Y_{self}^P, D^P, \{M_d^{Pd}\}_{d \in D}, \{I_d^{Pd}\}_{d \in D}, \{Z_{kj}^P\}_{k \in D \cup \{self\}, j \in Ik} \rangle$$

Où :

$$X_{self}^P = (\times P_d)_{d \in D} \times X_{self}$$

$$Y_{self}^P = Y_{self}$$

$$D^P = D$$

M_d^{Pd} est un modèle DEVS paramétrique si $P_d \neq \emptyset$ avec $X_d^{Pd} = X_d \times P_d$ l'ensemble des entrées

I_d^{Pd} contient tous les modèles envoyant une entrée à d , que ce soit pour la modification des paramètres ou le changement d'état interne

$$Z_{self,d}^P : X_{self}^P \rightarrow P_d \times X_d$$

$$\begin{aligned}
Z_{self,d}^P(P, X) &= (P_d, Z_{self,d}(X)) \\
Z_{d,self}^P &= Z_{d,self} \\
Z_{i \in D, j \in D - \{i\}}^P: Y_i &\rightarrow P_j \times X_j \\
Z_{i \in D, j \in D - \{i\}}^P(y) &= (\emptyset, X) \text{ pour le couplage régulier} \\
Z_{i \in D, j \in D - \{i\}}^P(y) &= (p_j, \emptyset) \text{ pour l'intégration par pontage sur paramètre.}
\end{aligned}$$

2.3 Formalisme HiLLS

Nous donnons dans cette section une brève description du formalisme HiLLS (High Level Language for System Specification). HiLLS est un langage de spécification pour les systèmes complexes, basé à la fois sur les concepts de DEVS, de l'ingénierie logicielle par UML, et des concepts logiques d'Object-Z (Smith, 2012). Un modèle HiLLS est, de ce fait, accessible à la fois à la simulation à événements discrets, à l'analyse formelle, et à l'enactement (Maïga, 2015), (Aliyu et al., 2016). Nous avons également montré récemment que le formalisme HiLLS, en tant que langage de haut niveau, peut être utilisé à la fois pour la modélisation des systèmes et pour l'analyse de domaine (Koné et al., 2020).

Le formalisme HiLLS apporte une amélioration pour représenter la notion d'entités en introduisant deux catégories d'entités, respectivement représentées sur les figures 18a et 18b :

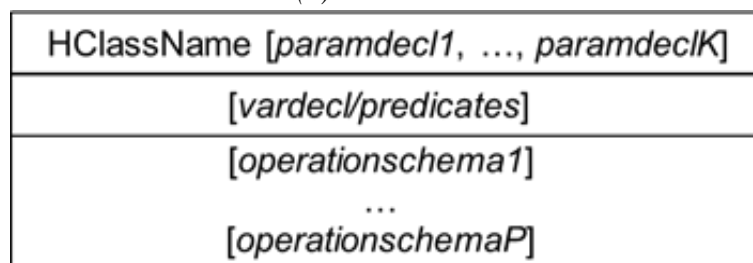
- ✓ la classe HiLLS (HClass) qui représente une entité sans aucun comportement temporel, et qui sert à modéliser les ressources passives du système (à titre d'exemple, pensez à une file d'attente qui sert à stocker et à récupérer des entités pendant la durée de vie d'un modèle);
- ✓ le système HiLLS (HSystem) qui représente une entité avec un comportement temporel (équivalent à un modèle atomique ou couplé DEVS).

Un système spécifié par HiLLS est représenté par un HSystem, qui est indiqué par une boîte similaire à une classe UML, avec un compartiment horizontal supplémentaire et deux compartiments verticaux additionnels. Le compartiment vertical du côté gauche (respectivement droit) est doté des ports d'entrée (respectivement de sortie). Le concept de port est défini comme dans DEVS. Toutes les déclarations dans HiLLS (qu'il s'agisse de ports ou d'autres variables ou fonctions) sont effectuées dans une logique de premier ordre, en utilisant l'approche de schéma de déclaration Z. Le compartiment horizontal supérieur contient le nom du modèle et la déclaration de ses paramètres. Le compartiment immédiatement en dessous contient la déclaration des variables d'état. Le troisième compartiment à partir du haut contient les définitions des schémas d'opération qui utilisent et manipulent toutes les variables, y compris les paramètres et les ports. Par conséquent, alors qu'un message reçu sur un port d'entrée donné provoque un changement de l'état interne du modèle, un appel à une opération de modification de données provoque un changement de valeur d'un paramètre donné. Le compartiment inférieur contient le comportement du système décrit par le diagramme de transition de configuration, un graphique dont les sommets représentent l'ensemble des configurations possibles du système, et les arêtes représentent les transitions de configuration à configuration qui peuvent se produire dans le système.

Une configuration correspond à une affectation de valeurs ou de contraintes spécifiques à chacune des variables d'état. On peut remarquer que l'affectation d'une valeur spécifique à chacune des variables d'état donne un état au sens de DEVS (c'est-à-dire une configuration

particulière), tandis que l'affectation de contraintes (plutôt que de valeurs spécifiques) à tout ou partie de variables d'état donne une configuration qui correspond dans DEVS à une famille d'états (au lieu d'un seul). En tant que telle, une configuration décrit un ensemble de propriétés partagées par plusieurs états. La principale raison de l'introduction de configurations est basée sur l'hypothèse forte qu'un modélisateur peut toujours être en mesure de représenter les fonctions de transition d'état à état DEVS (fonctions de transition internes, externes et confluentes toutes ensemble) sous la forme d'un diagramme de transition de configuration à configuration finie, que le modèle DEVS correspondant ait un ensemble fini ou infini d'états. Les configurations sont un moyen de regrouper tous les états DEVS dans une partition finie. L'hypothèse que cela est toujours possible n'a pas de preuve formelle. Cependant, l'expérience de la modélisation de systèmes à événements discrets montre que le plus souvent, l'élévation du niveau d'abstraction conduit à abaisser le nombre de propriétés atomiques, et donc à atteindre éventuellement un niveau où le comportement du système peut être capturé par une collection finie de configurations et de transitions entre ces configurations.

(a) *HiLLS class*



(b) *HiLLS system*

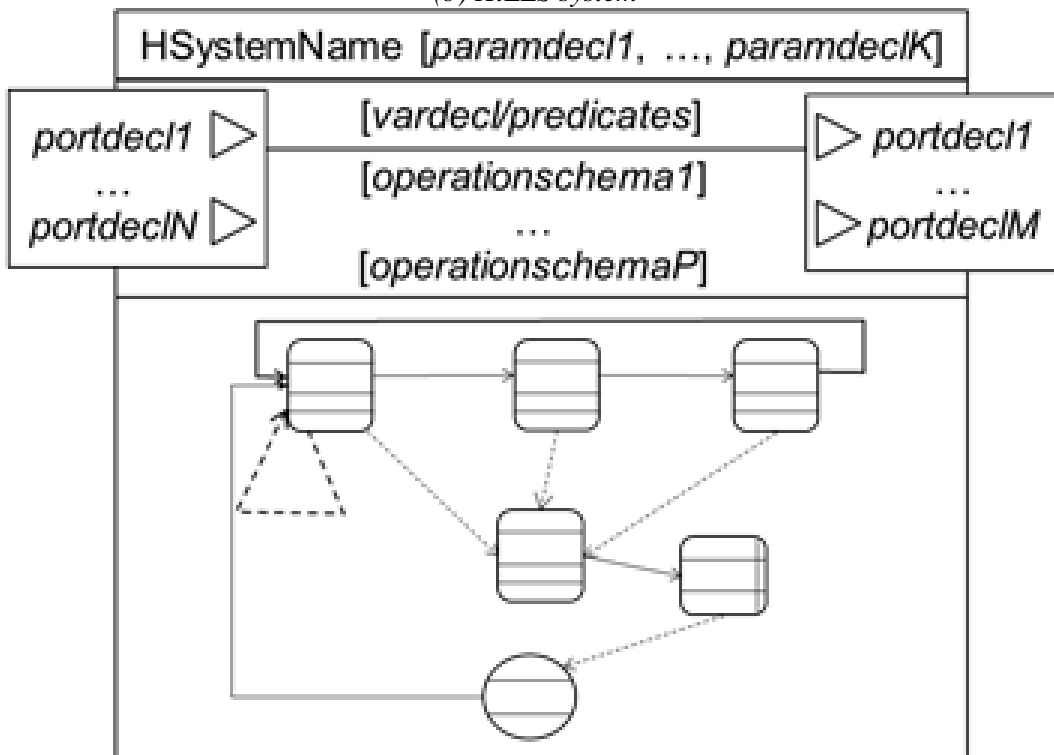


Figure 18: Classe et Système HiLLS

2.4 Approche SES/MB

L'approche SES/MB (System Entity Structure/Model Base) est un formalisme pour la représentation de connaissances de M&S dans un domaine donné (Zeigler, 1984). Il est basé sur le principe de séparation entre la structure organisationnelle hiérarchique des composants du système (SES) et leur implémentation dans une librairie de composants (MB).

2.4.1 SES

SES (System Entity Structure) est un formalisme de représentation hiérarchique de l'ensemble des connaissances du domaine d'un système complexe prenant en compte toutes les familles de structures possibles du système. Une famille de structures d'un système est caractérisée par les relations de décomposition, de couplage et de taxonomie entre entités. Une entité est un objet du monde réel qui peut être atomique ou composée. Chaque entité peut être constituée de variables représentant des paramètres du modèle correspondant.

Le modèle SES est un arbre étiqueté contenant des attributs (ou variables) qui satisfont au minimum à des axiomes définis dans (Zeigler, 1984). L'arbre SES est constitué de plusieurs types de relations, tous illustrés en figure 19 :

- ✓ une relation de type aspect, représentée par une ligne verticale, permet de définir la décomposition d'une entité en un nombre fini d'entités filles distinctes (les différents composants de l'entité mère). La spécification du couplage entre les entités filles est aussi définie au niveau de chaque nœud aspect ;
- ✓ une relation de type spécialisation, représentée par une double ligne verticale, permet de définir l'héritage. Il définit la taxonomie (spécialisation) de l'entité en des entités spécialisées.
- ✓ Une relation de type entité multiple, représentée par une triple ligne verticale, permet de définir une décomposition multiple d'une même entité (toutes les entités filles sont identiques).

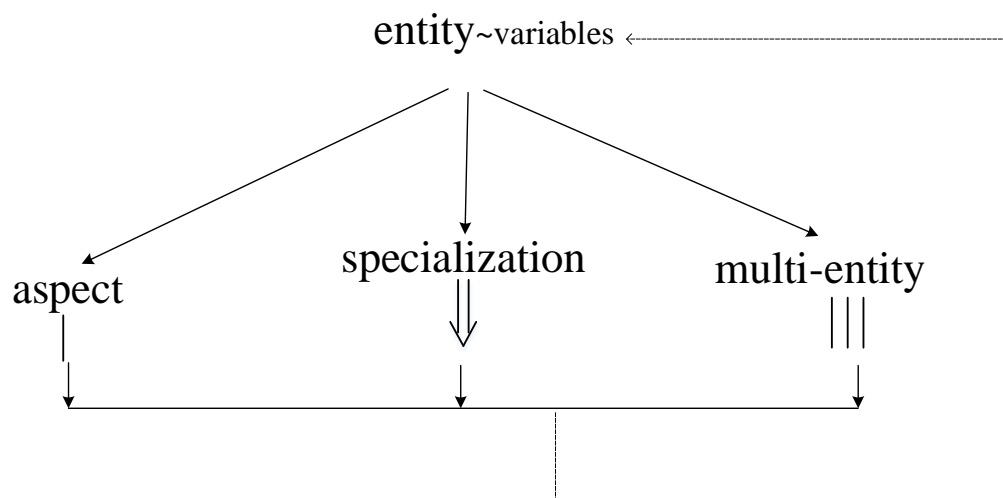


Figure 19: Concepts de SES (Ören et al., 1985)

2.4.2 MB

MB (Model Base) est l'implémentation des différents modèles des composants du système en une librairie. Les modèles implémentés peuvent être spécifiés en DEVS ou dans d'autres formalismes de M&S. La figure 20 représente la relation entre SES et MB.

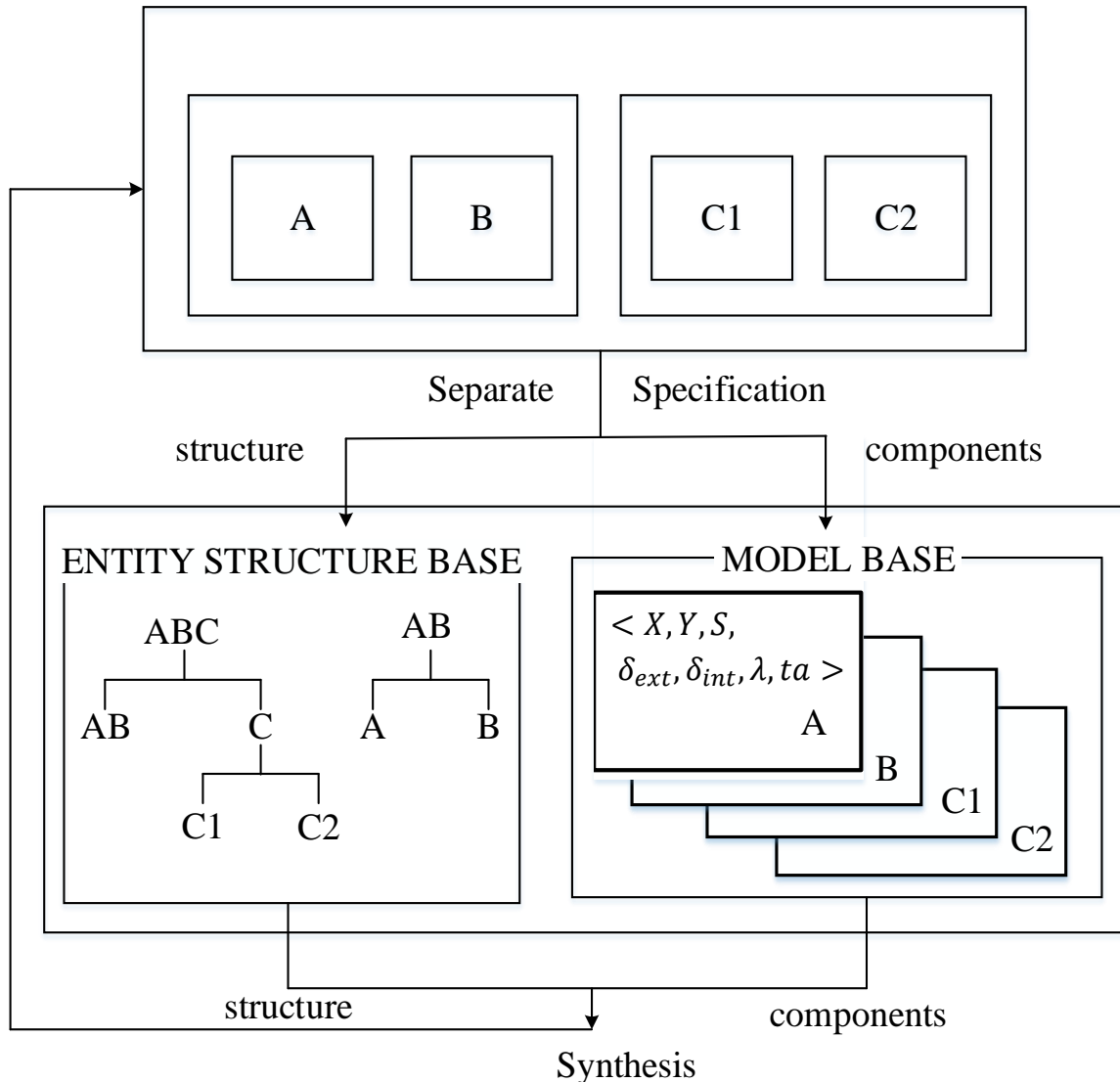


Figure 20: Relation entre SES et MB (Zeigler et al., 2000)

2.4.3 Pruning

Le pruning est processus d'instanciation de l'arbre SES. Il consiste à construire la structure réel d'un modèle de simulation du système pour répondre aux questions posées, en réduisant l'arbre global SES. Il permet d'obtenir la structure d'entité correspondante qui pourra par la suite être transformée en un arbre de composition. Le modèle global de simulation est obtenu par la synthèse qui combine l'arbre de composition avec les modèles de base de la librairie de modèles. La figure suivant représente les processus du pruning et de synthèse.

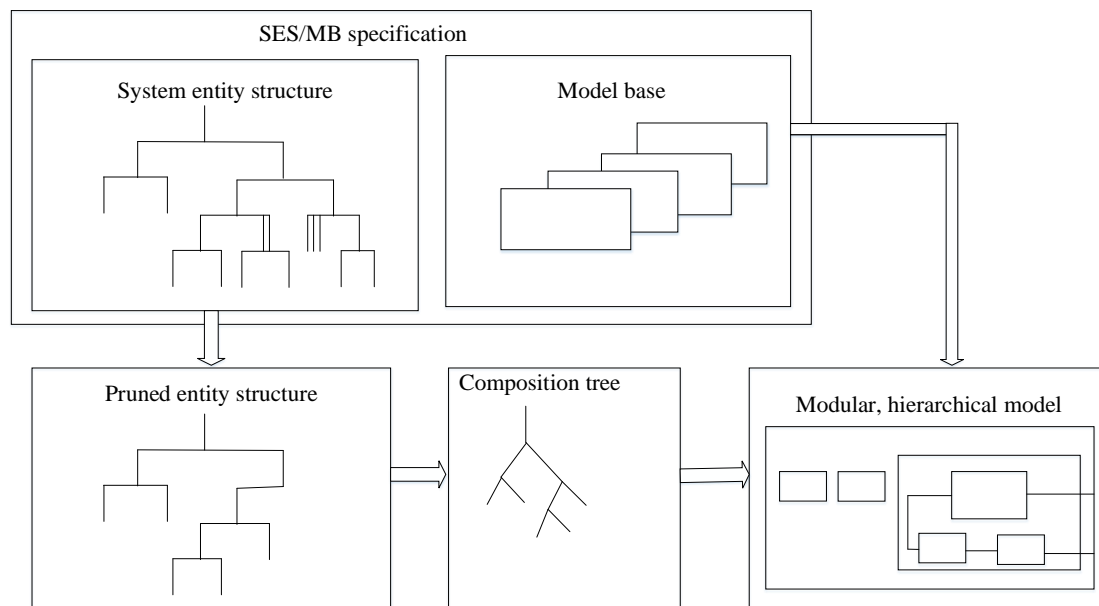


Figure 21: Méthodologie SES/MB (Wainer & Mosterman, 2016)

2.5 Approche MPM&HS

MPM&HS (Multi-Perspective Modeling and Holistic Simulation) est une approche de simulation récemment définie (Djitog et al., 2017), (Traoré et al., 2018), (Traoré, 2019), qui repose sur le principe qu'un système complexe nécessite divers niveaux de compréhension (que nous appelons perspectives ou facettes). Les niveaux de compréhension peuvent être modélisés indépendamment et combinés plus tard de manière holistique, car chaque perspective influence les autres. Une perspective est une focalisation sur certains objectifs d'un système donné.

Le concept de perspective peut être capturé à travers la notion de cadre expérimental – EF pour Experimental Frame (Zeigler, 1976), (Zeigler, 1984), qui a été formalisé dans (Traoré & Muzy, 2006). Sur un plan purement conceptuel, un EF correspond à l'ensemble des conditions dans lesquelles un modèle est une représentation valide d'un système. Il capture donc les objectifs, hypothèses et contraintes du système sous étude, et de ce fait, correspond à une perspective donnée. Sur le plan opérationnel, un EF est spécifié sous la forme d'un composant destiné à être couplé au modèle du système, afin de mener des expérimentations.

2.5.1 Ontologie générique

La première partie de l'approche MPM&HS, à savoir MPM (Multi-Perspective Modeling), repose sur l'idée que différents niveaux d'explication peuvent être obtenus pour un système donné en étudiant ce système sous différentes perspectives, chacune exprimée sous forme de EF, comme illustré par la figure 22. En d'autres termes, le même système est modélisé sous différents objectifs, hypothèses et contraintes (représentés par les différents contours autour du système complexe sur la figure 22), conduisant ainsi à plusieurs modèles chacun spécifique à une perspective et associé chacun à un EF spécifique à cette même perspective.

Les EF spécifiques sont élaborés pour fournir des réponses à des questions de nature très différente sur le même système. Par conséquent, chacun d'eux est couplé à son modèle correspondant pour en tirer des résultats intéressants dans la perspective correspondante. Il convient de noter chaque modèle spécifique à une perspective fait abstraction des influences qui sont dues à d'autres perspectives au moyen de paramètres dont les valeurs reflètent explicitement les hypothèses implicites et les simplifications faites à propos de ces influences.

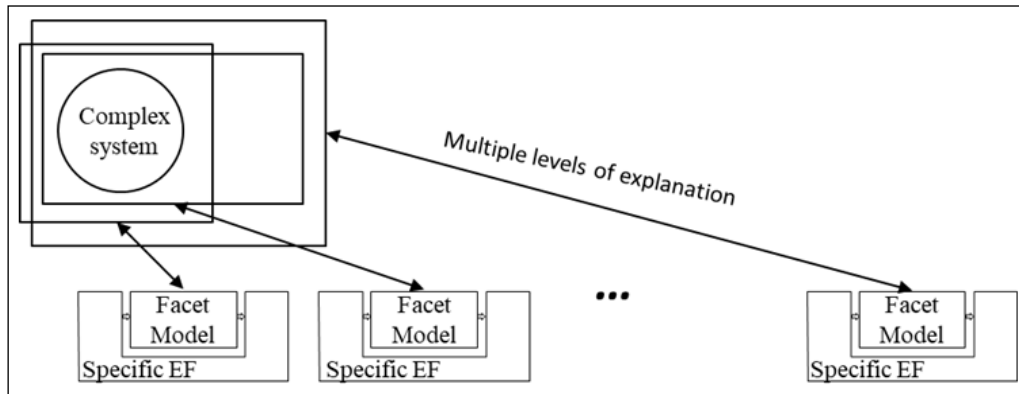


Figure 22: Approche de Modélisation Multi-Perspective

MPM&HS s'appuie sur SES/MB pour proposer une démarche rigoureuse de représentation d'une ontologie générique des systèmes complexes illustrée par la figure 23.

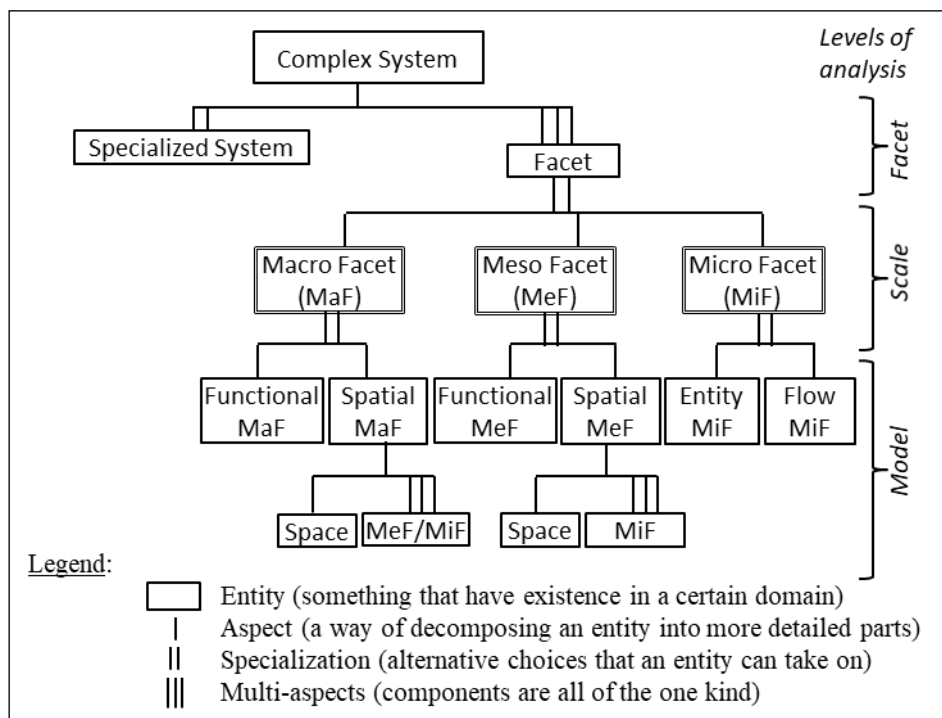


Figure 23: Ontologie générique pour les systèmes complexes (Traoré, 2019)

L'ontologie générique prévoit plusieurs spécialisations pour un même système complexe. Les spécialisations représentent les différentes catégories du système. Chaque spécialisation du système peut être représentée en 3 niveaux de spécification (facette, échelle, et modèle) :

- ✓ Le niveau facette permet d'observer chacune des spécialisations du système suivant différentes perspectives. Chaque perspective peut être observée sous différentes échelles. Chaque échelle donne lieu à plusieurs modèles conventionnels
- ✓ Le niveau échelle permet une représentation spatio-temporelle des différentes perspectives. Le niveau microscopique est la représentation la plus fine d'une entité du système. Le niveau macroscopique est la représentation la plus globale des entités du système considérées dans leur ensemble. Le niveau mésoscopique est une représentation intermédiaire entre les niveaux microscopique et macroscopique. Ce niveau considère les comportements des groupes d'entités ayant des caractéristiques communes. Il est important de noter que ces niveaux macroscopique, microscopique et mésoscopique sont inhérents à l'étude de tous les systèmes complexes (et pas seulement aux STU), et que l'ontologie générique a été proposée la première fois dans le cadre des systèmes de santé (où ces niveaux d'échelle existent également).
- ✓ Le niveau modèle est le dernier niveau de l'approche qui correspond aux différents modèles conventionnels existants dans le domaine du système complexe considéré. Les différents modèles conventionnels sont spécifiés et implémentés dans une librairie de modèles de simulation prêts à être utilisés.

2.5.2 Processus de mise en œuvre de MPM&HS

L'approche MPM&HS propose un processus de construction du modèle de simulation d'un système complexe tel que l'illustre la figure 24.

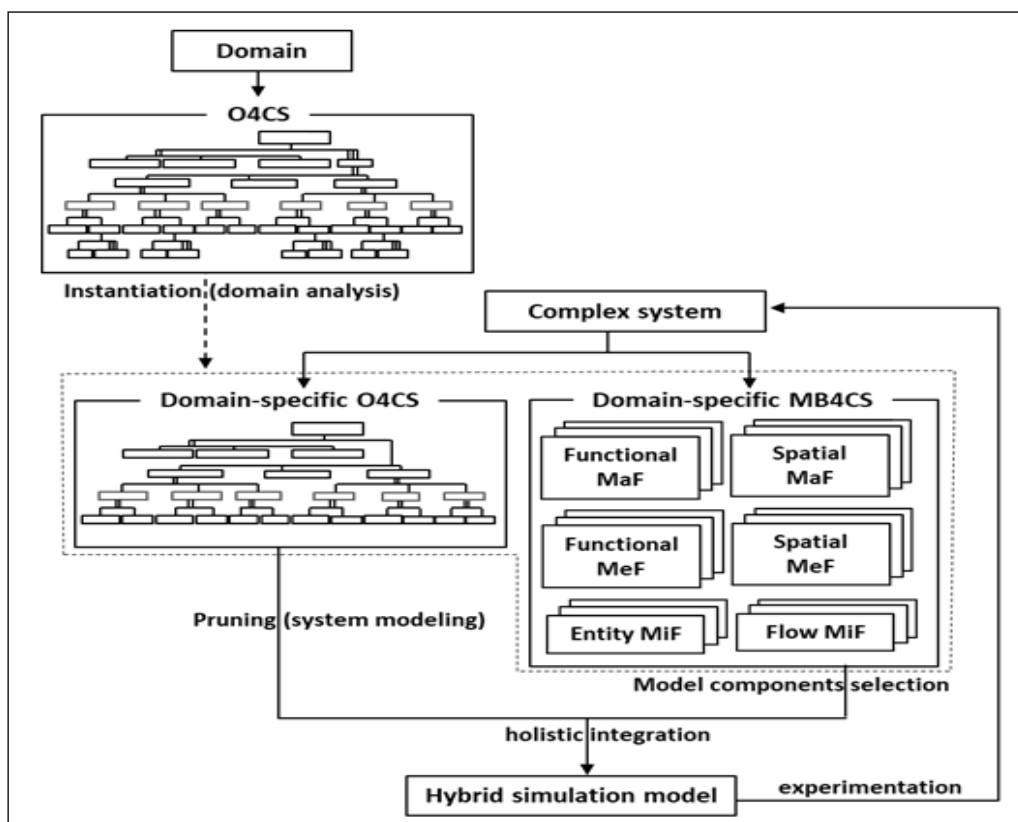


Figure 24: Processus de construction du modèle d'un système complexe (Traoré, 2019)

Ce processus consiste à construire à partir de l'ontologie générique du domaine (O4CS), l'ontologie spécifique du système à étudier (Domain-specific O4CS). La construction de la structure du modèle du système à simuler s'effectue par l'instanciation de l'ontologie spécifique du domaine d'étude et la sélection des modèles adéquats dans la librairie des modèles de composants (Domain-specific MB4CS) qui entrent dans la construction du modèle global choisi.

2.5.3 Intégration des perspectives

Pour mettre en œuvre la simulation holistique, l'approche MPM&HS propose une intégration des différentes perspectives (figure 25). Chaque modèle spécifique à une perspective est étudié dans son EF dédié, mais des intégrateurs sont définis pour lier les divers modèles entre eux afin de capturer les influences inter-perspectives. Ces liaisons utilisent le principe de l'intégration via paramètres précédemment présenté (sorties d'un modèle lié aux paramètres d'un autre).

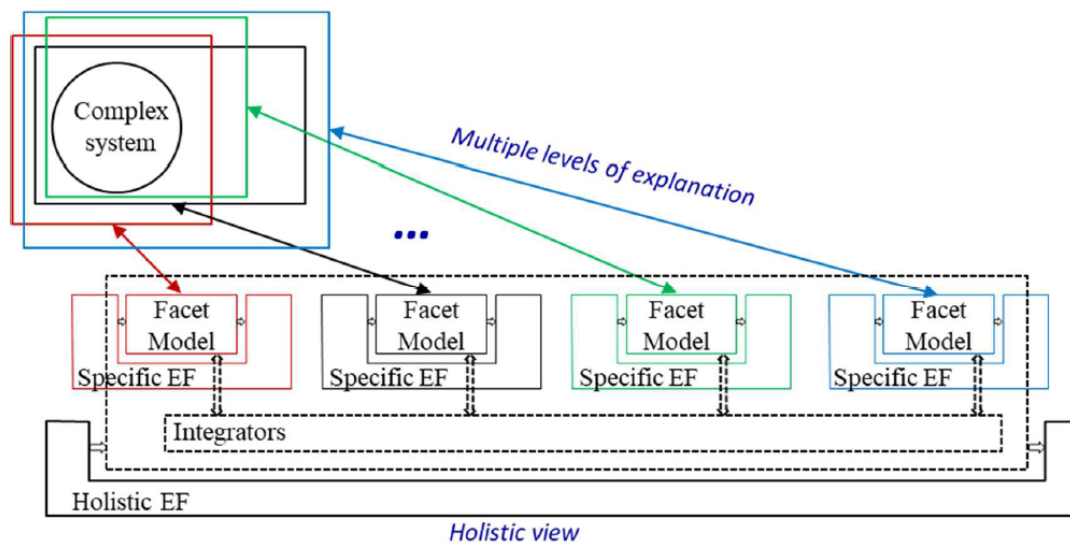


Figure 25: Principe général de l'approche MPM&HS (Traoré, 2019)

2.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les formalismes et méthodes utilisés dans le cadre de notre travail. La partie à venir se consacre à la construction de notre cadre de M&S pour l'étude des STU.

Chapitre 3. Construction de l'ontologie de M&S des STU

3.1 Introduction

Notre analyse du domaine de la M&S des STU nous amène vers l'identification et la structuration des modèles conventionnels proposés par la théorie du trafic. En s'appuyant sur l'approche MPM&HS, nous érigeons une ontologie dont nous nous servons ultérieurement pour dériver des modèles spécifiques pour des STU spécifiques à étudier. La démarche globale que nous suivons est illustrée par la figure 26.

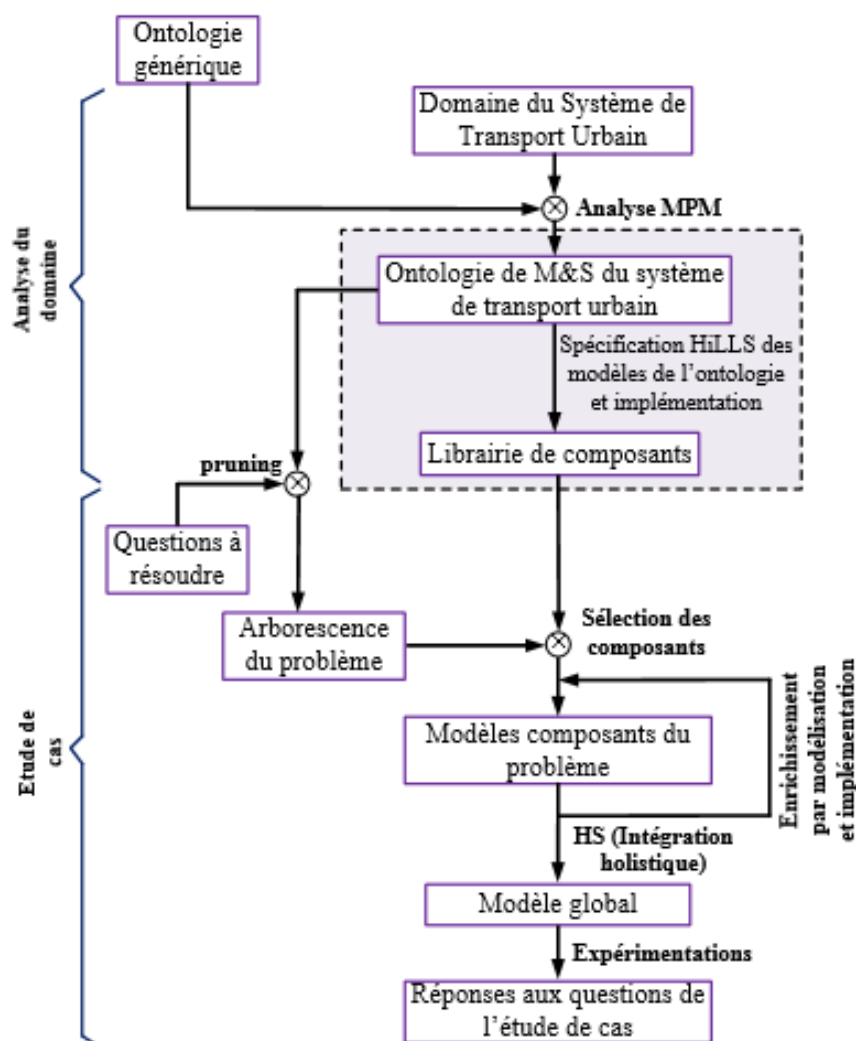


Figure 26: Démarche de construction d'un cadre de M&S des STU

Deux phases apparaissent dans cette démarche : celle de l'analyse du domaine et celle des études de cas. La première est conduite une seule fois, même si le résultat, i.e., l'ontologie du domaine, peut faire l'objet d'extensions ultérieures, alors que la seconde est conduite à chaque fois qu'une étude nouvelle d'un STU est nécessaire.

3.2 Analyse du domaine

L'instanciation de l'ontologie générique proposée par l'approche MPM&HS au domaine des STU nous conduit ici à l'ontologie spécifique. Nous détaillons ici ce processus d'instanciation. Il met en lumière différents modèles conventionnels de la théorie du trafic, dont nous proposons la spécification avec HiLLS. Ces modèles seront ensuite implémentés dans une librairie, d'où nous choisirons les composants adéquats lors de chaque étude ultérieure d'un STU particulier donné.

Notre ontologie spécifique, représentée par la figure 30, est structurée autour de quatre niveaux d'organisation des connaissances du domaine des STU, conformément à l'architecture de l'ontologie générique : le niveau système, le niveau perspective (ou niveau facette), le niveau échelle, et le niveau modèle.

3.2.1 Niveau système

Le niveau système définit les différentes catégories de STU qui peuvent exister dans une agglomération urbaine. Nous distinguons :

- ✓ le trafic piéton, qui s'intéresse entre autres à la mise en place des trottoirs, passages piétons, et autres infrastructures piétonnières, et aux mécanismes mis en œuvre pour leur fonctionnement;
- ✓ le trafic des deux roues (motos et vélos) qui s'intéresse à la création des voies pour les deux roues et aux différents mécanismes de leur gestion des deux routes;
- ✓ le trafic automobile, i.e., les voitures particulières (VP) et les poids lourds (PL), qui s'intéresse à la régulation et l'optimisation du trafic routier principal ;
- ✓ le trafic de transport public qui s'intéresse à la mise en place des voies de transport public et les mécanismes de gestion qui en découlent.

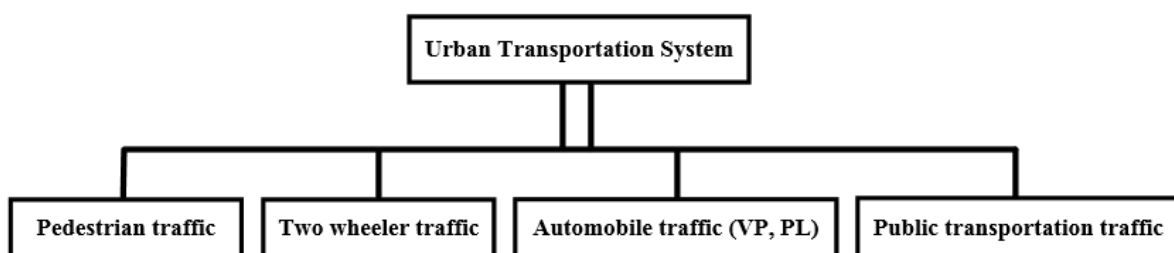


Figure 27: Niveau système de l'ontologie pour la M&S des STU

Le niveau système correspond à la spécialisation des systèmes de transport urbain. La figure 27 donne un récapitulatif de ces spécialisations. Cette branche de l'ontologie spécifie bien qu'un STU spécifique peut faire cohabiter plusieurs de ces catégories (relation de composition entre « Urban Transportation System » et les différentes spécialisations).

3.2.2 Niveau perspective

Les perspectives représentent les différents niveaux d'explication du système de transport. Nous identifions trois perspectives : consommation, production, et coordination.

- ✓ La perspective consommation permet d'observer et d'analyser le système du point de vue des usagers (consommation des ressources) du STU. En d'autres termes, c'est le point de vue des services disponibles de transport urbain.
- ✓ La perspective production permet d'étudier le système du point de vue de la production des ressources et des services fournis par le STU. En d'autres termes, c'est le point de vue des infrastructures disponibles de transport urbain.
- ✓ La perspective coordination permet d'étudier le système comme une coordination des perspectives de consommation et de production.

La figure 28 présente l'instanciation de l'ontologie générique aux niveaux système et perspective pour les STU.

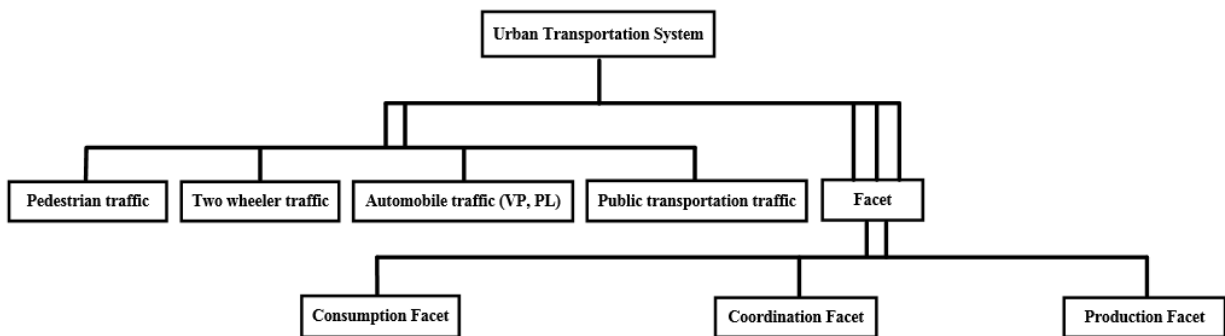


Figure 28: Niveaux Système et Perspective de l'ontologie pour la M&S des STU

3.2.3 Niveau échelle

Le niveau échelle définit les différents types d'échelles spatio-temporelles des systèmes de transport. Nous avons principalement trois niveaux d'échelle : microscopique, mésoscopique et macroscopique. Ces types d'échelles peuvent être observés dans chacune des différentes perspectives (consommation, production ou coordination).

- ✓ L'échelle microscopique correspond à un niveau de représentation fine du STU. Elle est basée sur la représentation de chaque individu (entité ou flux) considérée isolément et de ses interactions avec les autres entités. La dynamique du système émerge de celles des différentes entités dans leurs interactions collectives.
- ✓ L'échelle macroscopique correspond à un niveau de représentation globale du STU. Elle est basée sur la population entière et non sur les individus qui la composent.
- ✓ L'échelle mésoscopique correspond à une représentation intermédiaire du STU, où des cohortes d'entités sont considérées (convois de véhicules, pelotons de bande verte, etc.). Cette échelle de représentation fait intervenir moins de détails du système que dans une échelle microscopique mais contient plus de détails qu'une échelle macroscopique.

La figure 29 présente l'instanciation de l'ontologie générique aux niveaux système, perspective, et échelle, pour les STU.

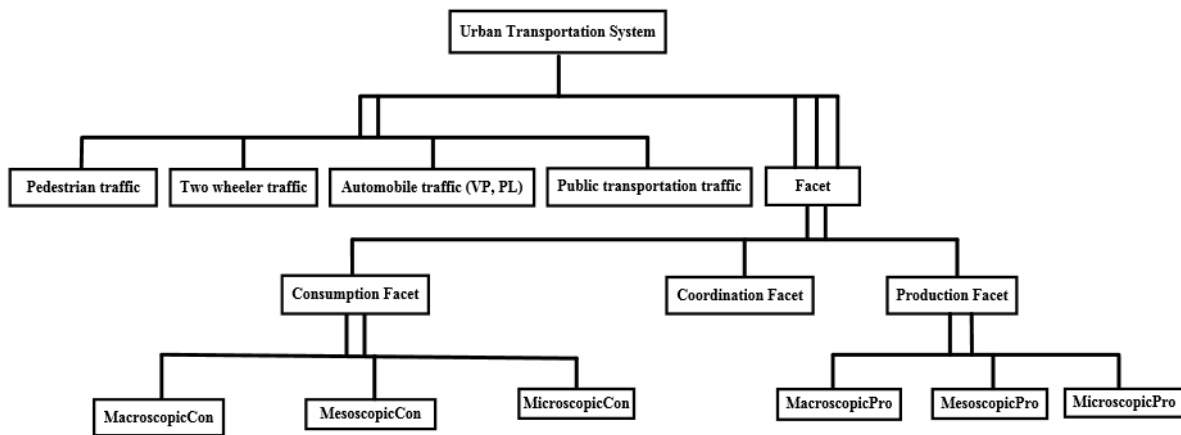


Figure 29: Niveaux Système, Perspective et Echelle de l'ontologie pour la M&S des STU

3.2.4 Niveau modèle

C'est à ce niveau que les différents modèles conventionnels sont pris en compte dans l'ontologie. Les modèles de la théorie du trafic sont repartis entre les différents niveaux d'échelle des perspectives :

- ✓ Un modèle microscopique peut être un modèle d'entité (individu ou flux). Un individu est représenté par la description de ses caractéristiques et de son comportement. Un flux est représenté par l'ensemble des scénarios de comportements possibles de l'entité. Il existe plusieurs types d'entités : les piétons, les véhicules, et les deux roues. Chaque type d'entité correspond à des familles de modèles de trafic. Les modèles microscopiques conventionnels que la littérature propose sont ceux présentés dans le chapitre consacré à l'état de l'art, à savoir, les modèles de poursuite (modèle de Chandler, modèle GHR, modèle de vitesse optimale, etc.) et les modèles de changement de voie (modèle de Gipps, MOBIL, etc.).
- ✓ Un modèle macroscopique peut être spatial ou fonctionnel. Un modèle macroscopique spatial décrit la dynamique du système par la représentation de l'espace contenant des modèles mésoscopiques ou des modèles microscopiques. Un modèle macroscopique fonctionnel décrit la dynamique du système par des équations mathématiques fonctionnelles (équations différentielles, généralement).
- ✓ Un modèle mésoscopique peut être spatial ou fonctionnel. Un modèle mésoscopique spatial décrit la dynamique du système par la représentation de l'espace contenant des modèles microscopiques. Un modèle mésoscopique fonctionnel décrit la dynamique du système par des équations mathématiques fonctionnelles.

La figure 30 récapitule l'ontologie spécifique du domaine de STU. Sur cette figure, les différents modèles conventionnels constituent les feuilles de l'ontologie.

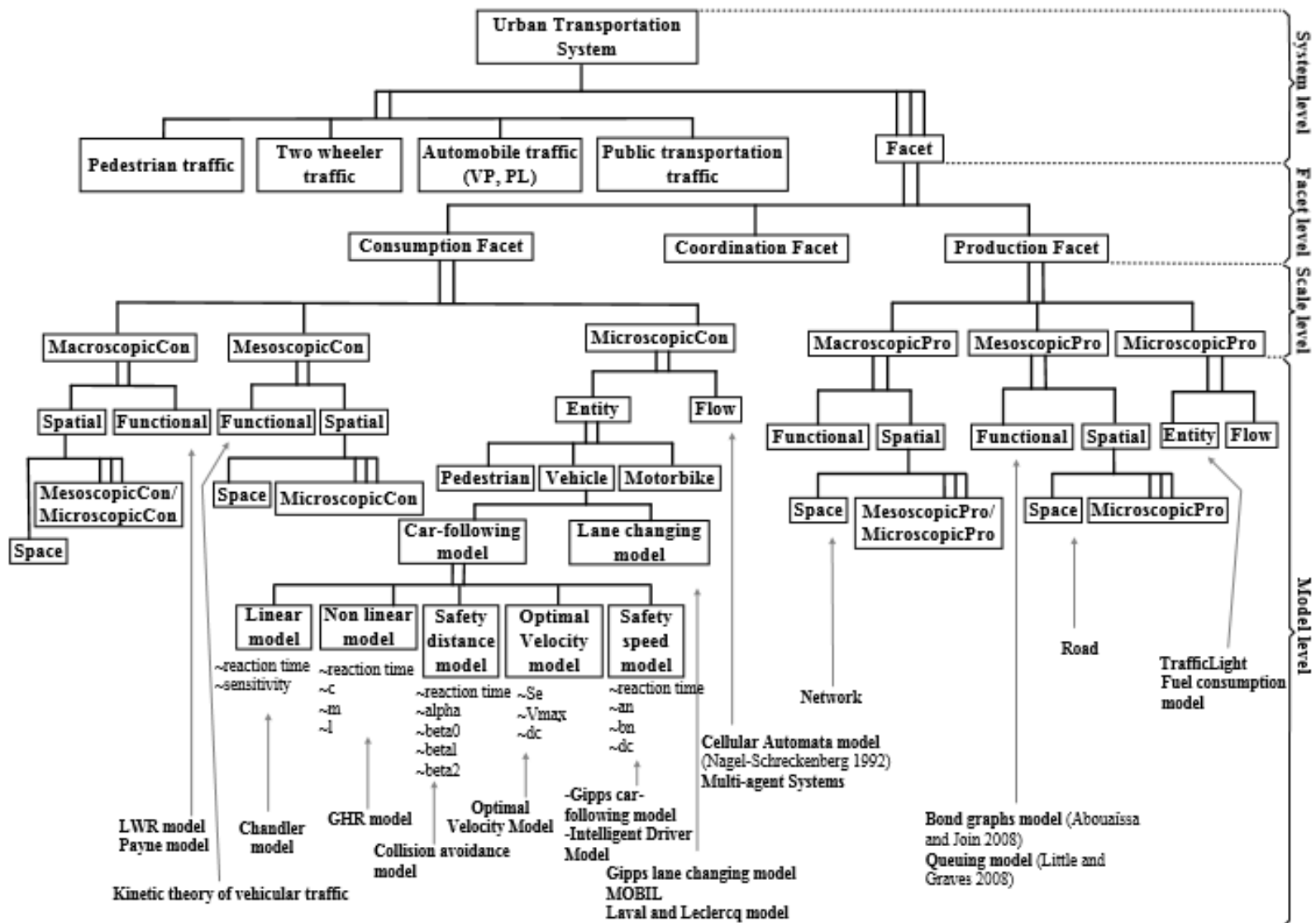


Figure 30: Ontologie pour la M&S des STU

3.3 Spécification de fiche de véhicule

Nous spécifions dans le formalisme HiLLS les différents modèles qui servent de base de connaissances pour notre de cadre de M&S des STU. Un élément central dans la communication entre ces différents modèles est la notion de fiche, i.e., la carte d'identité d'un véhicule. La figure 31 donne un aperçu des informations d'une fiche liée à un véhicule.

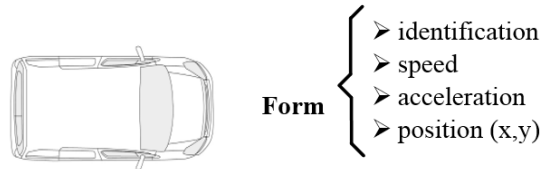


Figure 31: Aperçu des informations d'une fiche de voiture

Ainsi, une fiche est constituée d'un ensemble de variables qui contiennent des caractéristiques du véhicule et d'un ensemble d'opérations permettant d'agir sur les variables. Parmi ces variables nous avons :

- ✓ identification : un nombre entier pour identifier un véhicule;
- ✓ speed : un nombre réel pour contenir la vitesse du véhicule;
- ✓ acceleration : un nombre réel pour contenir l'accélération;
- ✓ xposition : un nombre réel pour contenir la position sur l'axe des x;
- ✓ yposition : un nombre réel pour contenir la position sur l'axe des y;
- ✓ authorization : une valeur booléenne pour contenir l'autorisation de sortir d'une voie.

Une fiche est spécifiée dans le formalisme HiLLS par une classe HiLLS (HClass) représentée par la figure 32.

| Form | | |
|--|--|---|
| identification : \mathbb{N} speed : \mathbb{R} acceleration : \mathbb{R} xposition : \mathbb{R} yposition : \mathbb{R} authorization : boolean | | |
| [+] setId [id : String] [] identification' = id | [+] setAcceleration [acc : \mathbb{R}] [] acceleration' = acc | [+] initialize [id : \mathbb{N}] [] identification' = id; speed = 0; acceleration = 0; xposition = 0; yposition = 0; authorization = false; |
| [+] getId [] [String] out! = identification | [+] getAcceleration [] [\mathbb{R}] out! = acceleration | [+] getAuthorization [] [boolean] out! = authorization |
| [+] setSpeed [spd : \mathbb{R}] [] speed' = spd | [+] setXposition [pos : \mathbb{R}] [] xposition' = pos | [+] getAuthorization [] [boolean] out! = authorization |
| [+] getSpeed [] [\mathbb{R}] out! = speed | [+] getXposition [pos : \mathbb{R}] [] out! = xposition | [+] setAuthorization [auth : boolean] [] authorization' = auth |
| [+] setYposition [pos : \mathbb{R}] [] yposition' = pos | [+] getYposition [] [\mathbb{R}] out! = yposition | |

Figure 32: Spécification d'une fiche d'information

3.4 Spécification des modèles conventionnels

3.4.1 Modèle de Chandler

Le modèle de poursuite de (Chandler et al., 1958), qui décrit la dynamique du couple véhicule-conducteur, et qui est exprimé en fonction de la vitesse du véhicule leader $n - 1$ et de celle du véhicule suiveur n défini par l'équation ci-après, est modélisé en HiLLS par la figure 33 :

$$\ddot{x}_n(t + T_r) = \lambda \times [\dot{x}_{n-1}(t) - \dot{x}_n(t)]$$

Où :

$\ddot{x}_n(t + T_r)$ est l'accélération du véhicule suiveur n ayant un temps de réaction T_r ;

T_r , est le temps de réaction du conducteur du véhicule suiveur n ;

$\dot{x}_{n-1}(t)$ est la vitesse du véhicule leader $n - 1$;

$\dot{x}_n(t)$ est la vitesse du véhicule suiveur n ;

λ est la sensibilité du conducteur par rapport à son environnement.

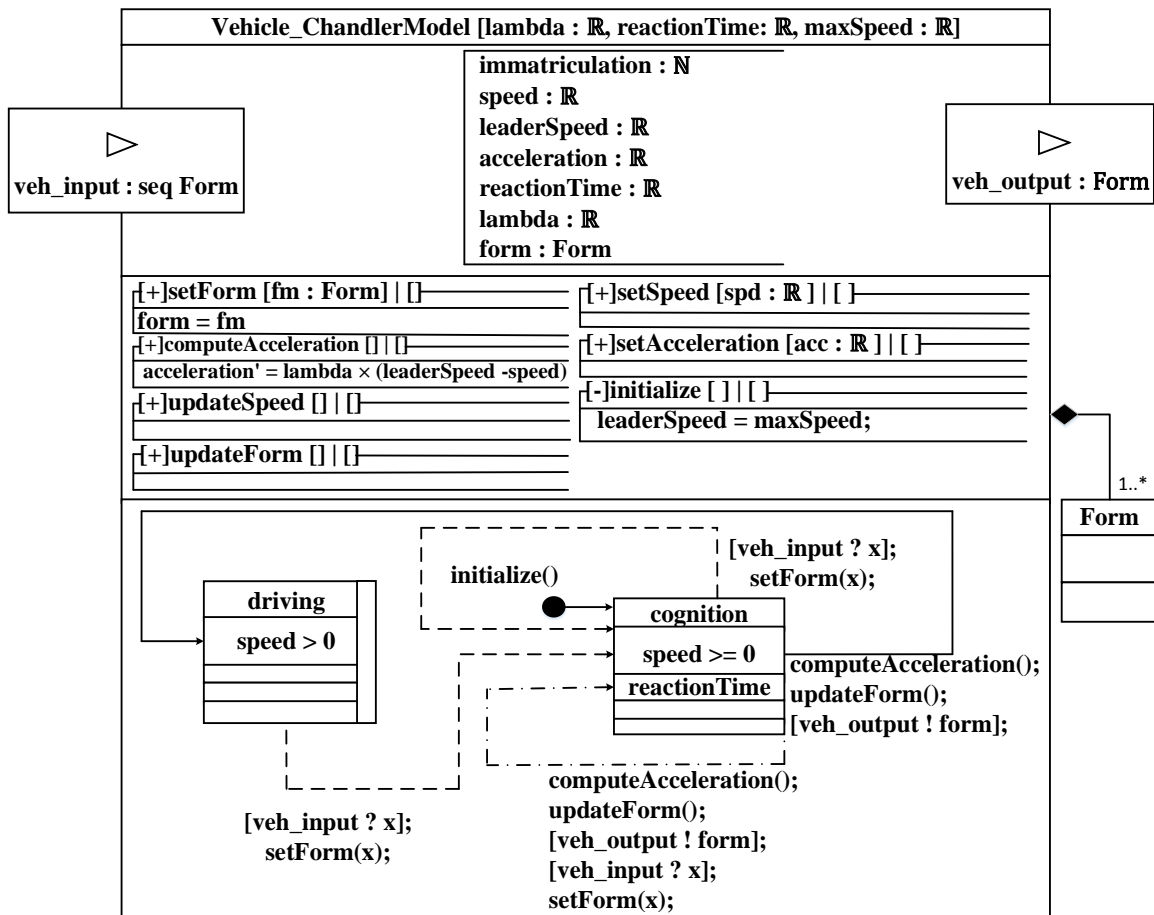


Figure 33: Spécification HiLLS du modèle de Chandler

Le port d'entrée `veh_input` permet au véhicule de recevoir les informations de son environnement. Cet environnement est constitué d'un ensemble de fiches d'information des autres véhicules dans la même voie que le véhicule en question. Le port de sortie `veh_output` permet au véhicule d'envoyer sa fiche d'information à son environnement.

Le paramètre lambda, qui représente la sensibilité du conducteur, ainsi que le paramètre reactionTime, qui représente le temps de réaction du conducteur, caractérisent des éléments majeurs du comportement supposé du conducteur face à une situation de prise de décision ; le paramètre maxSpeed est la vitesse maximale du véhicule.

Le modèle possède plusieurs variables, permettant de mémoriser son immatriculation (pour une identification unique), sa vitesse courante, celle du véhicule leader, son accélération courante, celle du véhicule suiveur, son temps de réaction courant, sa sensibilité courante, et sa fiche d'information. Le modèle possède également un ensemble d'opérations de manipulation de ses variables (accélérer, décélérer, etc.). Enfin, le comportement du modèle est caractérisé par deux configurations : driving, qui correspond à un état stable du véhicule durant lequel son accélération reste inchangée, et cognition, qui correspond à un état actif du véhicule où une prise de décision intervient.

Vehicle_ChandlerModel démarre à une configuration initiale cognition. Il reste dans cette configuration qui a une durée égale à son temps de réaction (reactionTime). Dans la configuration cognition, lorsque le véhicule reçoit l'ensemble des fiches sur son port d'entrée veh_input, il enregistre la liste des fiches avec l'opération setForm, met à jour sa fiche actuelle, et reste dans cette même configuration. A la fin de la durée de cette configuration la nouvelle accélération est calculée avec l'opération computeAcceleration qui utilise le modèle de (Chandler et al. 1958) pour obtenir la valeur de l'accélération. Le véhicule met alors à jour sa fiche d'information avec l'opération updateForm et l'envoie sur son port de sortie veh_output. Lorsque que le véhicule envoie sa fiche sur la sortie, il passe à la configuration driving qui a une durée indéterminée. A la réception des fiches sur le port d'entrée veh_input dans la configuration passive, le véhicule enregistre les fiches avec l'opération setForm et passe à la configuration active.

3.4.2 Modèle de Gipps

Gipps (Gipps, 1981) propose un modèle basé sur la vitesse de sécurité d'un véhicule n par rapport au véhicule leader $n - 1$. La vitesse de sécurité est liée à deux composantes dépendant du comportement du conducteur : l'accélération et la décélération du véhicule. L'équation de la vitesse est établie en prenant le minimum entre les deux composantes et s'obtient par l'équation suivante :

$$v_n(t + \tau) = \min \left\{ v_n(t) + 2.5 \times a_n \times \tau \times \left(1 - \frac{v_n(t)}{V_n}\right) \times \sqrt{0.025 + \frac{v_n(t)}{V_n}}, b_n \times \tau + \sqrt{\left(b_n^2 \times \tau^2 - b_n \times \left[2 \times [x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - v_n(t) \times \tau - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{b}} \right] \right)} \right\}$$

Où :

- ✓ a_n : est l'accélération maximum du conducteur de véhicule n ;
- ✓ b_n : est le plus sévère freinage (décélération) du conducteur du véhicule n ($b_n < 0$);
- ✓ s_n : est la taille effective du véhicule n , la longueur réel du véhicule plus une marge ;
- ✓ V_n : est la vitesse désirée du conducteur du véhicule n ;

- ✓ $x_n(t)$: est la position de l'avant du véhicule n à l'instant t ;
- ✓ $v_n(t)$: est la vitesse du véhicule n à l'instant t ;
- ✓ τ : est le temps de réaction du conducteur, qui est constant pour tous les véhicules ;
- ✓ \hat{b} : est l'estimation de la décélération du véhicule leader $n - 1$.

Nous spécifions le modèle de (Gipps,1981) par un système HiLLS représenté par la figure 34.

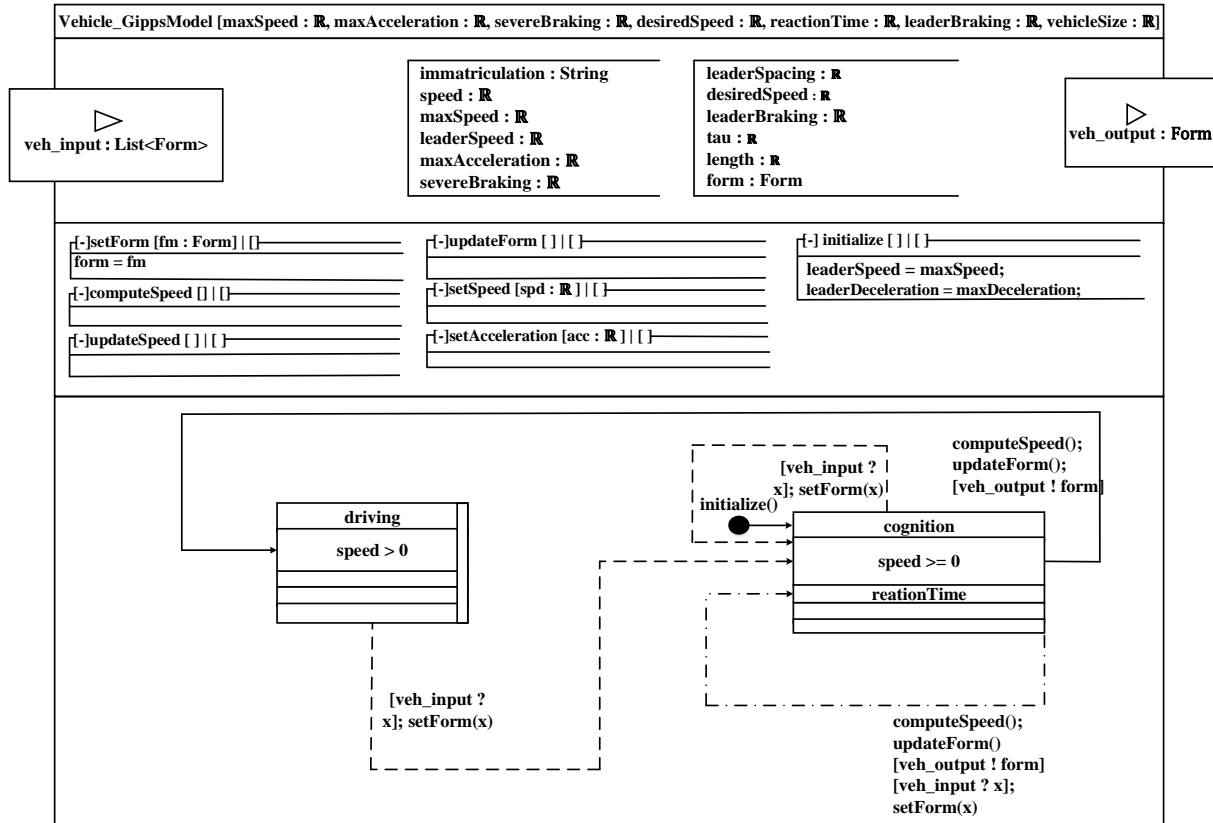


Figure 34: Spécification HiLLS du modèle de Gipps

3.4.3 Modèle OVM

Le modèle OVM (**Optimal Velocity Model**) (Bando et al., 1995a), (Bando et al., 1995b) est représenté par la relation suivante :

$$\ddot{x}_n = a \{V(\Delta x_n) - \dot{x}_n\}$$

Où :

- ✓ $\Delta x_n = x_{n+1} - x_n$: est la distance entre le véhicule de devant $n + 1$ et le véhicule suiveur n à l'instant t ;
- ✓ a : est une constante qui représente la sensibilité de chaque conducteur ;
- ✓ $V(\Delta x_n)$: est la vitesse optimale du véhicule n dépendant de Δx_n

$$V(\Delta x) = V_0 [\tanh m (\Delta x - b_f) - \tanh m (b_c - b_f)]$$

Nous spécifions le modèle OVM par un système HiLLS représenté par la figure 35.

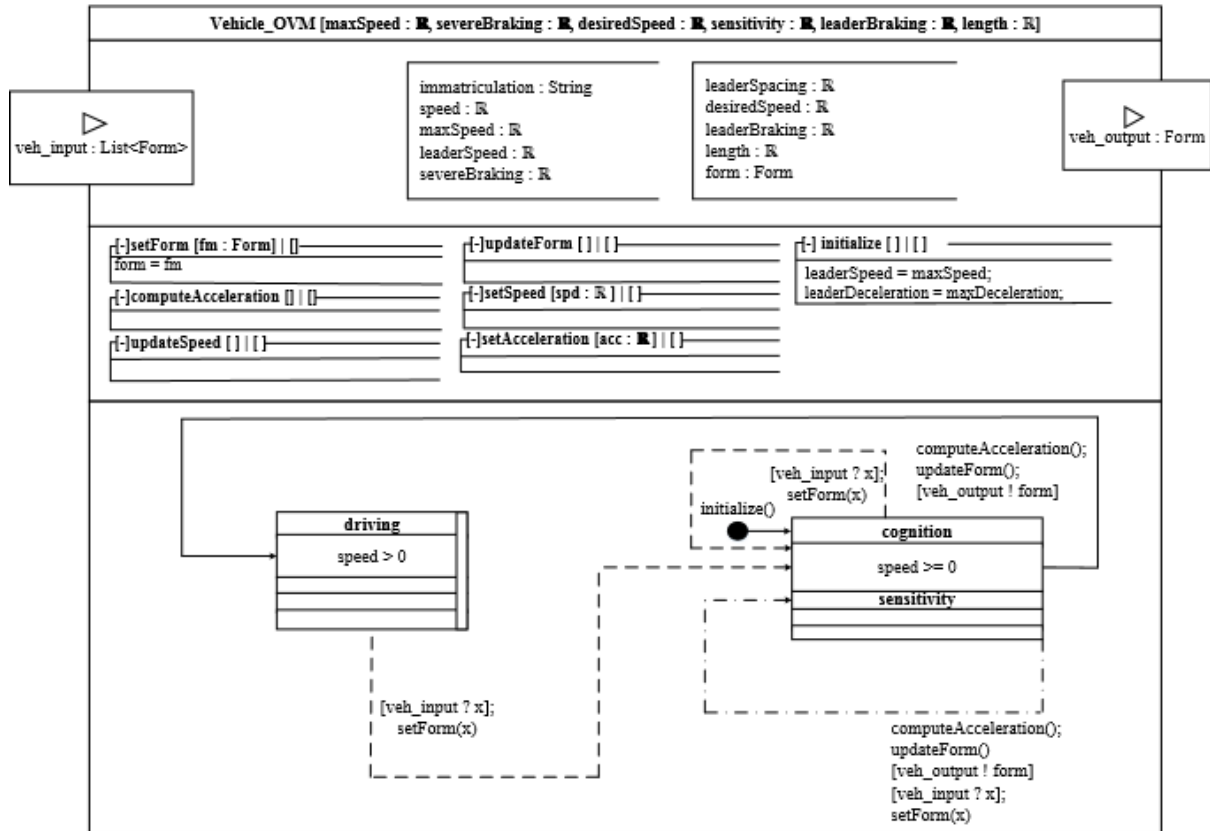


Figure 35: Spécification HiLLS du modèle de OVM

3.4.4 Modèle IDM

Le modèle IDM (Intelligent Driver Model) (Treiber et al., 2000) définit l'accélération du véhicule n par rapport au leader $n - 1$ par une fonction continue basée sur la vitesse v_n , l'inter-distance s_n et la vitesse relative Δv_n par l'équation suivante :

$$\dot{v}_n = a^{(n)} \times \left[1 - \left(\frac{v_n}{v_0^{(n)}} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v_n, \Delta v_n)}{s_n} \right)^2 \right]$$

$$s^*(v_n, \Delta v_n) = s_0^{(n)} + s_1^{(n)} \times \sqrt{\frac{v_n}{v_0^{(n)}}} + T^{(n)} \times v_n + \frac{v_n \times \Delta v_n}{2 \times \sqrt{a^{(n)} \times b^{(n)}}}$$

Où :

- ❖ $a^{(n)}$: est l'accélération maximum du véhicule n ;
- ❖ v_n : est la vitesse du véhicule n ;
- ❖ Δv_n : est la vitesse relative du véhicule n par rapport à son leader $n - 1$;
- ❖ $v_0^{(n)}$: est la vitesse désirée du véhicule n ;
- ❖ s_n : est l'inter-distance nette entre les véhicules n et $n - 1$; $s_n = \Delta x_n - L_{n-1}$;
- ❖ $s^*(v_n, \Delta v_n)$: est l'inter-distance optimale du véhicule n ;
- ❖ T : est le temps inter-véhiculaire minimum ;
- ❖ δ : est l'exposant de l'accélération ;

❖ s_0 et s_1 : sont deux distances caractérisant l'état de la congestion.

Nous spécifions le modèle IDM par un système HiLLS représenté par la figure 36.

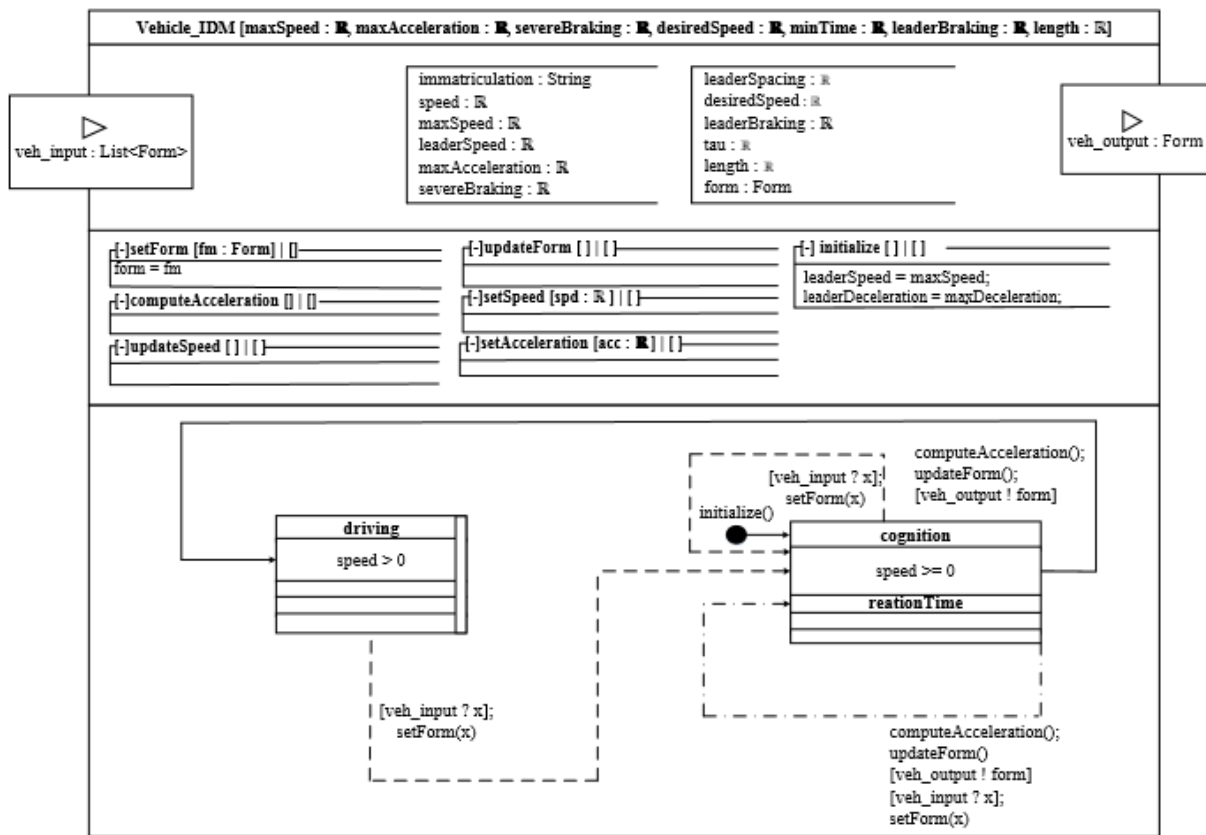


Figure 36: Spécification HiLLS du modèle de IDM

3.5 Spécification des modèles non conventionnels

Certains composants essentiels à la M&S des STU ne sont pas des modèles conventionnels dans la littérature. Ce sont pourtant des composants standards, de par leur récurrence dans les modèles de STU, surtout au niveau microscopique. Nous en avons spécifié quatre en HiLLS : la voie, le feu tricolore, le générateur de véhicules, et l'accumulateur de véhicules.

3.5.1 Route microscopique

Une route microscopique est un système HiLLS caractérisé par deux ports d'entrée et deux ports de sortie.

Les ports d'entrée sont :

- ✓ Un premier port d'entrée `outAuthorization` qui permet à la route de recevoir l'autorisation de sortie. L'autorisation de sortie reçoit des valeurs de type booléen : `true` pour une autorisation de sortie accordée et `false` pour une autorisation de sortie non accordée.

- ✓ Un deuxième port d'entrée vehicleBehavior qui est utilisé par la route pour recevoir la fiche d'information de chaque véhicule. Ce port utilise les données de type Form (fiche d'information du véhicule).

Les ports de sortie sont :

- ✓ Un premier port de sortie inAuthorization qui permet à la route d'envoyer une autorisation d'entrée. L'autorisation d'entrée reçoit des valeurs de type booléen : true pour une autorisation d'entrée accordée et false pour une autorisation d'entrée non accordée.
- ✓ Un deuxième port de sortie vehiclesEnvironment qui permet à la route d'envoyer la liste des fiches des véhicules en son sein. Ce port utilise les données de type seq Form (une séquence de fiches d'information du véhicule).

Le modèle de la route microscopique MicroRoad est caractérisé par les paramètres suivants :

- ✓ capacity, est la capacité de la route en nombre de véhicules ;
- ✓ roadLength, est la longueur de la route ;
- ✓ lanesNumber, est le nombre de voies de la route ;
- ✓ roadMaxSpeed, est la vitesse maximale autorisée sur la route.

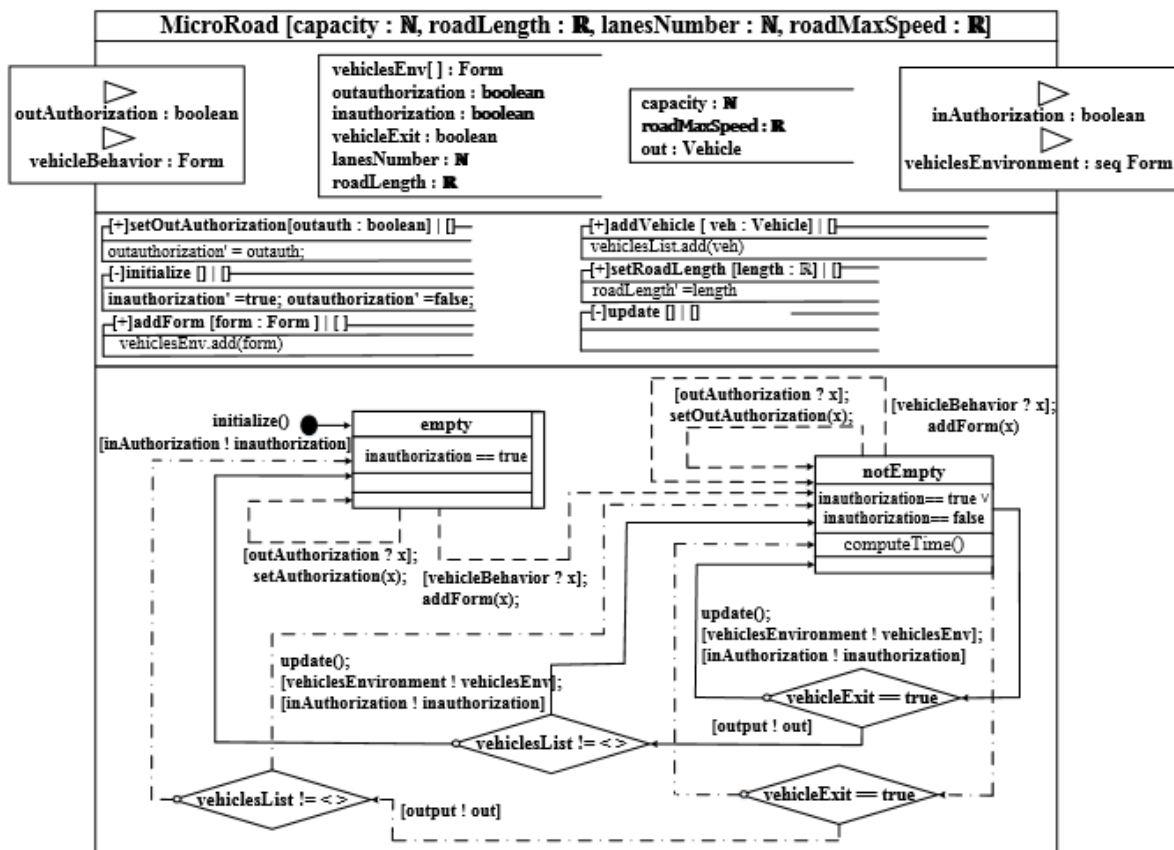


Figure 37: Spécification HiLLS d'une route microscopique

MicroRoad comporte plusieurs variables : vehiclesEnv, une liste de fiches d'information pour les différents véhicules de la route; outAuthorization, une valeur booléenne pour stocker la valeur de l'autorisation de sortie; inAuthorization, une valeur booléenne pour stocker la valeur de l'autorisation d'entrée; vehicleExit, une valeur booléenne qui permet à la route de savoir si

véhicule est arrivé à sa sortie. MicroRoad possède un ensemble d'opérations représentées dans le troisième compartiment et un comportement représenté dans le quatrième compartiment de la figure 37. Le quatrième comportement du MicroRoad comporte deux configurations : empty, qui correspond à un état stable de la route d'une durée indéterminée. L'autorisation d'entrée est toujours à true; notEmpty, qui correspond à un état actif de la route d'une durée finie déterminée par la fonction computeTime().

MicroRoad a une configuration d'initialisation empty, dans laquelle il reste indéfiniment tant qu'aucun véhicule n'arrive. Lorsqu'elle reçoit une fiche d'information sur son port d'entrée vehicleBehavior, elle l'enregistre avec l'opération setForm, met à jour la liste de ses fiches, puis passe dans la configuration notEmpty. A la fin de la durée de la configuration notEmpty, la route vérifie si un véhicule est arrivé à la sortie de la route. En fonction de la valeur de la variable vehicleExit, elle peut décider d'envoyer ou pas la fiche d'information d'un véhicule sur son port de sortie. Lorsque la variable vehicleExit est à true, cela signifie qu'un véhicule est arrivé à la sortie. La route vérifie si la liste des fiches d'information est vide alors elle passe à la configuration empty sinon elle reste dans la configuration notEmpty.

3.5.2 Feu tricolore

Un feu tricolore est spécifié par le modèle HiLLS de la figure 38.

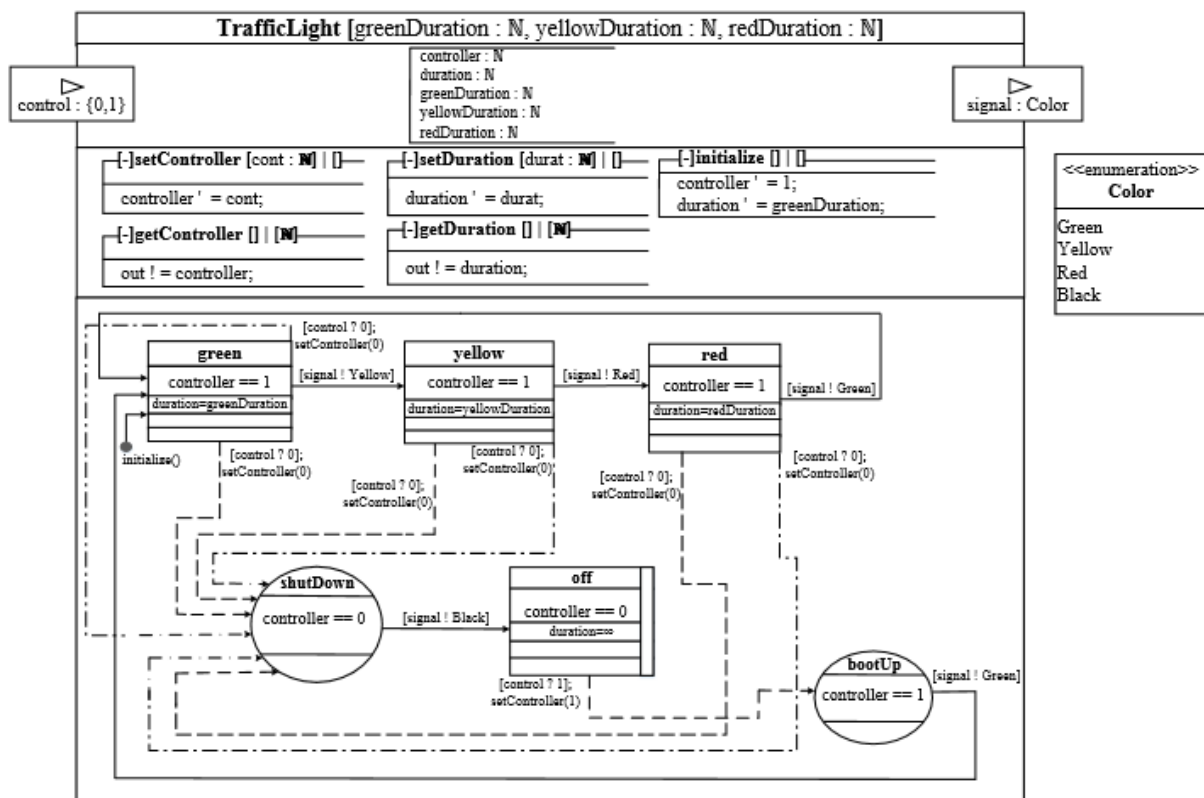


Figure 38: Spécification HiLLS du feu tricolore

Si le feu de signalisation est éteint, la couleur affichée est le noir. Le feu de signalisation a un contrôleur (port control) qui permet de le mettre en marche ou de le désactiver. Le port signal constitue le port de sortie unique, ce qui permet d'envoyer la couleur du feu tricolore. Les

différentes configurations du modèle de feux tricolores sont : off, green, yellow, red, shutDown, bootUp. Les configurations shutDown et bootUp sont des configurations transitoires, c'est-à-dire que leur durée de vie est nulle. Pour toute configuration différente de off, quand le feu tricolore reçoit l'événement externe de valeur 0, il effectue une transition externe pour passer à la configuration d'arrêt dans laquelle il envoie Black en sortie avant d'effectuer une transition interne immédiatement pour passer à la configuration off. En étant en configuration off, s'il reçoit un événement externe de valeur 1, il effectue une transition externe vers la configuration bootUp avant d'effectuer une transition interne vers la configuration green. Sans événement externe, le feu de circulation passe de green à yellow, de yellow à red et de red à green en continu.

3.5.3 Générateur microscopique de véhicules

Les générateurs microscopiques permettent de générer les véhicules sur les différentes routes du réseau. Un générateur microscopique est un système HiLLS (Figure 39) qui injecte à chaque instant un nouveau véhicule sur une route.

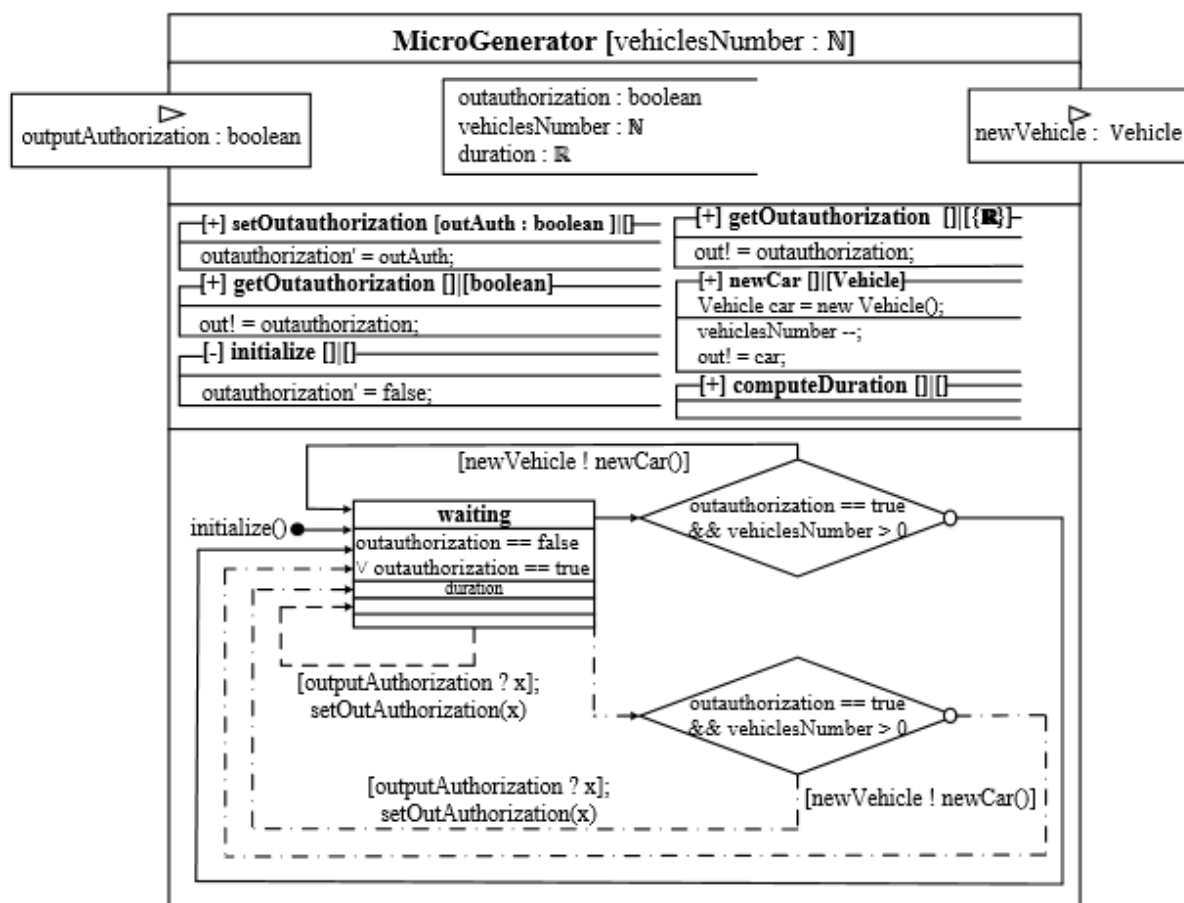


Figure 39: Spécification HiLLS d'un générateur microscopique de véhicules

Le générateur microscopique a un port d'entrée `outputAuthorization` qui lui donne l'autorisation d'injecter ou pas un véhicule sur une route. Le port `newVehicle` constitue le port

de sortie du générateur. Ce port lui permet d'envoyer le nouveau véhicule. Le générateur a une seule configuration waiting. En fonction de la valeur reçue sur son port d'entrée outputAuthorization, le générateur peut injecter un nouveau véhicule ou rester en attente d'autorisation.

3.5.4 Accumulateur microscopique de véhicules

Les accumulateurs microscopiques permettent de récupérer les véhicules à la sortie des routes. Un accumulateur microscopique est décrit par le modèle HiLLS de la figure 40.

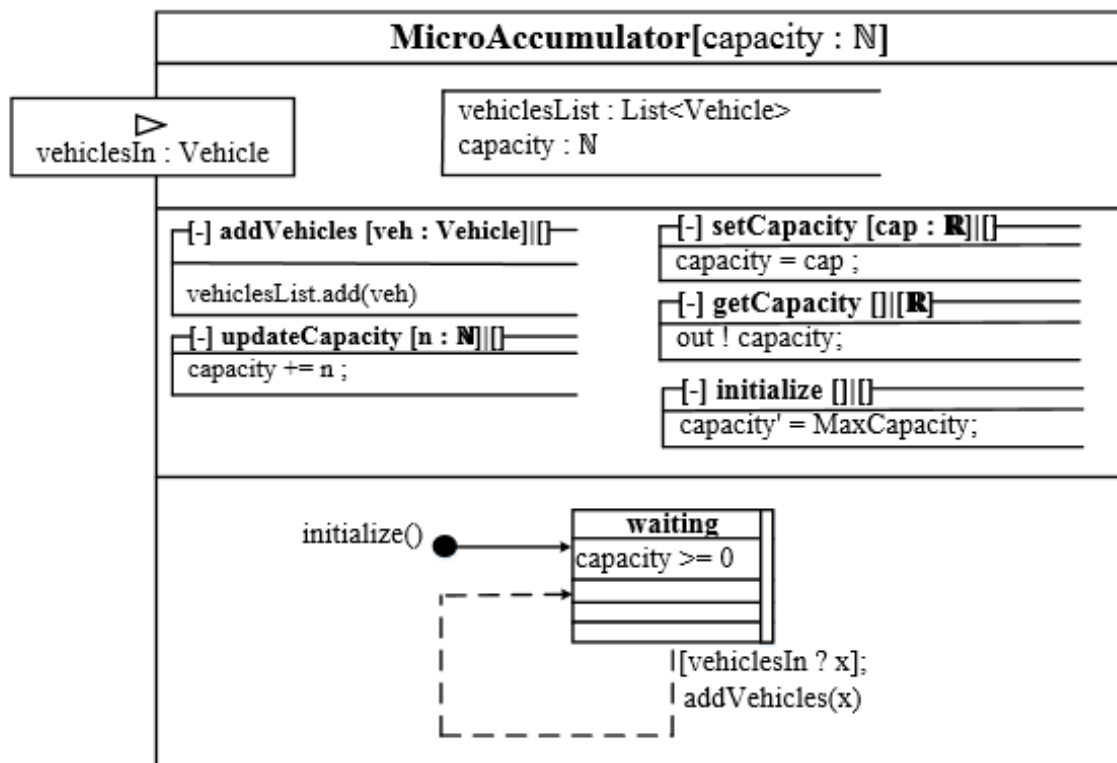


Figure 40: Spécification HiLLS d'un accumulateur microscopique de véhicules

L'accumulateur microscopique a un port d'entrée vehiclesIn qui permet de recevoir les véhicules sortants de la route. L'accumulateur a une seule configuration waiting qui lui permet d'attendre la sortie éventuelle d'un véhicule de la route.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes phases de la construction d'une ontologie pour la modélisation multi-perspective et la simulation holistique des systèmes de transport urbain. Cette ontologie constitue le point de départ dans la mise en place d'une plateforme de M&S. L'ontologie obtenue donne une vue de l'ensemble des connaissances dans le domaine des STU. Cette ontologie n'est pas figée et pourra évoluer par l'ajout de nouveaux modèles conventionnels qui seront les résultats des futurs travaux dans la théorie du

trafic. Nous avons également présenté les spécifications HiLLS des modèles conventionnels de la théorie du trafic et de certains modèles non conventionnels importants.

Les spécifications HiLLS sont des modèles de haut niveau, qu'il est possible d'implémenter avec n'importe quel langage de programmation ou environnement de simulation approprié. Dans le chapitre qui vient, nous proposons une implémentation avec le logiciel Anylogic, et nous mettons en œuvre le cadre ainsi érigé sur un cas d'étude.

Chapitre 4. Implémentation et mise en œuvre du cadre de M&S des STU

4.1 Introduction

La librairie de modèles de composants comporte l'implémentation des modèles conventionnels, des modèles non conventionnels (les générateurs de différents types de véhicules, les accumulateurs de véhicules, les feux tricolores) et des entités (les fiches d'information) utilisés dans M&S des STU. Pour réaliser l'implémentation des modèles et des entités, nous avons opté pour l'utilisation de l'environnement de M&S Anylogic. L'outil Anylogic est un environnement de simulation commercial qui propose aussi une version gratuite pour une utilisation personnelle.

Bien que plusieurs autres outils de M&S existent dans la littérature, Anylogic nous apporte plusieurs avantages dans le cadre de notre travail :

- ✓ une mise en œuvre facile des modèles de simulation à travers un éditeur graphique;
- ✓ un rendu visuel très complet à travers des animations très réalistes;
- ✓ une utilisation de la modélisation multi-méthode à travers plusieurs méthodes de modélisation (modélisation à événement discret, modélisation à base d'agents et modélisation de la dynamique des systèmes) ;
- ✓ une facilité de représentation et d'analyse des résultats de la simulation.
- ✓ une possibilité d'intégration du code Java complémentaire dans les modèles à simuler.

4.2 Environnement de Simulation Anylogic

Anylogic (Borshchev, 2013), (Grigoryev, 2015) est un logiciel commercial de modélisation et simulation de systèmes complexes qui propose différentes méthodes de construction des modèles de simulation : la modélisation de la dynamique des systèmes (system dynamics), la modélisation à événement discret (process modeling), et la modélisation basée sur les agents. Le choix de la méthode de modélisation dépend du niveau d'abstraction à représenter. Anylogic permet aussi de mettre en œuvre la modélisation multi-méthode (Brailsford et al., 2014). La modélisation multi-méthode consiste à combiner les différentes méthodes de M&S pour construire un modèle de simulation.

4.2.1 Modélisation basée sur les agents

La modélisation basée sur les agents permet de représenter à un niveau plus fin les connaissances du système à étudier. Cette modélisation consiste à identifier les agents, décrire leurs comportements et leurs interactions. Les agents sont des instances d'une classe (structure et comportement communs). Les agents représentent les objets du monde réel qui peuvent être des véhicules, des équipements, des produits, des idées, des personnes, ... Les

agents peuvent communiquer entre eux. L'environnement des agents est un agent représenté par l'espace qui peut être continu, discret ou géographique.

Un modèle Anylogic est constitué de plusieurs types d'agents : un agent principal (portant le nom « *Main* » par défaut) et des agents ordinaires qui sont créés en fonction des besoins. L'agent principal joue le rôle d'environnement des autres agents. La modélisation à base d'agents a beaucoup de point commun avec la modélisation orientée objet. La figure 41 montre un exemple sur les éléments intervenants dans la création d'un modèle basé sur les agents.

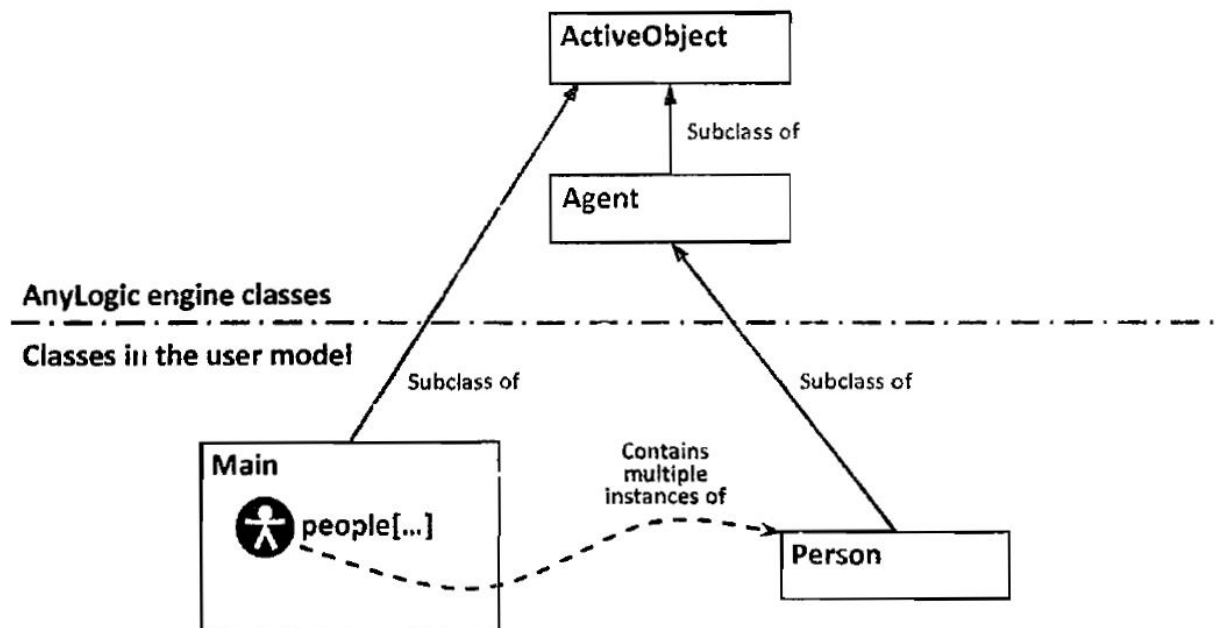


Figure 41: Eléments de création d'un modèle à base d'agents (Borschchev, 2013)

Tous les agents (agents principaux ou agents ordinaires) Anylogic héritent de la super classe ActiveObject. L'agent principal *Main* dans l'exemple ci-dessus représente une population de personnes. Chaque personne de cette population hérite de la classe Agent.

Un agent Anylogic possède un comportement par défaut qui peut être modifié par l'utilisation d'un diagramme de changement d'état (statechart). Un diagramme statechart Anylogic permet de décrire le comportement d'un agent à l'aide d'évènements et du temps. Il est constitué par :

- ✓ un point d'entrée (statechart entry point) qui permet de sélectionner la configuration initiale de l'agent;
- ✓ des états qui correspondent aux différentes configurations de l'agent;
- ✓ des transitions qui peuvent être de plusieurs types : la transition avec une durée finie (Timeout), la transition liée à une condition (Condition), la transition avec message (Message), la transition interne (internal transition);
- ✓ des branchements pour la sélection d'états alternatifs;
- ✓ un état final.

4.2.2 Modélisation à évènement discret

La modélisation évènement discret considère un système complexe comme un processus. Le processus est représenté par une séquence d'opérations exécutées sur des entités.

Les principales opérations utilisées sont : les retards, le service par diverses ressources, le choix de la branche de processus, la combinaison. Les entités sont généralement en concurrence pour utiliser les ressources et peuvent être retardées, les files d'attente sont présentes dans la plupart des modèles d'événements discrets. La logique du modèle est spécifiée graphiquement par un organigramme de processus, où les blocs représentent des opérations. L'organigramme débute généralement par des blocs *source* (entrée) qui génèrent des entités et les injectent dans le processus, et se termine par des blocs *puits* (sortie) qui suppriment des entités du modèle.

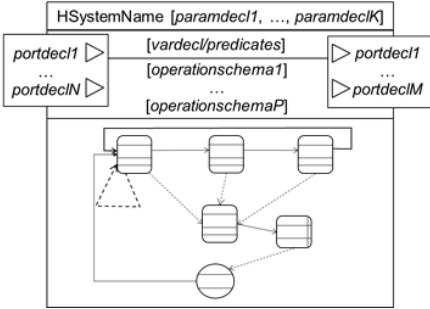

4.2.3 Modélisation de la dynamique de système






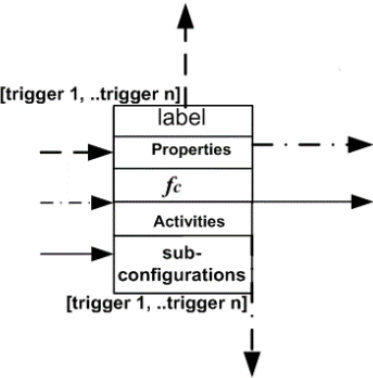

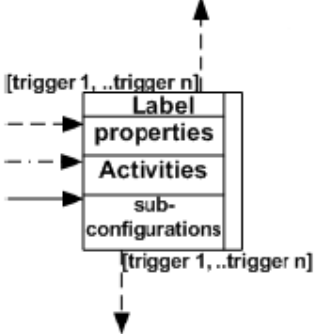

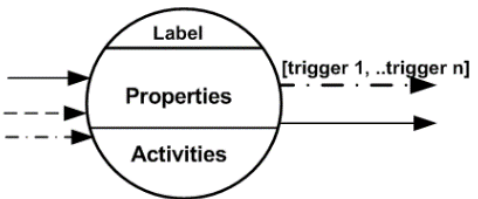

La modélisation de la dynamique de système est une méthode pour étudier le comportement des systèmes dynamiques. Cette approche de modélisation permet de spécifier un système avec un niveau faible de détails des connaissances. Les composants d'un tel système peuvent être des stocks, des flux, des variables, des liens, ...


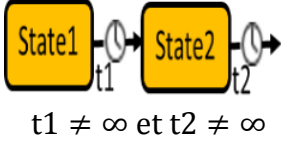
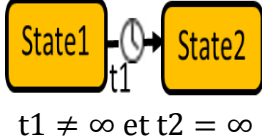
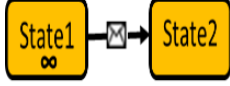
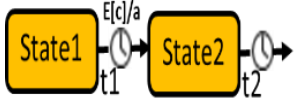
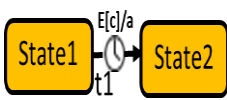
Le stock représente une collection d'entités de même type (une population de malades, une population de moutons, l'eau d'un fleuve, ...). Le flux représente le taux de transfert qui permet de changer la quantité d'entités en diminuant ou en augmentant un stock. Un flux utilise un canal d'écoulement. La variable est une valeur utilisée dans le diagramme de dynamique de système.

4.3 Implémentation Anylogic des modèles HiLLS

Pour systématiser l'implémentation des modèles HiLLS dans Anylogic, nous avons établi une correspondance entre les concepts de HiLLS et ceux de Anylogic. Les règles de transformation correspondantes sont présentées dans le tableau 7 ci-après.

| HiLLS | Anylogic | Description |
|---|---|---|
| <p>HiLLS system</p>  |  | <p>Un système HiLLS (HiLLS system) est représenté par Agent Anylogic.</p> |

| | | | | | | | |
|---|--|---|--------------------|-----|--------------------|---|--|
| <p>HiLLS class</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">HClassName [paramdecl1, ..., paramdeclK]</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">[vardecl/predicates]</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">[operationschema1]</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">...</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">[operationschemaP]</td> </tr> </table> | HClassName [paramdecl1, ..., paramdeclK] | [vardecl/predicates] | [operationschema1] | ... | [operationschemaP] |  | <p>Une classe HiLLS (HiLLS class) peut être spécifiée par une classe Java dans Anylogic.</p> |
| HClassName [paramdecl1, ..., paramdeclK] | | | | | | | |
| [vardecl/predicates] | | | | | | | |
| [operationschema1] | | | | | | | |
| ... | | | | | | | |
| [operationschemaP] | | | | | | | |
| <p>Paramètre</p> | <p>Paramètre</p>  | <p>Un paramètre dans HiLLS est représenté par un paramètre Anylogic.</p> | | | | | |
| <p>Variable</p> | <p>Variable</p>  | <p>Une variable dans HiLLS est représentée par une variable Anylogic.</p> | | | | | |
| <p>Opération</p> | <p>Fonction</p>  | <p>Une opération dans HiLLS est représentée par une fonction Anylogic.</p> | | | | | |
| <p>Configuration</p> | <p>Etat</p>  | <p>Une configuration dans HiLLS est représentée par un état dans Anylogic.</p> | | | | | |
| <p>Configuration finie $ta=t$</p>  |  | <p>La configuration finie HiLLS est un état Anylogic dont la durée de vie $ta=t$ est finie définit une transition du type Timeout.</p> | | | | | |
| <p>Configuration passive $ta=+\infty$</p>  |  | <p>La configuration passive HiLLS est traduite par un état Anylogic qui n'est pas la source d'une transition de type Timeout.</p> | | | | | |
| <p>Configuration transiente $ta=0$</p>  |  | <p>Une configuration transiente de HiLLS est identique à la configuration finie dont le Timeout est égale à 0</p> | | | | | |

| | | |
|---|--|--|
| <p>Configuration initiale ●</p> |  | <p>Le point d'entrée du diagramme est utilisé pour indiquer l'état initial du diagramme.</p> |
| <p>Transition interne <u>computations</u> →</p> |  <p>$t1 \neq \infty$ et $t2 \neq \infty$</p> | <p>La transition interne de HiLLS veut dire que l'origine de la transition possède un TimeOut de son associé dans Anylogic et qui va relier un state arrivé. C'est donc cette transition TimeOut d'AnyLogic qui connecte deux states AnyLogic. Cas d'une transition interne ou la source, et la destination ne peuvent être une configuration passive.</p> |
| |  <p>$t1 \neq \infty$ et $t2 = \infty$</p> | <p>Cas d'une transition interne ou la source ne peut être une configuration passive. Tant dis que la destination l'est.</p> |
| <p>Transition externe <u>computations</u> →</p> |  | <p>La transition externe HiLLS est cette transition déclenchée avec message qui lui connecte un état passif à la source à un autre état extrême</p> |
| <p>Transition confluente <u>computations</u> →</p> |  | <p>La transition confluente HiLLS est cette transition déclenchée par un TimeOut, effectuée lors de l'exécution d'une action a, lorsque l'événement E se produit et que la condition c est satisfaite. Cas d'une transition interne ou la source, et la destination ne peuvent être une configuration passive.</p> |
| |  | <p>Cas d'une transition confluente ou la source ne peut être une configuration passive. Tant dis que la destination l'est.</p> |

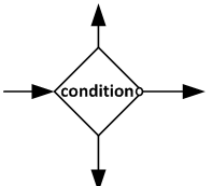

| | | |
|--|---|--|
| <p>Transition conditionnelle</p>  |  | <p>Une transition conditionnelle de HiLLS est représentée par une condition dans Anylogic.</p> |
|--|---|--|

Tableau 7: Correspondance entre les concepts HiLLS et Anylogic

4.3.1 Fiche d'information

La fiche d'information d'un véhicule est représentée en Anylogic par une classe Java `Form.java` représentée par la figure 42. Les différentes variables et opérations sont définies dans la classe Java.

```

1/**
2 * Form
3 */
4 public class Form implements Serializable {
5     /**
6      * This number is here for model snapshot storing purpose<br>
7      * It needs to be changed when this class gets changed
8      */
9     private static final long serialVersionUID = 1L;
10    private String identification;
11    private double speed;
12    private double acceleration;
13    private double xposition;
14    private double yposition;
15    private boolean authoirization;
16    /**
17     * Default constructor
18     */
19    public Form() {
20    }
21
22    /**
23     * Constructor initializing the fields
24     */
25    public Form(String identification, double speed, double acceleration, double xposition, double yposition, boolean authoirization) {
26        this.identification = identification;
27        this.speed = speed;
28        this.acceleration = acceleration;
29        this.xposition = xposition;
30        this.yposition = yposition;
31        this.authoirization = authoirization;
32    }
33
34    @Override
35    public String toString() {
36        return
37            "identification = " + identification + " " +
38            "speed = " + speed + " " +
39            "acceleration = " + acceleration + " " +
40            "xposition = " + xposition + " " +
41            "yposition = " + yposition + " " +
42            "authoirization = " + authoirization + " ";
43    }
44
45    void setIdentification(String id) {
46        this.identification = id;
47    }
48
49    void setSpeed(double sp) {
50        this.speed = sp;
51    }
52
53    void setAcceleration(double acc) {
54        this.acceleration = acc;
55    }
56
57    void setXposition(double xpos) {
58        this.xposition = xpos;
59    }
60 }

```

Figure 42: Représentation d'une fiche d'information dans Anylogic

4.3.2 Modèles conventionnels

Les différents modèles conventionnels sont implémentés par des agents dont les comportements sont décrits par des diagrammes statechart. La figure 43 présente un exemple de représentation de comportement d'un agent véhicule par un diagramme statechart.

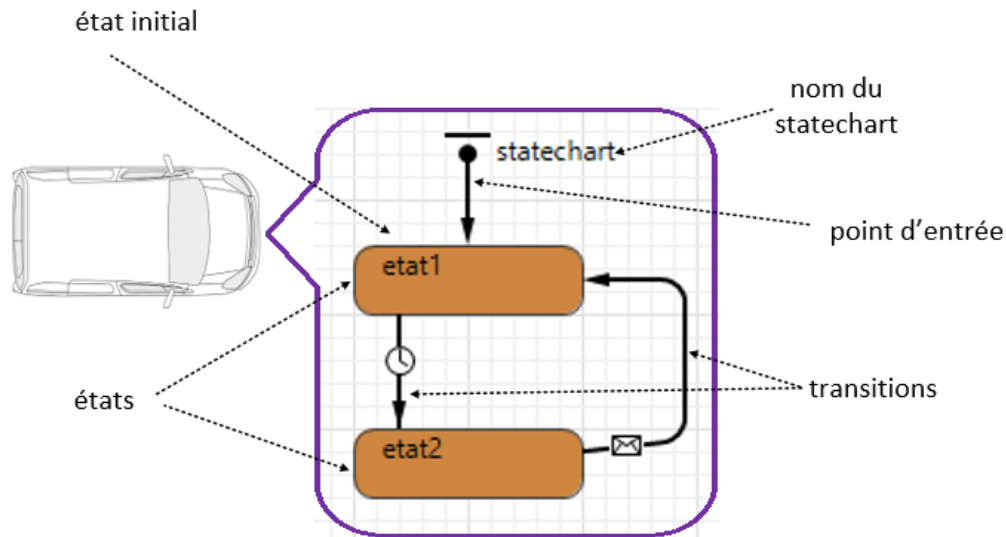


Figure 43: Exemple de diagramme statechart du comportement d'un agent véhicule

Nous présentons ici, à titre illustratif du principe d'implémentation adopté, les implémentations de quelques-uns des modèles conventionnels identifiés.

4.3.2.1 Modèle de Chandler

Le modèle de Chandler est un agent caractérisé par des paramètres, des variables et des fonctions représentées par la figure 44. La construction du diagramme statechart nécessite :

- ✓ la définition des paramètres du modèle : `lambda`, `reactionTime` et `maxSpeed` ;
- ✓ la déclaration des variables nécessaires à la mise en œuvre du modèle : `immatriculation`, `speed`, `leaderSpeed`, `acceleration` et `form` ;
- ✓ la définition des fonctions pouvant agir sur les différents paramètres et les variables du modèle : `computeAcceleration`, `setForm`, `updateSpeed`, `updateForm`, `setSpeed`, `setAcceleration` et `initialize`.

Le comportement du véhicule débute dans l'état cognition qui a une durée égale au temps de réaction du véhicule. C'est dans l'état cognition que le véhicule calcule sa nouvelle accélération avec la fonction `computeAcceleration`. Lorsque le véhicule reçoit un message dans l'état cognition, il met à jour sa fiche d'information et calcule à nouveau la valeur de l'accélération. Lorsque la durée de l'état cognition est écoulée, le véhicule rentre dans l'état driving. L'état driving a une durée infinie définie par la transition Message. C'est lorsqu'un message est reçu dans l'état driving, le véhicule met à jour sa fiche d'information et passe dans l'état cognition. Le processus de changement d'état entre les états cognition et driving se poursuit durant toute la durée de fonctionnement du modèle.

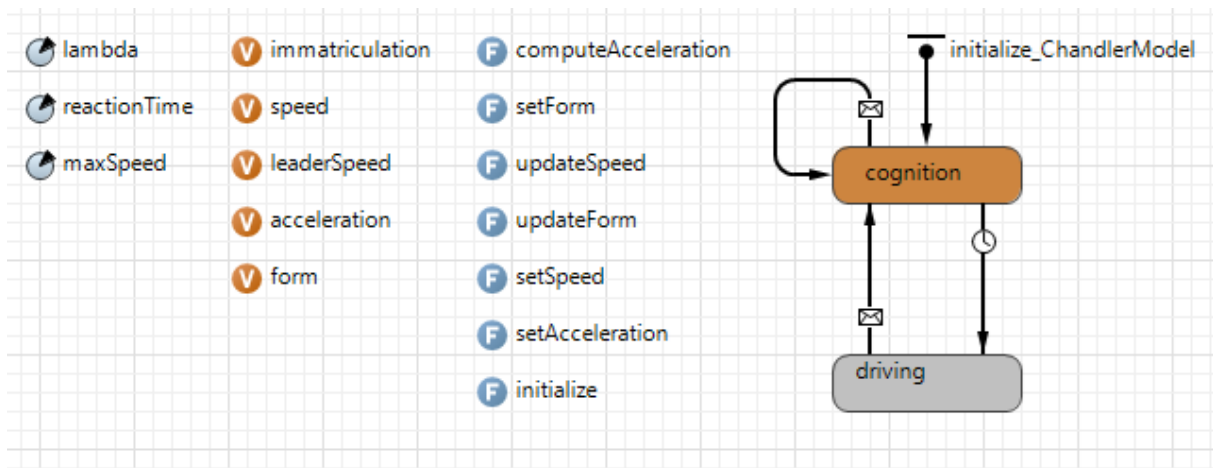


Figure 44: Diagramme statechart du modèle de Chandler

La figure 45 représente l'implémentation du corps de la fonction computeAcceleration qui permet de calculer la nouvelle accélération d'un véhicule.

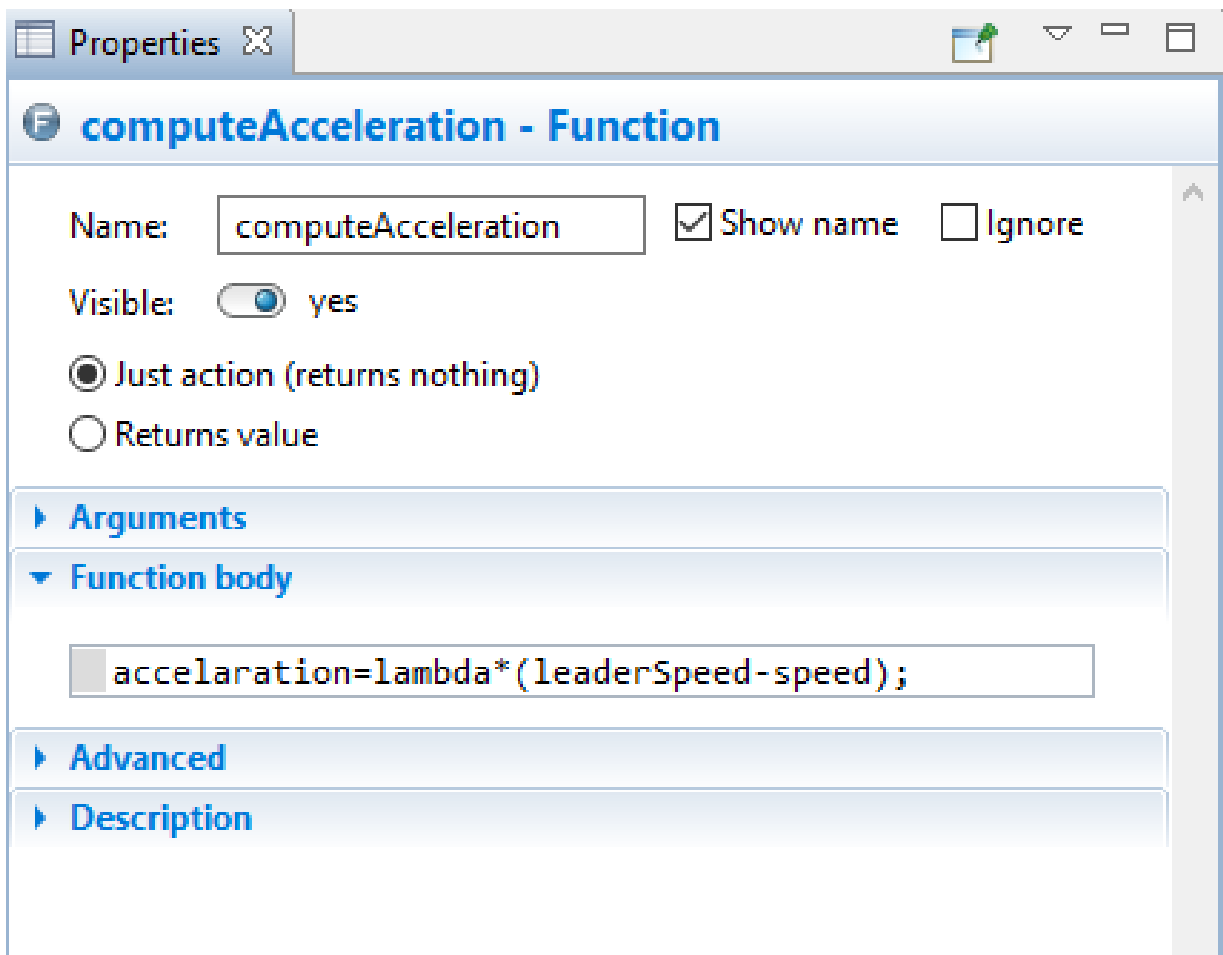


Figure 45: Définition du corps de la fonction computeAcceleration

4.3.2.2 Modèle de Gipps

Le modèle de Gipps est un agent caractérisé par des paramètres, des variables et des fonctions représentées par la figure 46.

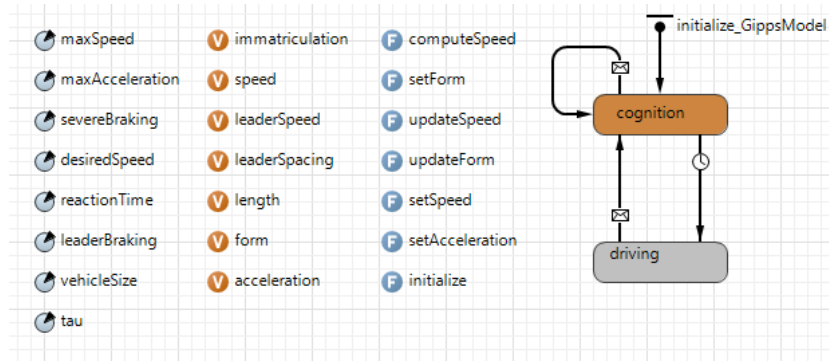


Figure 46: Diagramme statechart du modèle de Gipps

La figure 47 représente l'implémentation du corps de la fonction computeSpeed qui permet de calculer la nouvelle vitesse d'un véhicule.

```

Function body
speed=min(speed+2.5*maxAcceleration*tau*(1-speed/desiredSpeed)*
sqrt(0.025+speed/desiredSpeed),severeBraking*tau+sqrt(severeBraking*
severeBraking*tau*tau-severeBraking*(2*leaderSpacing-speed*tau-leader
leaderSpeed/leaderBraking)));

```

Figure 47: Définition du corps de la fonction computeSpeed

4.3.2.3 Modèle OVM

Le modèle OVM est un agent caractérisé par des paramètres, des variables et des fonctions représentées par la figure 48.

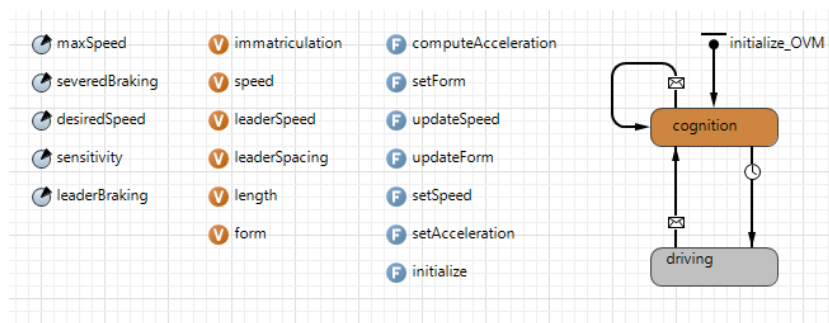


Figure 48: Diagramme statechart du modèle OVM

4.3.2.4 Modèle IDM

Le modèle IDM est un agent caractérisé par des paramètres, des variables et des fonctions représentées par la figure 49.

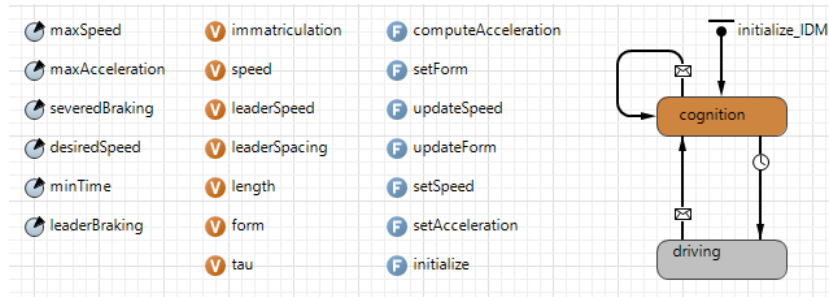


Figure 49: Diagramme statechart du modèle IDM

4.3.3 Modèles non conventionnels

L'environnement Anylogic propose une bibliothèque de trafic routier contenant l'implémentation de plusieurs modèles non conventionnels. Les routes microscopiques sont implémentées par un modèle *Road*. Le feu tricolore correspond à un modèle *trafficLight*. Le générateur de véhicule est représenté par un modèle *Car source* qui permet de générer différents types de véhicules. L'accumulateur de véhicules qui récupère les véhicules à la sortie du réseau est implémenté par un modèle *Car dispose*.

4.4 Mise en œuvre du cadre de M&S des STU

Nous éprouvons ici notre cadre de M&S des STU sur un cas concret de trafic urbain, en utilisant une scène locale de la ville de Bamako, au Mali. Il est important de noter que cette mise en œuvre est un test de l'opérationnalité de notre cadre, et non une application pour aboutir à des conclusions sur la gestion du trafic urbain de Bamako dans son état actuel. En effet, nos hypothèses de travail ne contiennent pas suffisamment de données réelles pour que nous dérivions des décisions valables pour l'amélioration du STU bamakois. Par contre, cette mise en œuvre permet d'apprécier le caractère effectif de l'implémentation de notre cadre, et met donc aux mains des décideurs publics, un outil d'analyse pour une gestion efficace du STU de Bamako. Par ailleurs, ce cadre n'étant pas spécifique à la ville de Bamako, l'outil décisionnel qu'il constitue est mobilisable sur n'importe quel STU.

Comme préconisé dans notre démarche, présentée au début du chapitre précédent, le point de départ de l'étude est l'ensemble des questions à résoudre sur le système à étudier. Dans la mise en œuvre de l'étude de cas, nous nous servons des questions à résoudre sur un système et de l'ontologie pour la M&S des STU pour définir la structure du modèle à construire. Cette structure du modèle est obtenue en faisant un pruning (une taille) de l'ontologie du domaine. Le modèle final du système est obtenu à partir de cette taille et en sélectionnant les composants adéquats dans la bibliothèque de modèles implémentés (voire, au besoin, à spécifier et

implémenter de nouveaux composants). La simulation du modèle final du système permet de répondre aux différentes questions de l'étude de cas.

4.4.1 Contexte de l'étude

Bamako est la capitale économique de la République du Mali, un pays de l'Afrique de l'Ouest. La ville de Bamako a un taux d'accroissement très élevé de sa population, environ 3 007 122 habitants (en 2018 selon la mairie du District). La ville est traversée par le fleuve Niger qui la divise en deux zones qui sont délimitées par les rives du fleuve (d'où les appellations communes de Bamako rive gauche, et Bamako rive droite) Comme toute ville moderne, Bamako a besoin de systèmes de transport urbain performants pour contribuer à son développement socio-économique. La mobilité de la population bamakoise est confrontée à un nombre très limité de mode de transport, dû à un faible investissement dans les infrastructures de transport et un manque crucial de planification claire à long terme des moyens de transport. La figure 50 donne un aperçu de la carte de Bamako.



Figure 50: Carte de délimitation de la ville de Bamako

Le trafic urbain de Bamako est caractérisé par une grande désorganisation des transports créée par le manque de vision à long terme des gestionnaires en charge des systèmes de transport. Cette désorganisation génère beaucoup de phénomènes nuisibles sur le trafic, dont :

- ✓ l'apparition fréquente de la congestion urbaine;
- ✓ la croissance de l'insécurité routière par augmentation du nombre d'accidents due au non-respect des règles de la circulation routière ;
- ✓ la pollution de l'air.

La ville de Bamako dispose d'un réseau routier en très mauvais état de fonctionnement dû au manque d'entretien régulier. Plus de 90% du transport à Bamako sont assurés sur les routes. Aucun service de transport public n'a été mis en place pour faciliter le déplacement de la population, ce qui pousse chaque usager à chercher son propre moyen de déplacement.

L'ensemble des flux de trafic actuel est partagé entre les véhicules particuliers, les taxis et les transports collectifs privés (les fameux Sotrama, dénommés ainsi en référence au sigle de la société des transports du Mali, fondée en 1978 et qui avait reçu le monopole d'exploiter six lignes à Bamako, avant que des difficultés de gestion matérielle n'aboutissent, à partir des années 1980, à l'ouverture aux conducteurs indépendants en échange d'une cotisation).

4.4.2 Périmètre de l'étude

Les problématiques du STU bamakois sont donc gigantesques. Néanmoins, notre étude présente n'a pas vocation à tenter de dériver des décisions susceptibles d'y remédier. Ceci, nous semble-t-il, devrait constituer une seconde étape dans une démarche globale, dont la première étape consiste en la mise en place d'un support approprié pour l'aide à la décision. Notre étude de cas vise à démontrer que le cadre de M&S que nous avons défini et implémenté est tout à fait indiqué pour atteindre les objectifs de cette première étape.

Notre périmètre d'étude se concentre autour de la zone du Monument de la Paix (que montre la figure 51), un point névralgique du trafic urbain bamakois. L'objectif est de produire un modèle permettant d'observer l'écoulement du trafic dans cette zone, sous des hypothèses certes non forcément alignées sur les données réelles complètes, mais assez vraisemblables pour être significatives. Nous ne retenons que les tronçons importants de la zone, et nous ignorons dans le modèle, les petits axes dont le volume de trafic peut être négligé.

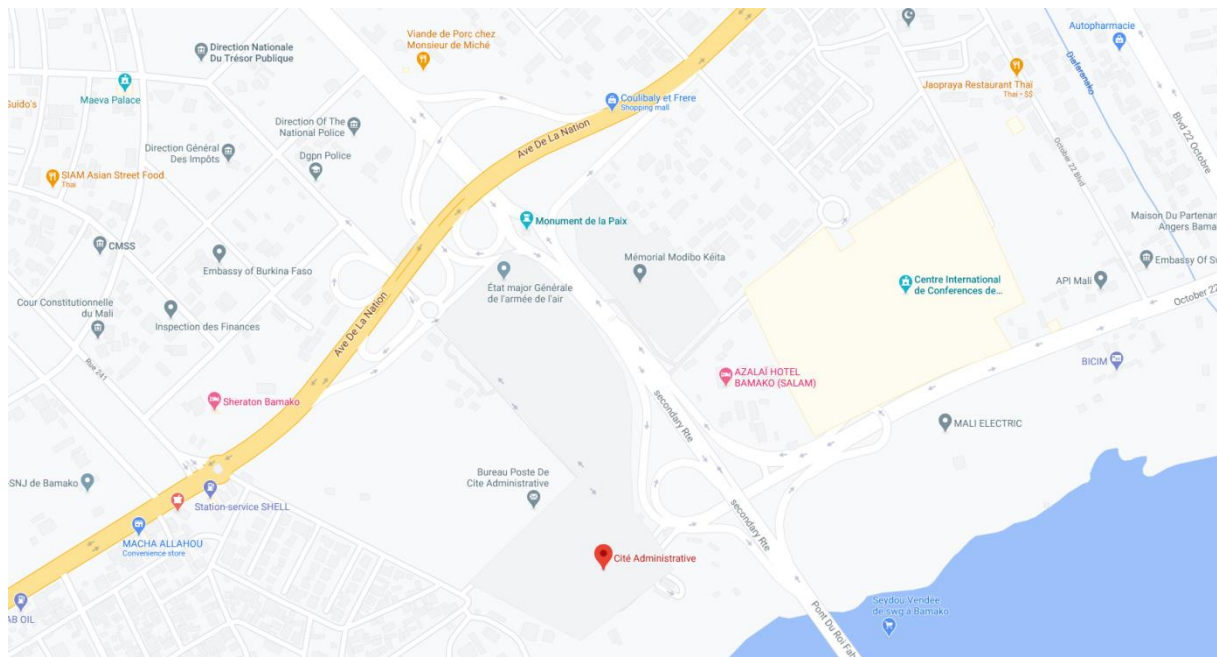


Figure 51: Périmètre d'étude

4.4.3 Taille de l'ontologie

La structure du modèle de l'étude de cas est obtenue par la taille (pruning) de l'ontologie du domaine de STU. La figure 52 présente le choix de la catégorie de STU à étudier, où nous instancions le trafic automobile comme catégorie particulière qui nous intéresse.

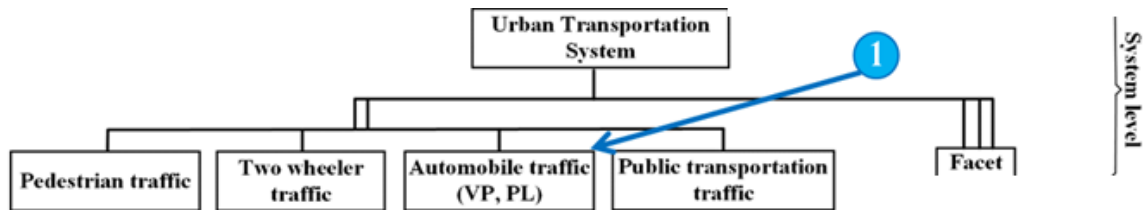


Figure 52: Choix de la catégorie de STU à étudier

La figure 53 présente la sélection de la catégorie de STU et le choix des perspectives mises en œuvre dans l'étude, nous instancions une perspective de consommation (pour capturer les habitudes de conduite des usagers) et deux perspectives de production (pour capturer, d'une part, la logique de fonctionnement global du réseau, et d'autre part, le comportement individuel des feux de régulation).

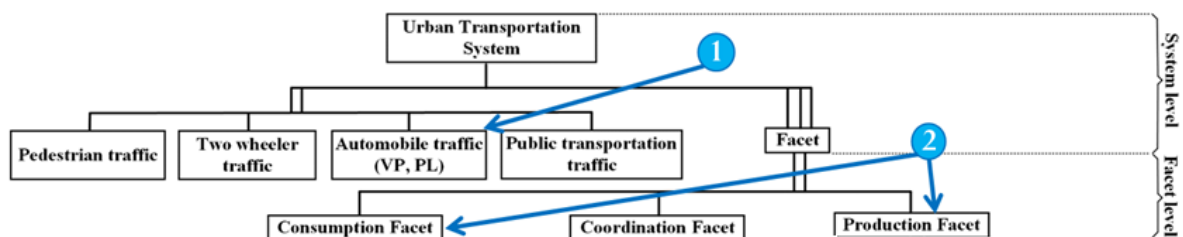


Figure 53: Choix des perspectives mises en œuvre

Prise isolément, la perspective de consommation centrée sur les habitudes de comportement permet de suivre un véhicule spécifique dans le réseau, et d'étudier les effets de ses décisions autour de lui (création d'embouteillage, danger pour les autres ou pour le conducteur, etc.).

Prise isolément, la perspective de production centrée sur les feux tricolores permet de se focaliser sur un feu de régulation spécifique, et d'étudier l'impact des variations des durées du vert (respectivement de l'orange et du rouge) sur la fluidité du trafic.

Prise isolément, la perspective de production centrée sur le réseau permet d'en évaluer les performances (débit moyen, temps moyen de séjour dans le réseau, etc.).

Prises ensemble, ces perspectives combinées peuvent être étudiées dans leurs influences mutuelles.

La figure 54 fige les échelles de modélisation. Les habitudes de conduite sont considérées à l'échelle microscopique, afin de pouvoir distinguer de manière fine plusieurs comportements selon les types de conducteur, alors que le fonctionnement global du réseau est forcément considéré à l'échelle macroscopique, et que le comportement des feux est pris à l'échelle microscopique.

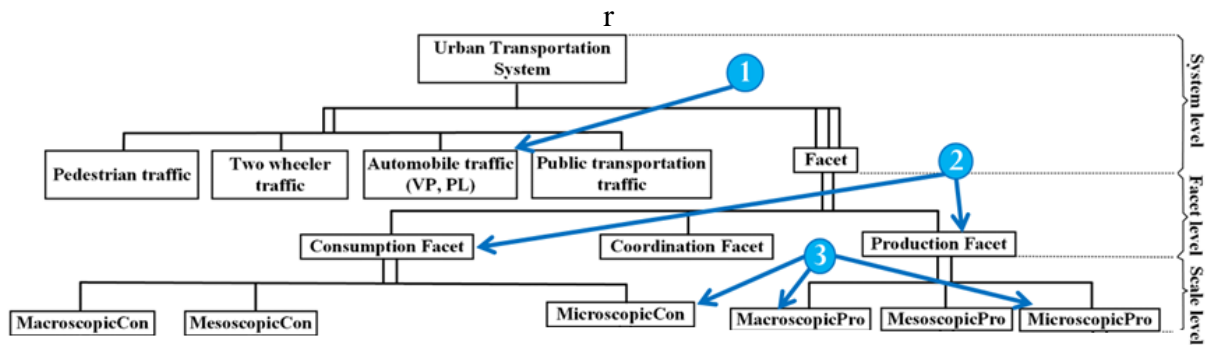


Figure 54: Choix des échelles spatio-temporelles

La figure 55 fait le choix des modèles composants constitutifs de notre modèle global : modèles composants conventionnels à sélectionner dans notre librairie de composants, ou modèles composants non conventionnels à construire.

Pour les habitudes de conduite, nous sélectionnons ici le modèle de poursuite de Chandler. A ce stade, il ne s'agit que de faire la preuve de concept de notre plateforme, car la prise en compte des vrais comportements de conduite à Bamako nécessiterait une sérieuse étude de terrain et des analyses psycho-sociales. En particulier, le trafic bamakois se caractérise par une indiscipline assez prononcée vis-à-vis du code de la route, en particulier pour ce qui concerne les transports en commun appelés SOTRAMA.

Pour le fonctionnement des feux, nous sélectionnons ici le modèle de feu que nous avons spécifié et implémenté, paramétré par les durées des temps passés respectivement en vert, orange, et rouge.

Pour le comportement global du réseau, nous avons élaboré un modèle fonctionnel (décrit plus loin) conforme à la logique d'enchaînement des flux dans le secteur considéré.

Ainsi, au total, notre solution d'étude se structure autour de trois perspectives combinées, chacune pouvant être étudiée de manière isolée dans son cadre expérimental :

- ✓ Une perspective de production, prise à l'échelle macroscopique pour caractériser la dynamique globale du trafic sur le réseau, et qui s'exprime sous forme de modèle fonctionnel (de type file d'attente), que nous avons spécifié (tel qu'expliqué plus loin), implémenté et sauvegardé dans notre librairie de composants ;
- ✓ Une perspective de consommation, prise à l'échelle microscopique pour caractériser le comportement individuel des véhicules et leurs interactions avec l'environnement, et qui s'exprime par un modèle linéaire (de type Chandler) présent dans notre librairie de composants ;
- ✓ Une perspective de production, prise à l'échelle microscopique pour caractériser la dynamique de fonctionnement des feux tricolores, et qui s'exprime par un modèle d'entité que nous avons déjà spécifié et implémenté auparavant dans notre librairie.

La figure 56 illustre le résultat de la taille de l'ontologie ayant conduit à ce modèle global, sous la forme d'une arborescence dont les feuilles sont les vrais constituants à intégrer. Nous détaillerons d'abord le modèle macroscopique fonctionnel que nous avons dû élaborer (les deux autres modèles étant déjà présents dans notre librairie, et ayant été présentés auparavant), puis nous nous pencherons sur l'intégration de tous les composants.

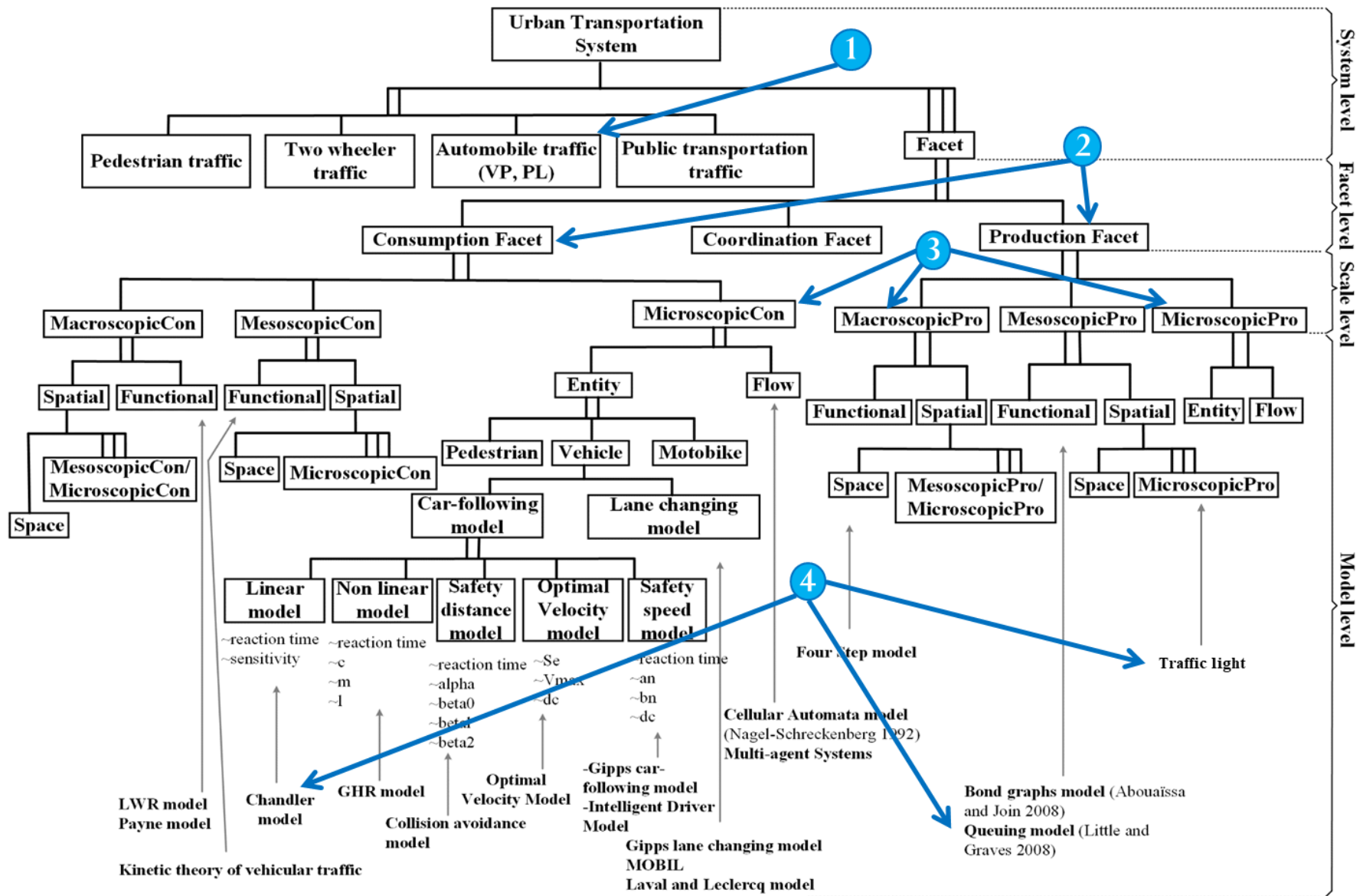


Figure 55: Taille (pruning) de l'ontologie

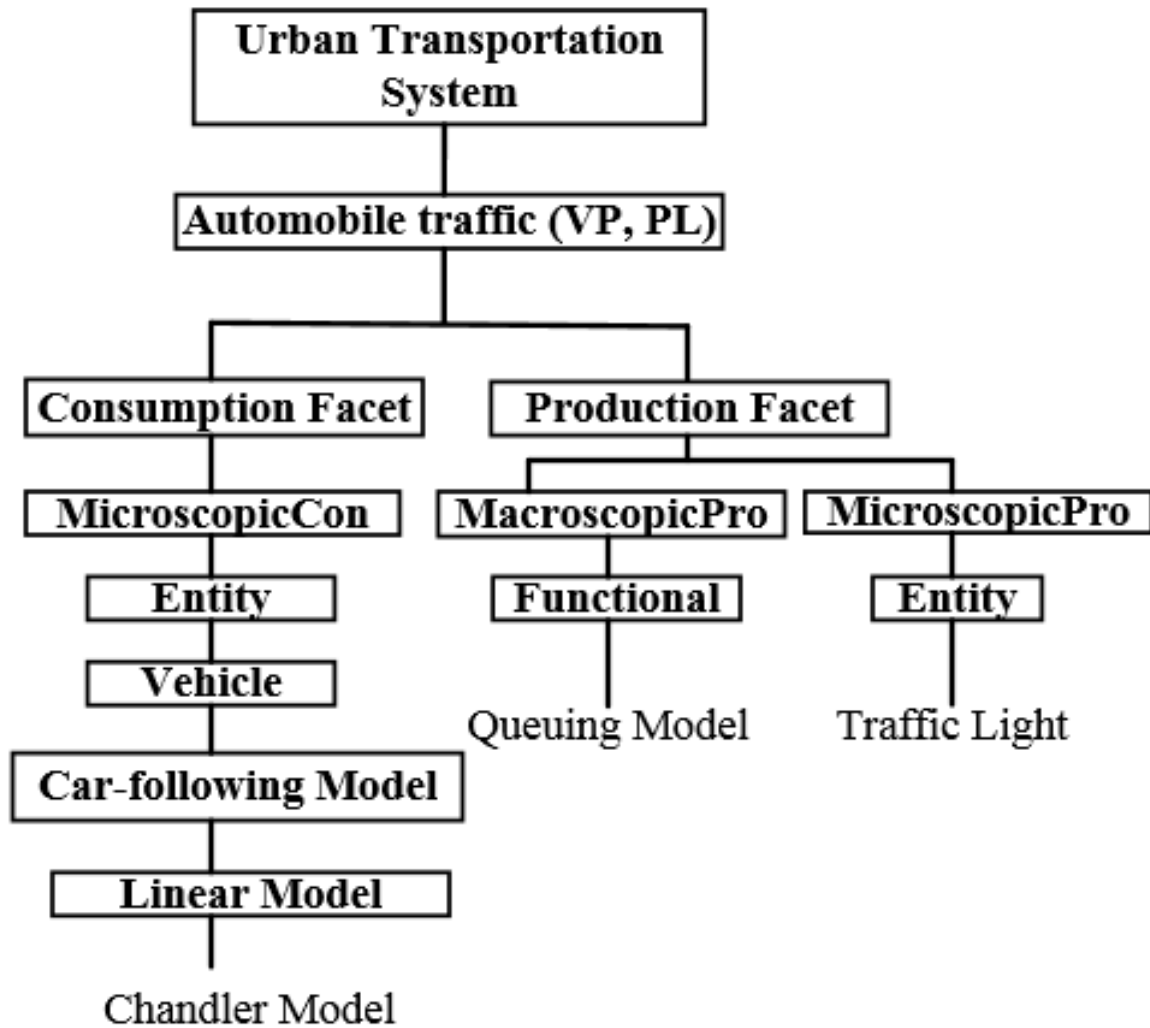


Figure 56: Résultat de la taille d'ontologie

En terme de cardinalité, plusieurs modèles de Chandler sont instanciés (chacun correspondant à un véhicule dans le système), un seul modèle de file d'attente est instancié, et un seul modèle de feu est instancié.

4.4.3.1 Modèle macroscopique fonctionnel de production

Le fonctionnement du réseau est construit par interconnexion de composants fonctionnels, de manière à traduire la logique d'écoulement des flux de véhicules. Pour construire ce modèle, nous avons considéré la logique de flux telle qu'illustrée par la figure 57.

Les flux de véhicules entrant dans le système se font selon 5 entrées possibles, i.e., NO pour Nord-Ouest, NE pour Nord-Est, SO pour Sud-Ouest, SE pour Sud-Est, et E pour Est. Les flux de véhicules sortant du système se font selon ces mêmes 5 points géographiques. Les flux s'écoulent dans le système selon les parcours rendus possibles entre ces différents points géographiques.



Figure 57: Entrées et sorties du périmètre de l'étude de cas

Dans notre modèle, nous n'avons retenu que les parcours pour lesquels les flux de véhicule sont significatifs. Dans le réseau réel, certaines petites voies permettent une multitude de parcours à très faible débit, pouvant être négligés dans le modèle.

Ainsi, nous avons retenu les parcours véhicules suivants, que montre respectivement les différentes parties de la figure 58 :

- Le flux entrant au NO s'écoule en partie vers la sortie SE, en partie vers la sortie E, et en partie vers la sortie NE.
- Le flux entrant au NE s'écoule en partie vers la sortie SO, en partie vers la sortie NO, en partie vers la sortie E, et en partie vers la sortie SE.
- Le flux entrant au SO s'écoule en partie vers la sortie NO, en partie vers la sortie E, et en partie vers la sortie SE.
- Le flux entrant au SE s'écoule en partie vers la sortie NO, en partie vers la sortie E, et en partie vers la sortie NE.
- Le flux entrant à l'E s'écoule en partie vers la sortie NO, en partie vers la sortie NE, et en partie vers la sortie SE.

La logique de division d'un flux en plusieurs parties se traduit par des probabilités dont les valeurs s'appuient sur des statistiques de terrain. Comme nous n'avons pas fait de telles mesures, nous utilisons dans notre modèle des valeurs fictives, notre objectif étant surtout de faire une preuve de concept de notre approche. Ainsi, par exemple, le flux entrant au NO peut être considéré comme s'écoulant à $x\%$ vers la sortie SE, à $y\%$ vers la sortie E, et à $z\%$ vers la sortie NE. Un des intérêts de la simulation d'un tel modèle est de pouvoir faire varier x , y et z , et d'en étudier les impacts sur le trafic. Ces paramètres du modèle peuvent être impactés par d'autres modèles issus d'autres perspectives (comme la météo, une épidémie, etc.) en ce sens que les sorties de tels modèles peuvent engendrer une redistribution des probabilités de parcours. Une épidémie peut, par exemple, densifier les sorties vers la sortie NE, où se trouvent les plus importants hôpitaux de la ville. Une mauvaise météo, en détournant les habitudes de conduite, peut appauvrir certains parcours ou en densifier d'autres.



Figure 58: Parcours véhicules dans le système

Ainsi, pour construire notre modèle macroscopique fonctionnel de production, les blocs fonctionnels suivants sont mobilisés :

- ✓ Les générateurs de véhicule (composant Anylogic *CarSource*)
- ✓ Les accumulateurs (composant Anylogic *CarDispose*)
- ✓ Les contrôleurs de mouvement des véhicules (composant Anylogic *CarMoveTo*)
- ✓ Les sélecteurs de sortie (composant Anylogic *SelectOutput5*)

Un générateur de véhicules peut générer les véhicules selon plusieurs façons :

- ✓ En nombre de véhicules par unité de temps (seconde, minute, heure)
- ✓ En taux par unité de temps (seconde, minute, heure)
- ✓ En utilisant une fonction d'injection de véhicules, qui injecte à la demande, un nombre donné de véhicules dans le réseau.

Comme l'indique la figure 59, notre modèle comporte 5 générateurs de véhicules :

- ✓ *entreeVoitureNO* pour les véhicules entrant dans le réseau par le NO ;
- ✓ *entreeVoitureSE* pour les véhicules entrant dans le réseau par le SE ;
- ✓ *entreeVoitureSO* pour les véhicules entrant dans le réseau par le O ;
- ✓ *entreeVoitureNE* pour les véhicules entrant dans le réseau par le NE ;
- ✓ *entreeVoitureE* pour les véhicules entrant dans le réseau par l'E ;

Le modèle comporte également 5 accumulateurs de véhicules :

- ✓ *sortieVoitureSE* pour les véhicules sortant du réseau par le SE ;
- ✓ *sortieVoitureNO* pour les véhicules sortant du réseau par le NO ;
- ✓ *sortieVoitureNE* pour les véhicules sortant du réseau par le NE ;
- ✓ *sortieVoitureSO* pour les véhicules sortant du réseau par le SO ;
- ✓ *sortieE* pour les véhicules sortant du réseau par l'E ;

Les contrôleurs de mouvement servent à déplacer les véhicules vers une destination donnée.

Notre modèle en comporte 5 :

- ✓ *déplacementVoitureNOversSE* pour acheminer les véhicules vers la sortie SE ;
- ✓ *déplacementVoitureSEversNO* pour acheminer les véhicules vers la sortie NO ;
- ✓ *déplacementVoitureSOversNE* pour acheminer les véhicules vers la sortie NE ;
- ✓ *déplacementVoitureNEversSO* pour acheminer les véhicules vers la sortie SO ;
- ✓ *déplacementVoitureNversE* pour acheminer les véhicules vers la sortie E ;

Les sélecteurs de sortie permettent de créer des embranchements pour définir des parcours différents pour les véhicules. Des probabilités sont attachées à chaque branche possible du sélecteur de sortie (0 pour les branches ne permettant pas de sortie de véhicule). Notre modèle comporte 5 sélecteurs de sortie :

- ✓ *NOversSEouNEouE* pour trois parcours possibles : Nord-Ouest vers Sud-Est, Nord-Ouest vers Nord-Est, et Nord-Ouest vers Est ;
- ✓ *SEversNOouNEouE* pour trois parcours possibles : Sud-Est vers Nord-Ouest, Sud-Est vers Nord-Est, et Sud-Est vers Est ;
- ✓ *SOversNEouSE* pour trois parcours possibles : Sud-Ouest vers Nord-Est, Sud-Ouest vers Sud-Est, et Sud-Ouest vers Est ;
- ✓ *NEversNOouSEouSO* pour quatre parcours possibles : Nord-Est vers Nord-Ouest, Nord-Est vers Sud-Est, Nord-Est vers Sud-Ouest, et Nord-Est vers Est ;
- ✓ *EversNEouNOouSE* pour trois parcours possibles : Est vers Nord-Est, Est vers Nord-Ouest, et Est vers Sud-Est.

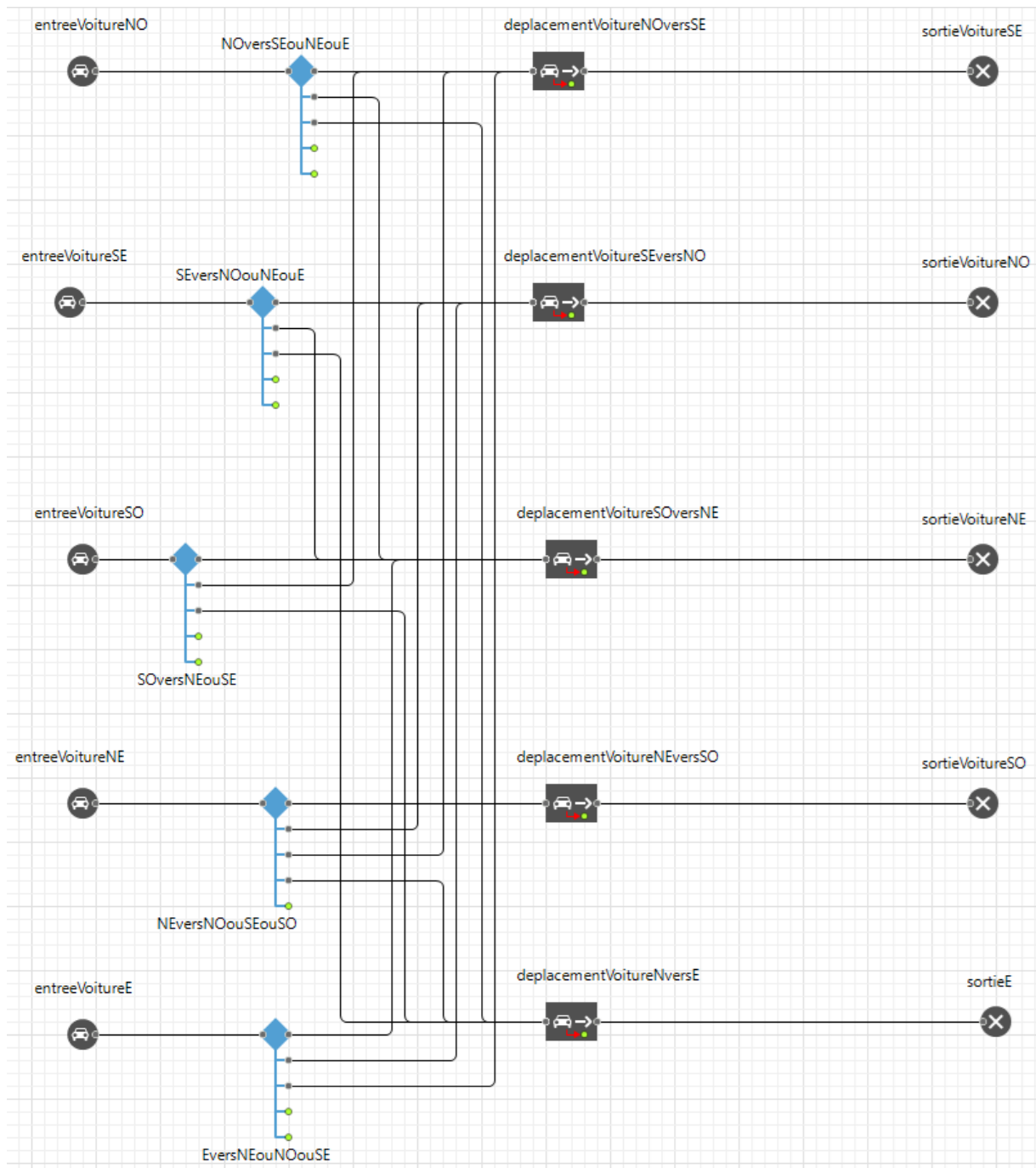


Figure 59: Modèle macroscopique fonctionnel de production (logique du réseau urbain)

4.4.3.2 Modèle d'animation

L'environnement Anylogic propose un ensemble d'outils dans la bibliothèque de trafic routier permettant de construire facilement une scène d'animation de simulation de réseau de transport. La figure 60 montre comment nous avons élaboré notre modèle de visualisation et d'animation. La scène comporte les routes (en gris) avec des lisérés blancs pour la délimitation des voies, des lignes blanches de séparation des sens de circulation, et des lignes de marquage de stop. Nous l'avons également agrémenté de quelques bâtiments (pour

représenter la cité administrative à gauche, et le centre international de conférences de Bamako, à droite) et de quelques arbres, ainsi que de deux monuments (celui de la Paix, et celui du Président Modibo Keïta).

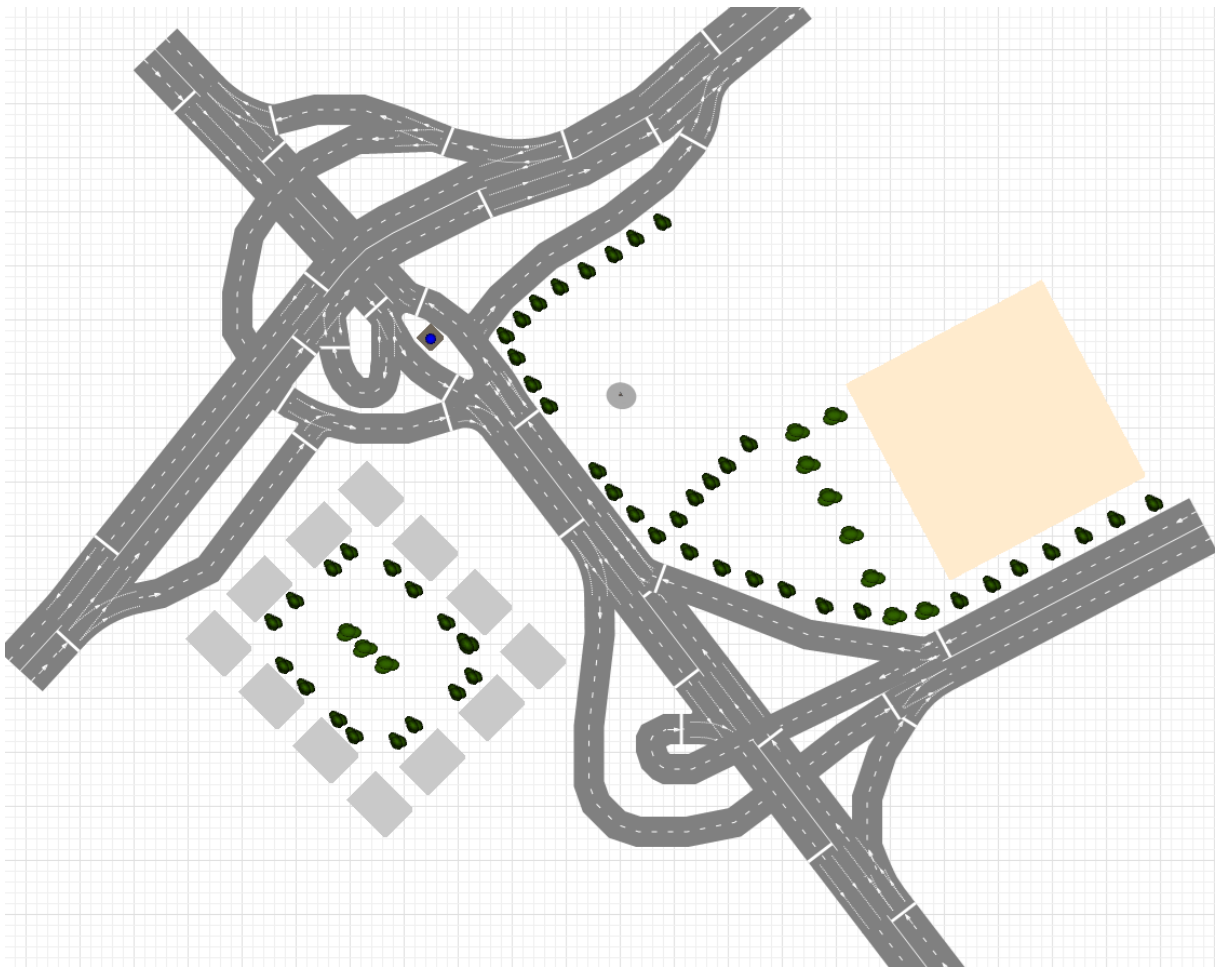


Figure 60: Réseau routier passant à côté de la cité administrative de Bamako

4.4.4 Simulation holistique

La figure 61 présente le cadre d'intégration holistique des différentes perspectives sélectionnées dans l'étude de cas. Le système source est notre trafic sous étude. Il lui a été appliqué trois perspectives différentes, conduisant aux trois modèles dérivés, à savoir :

- ✓ Le modèle dit MicroCon (pour microscopic consumption), qui est un modèle de Chandler caractérisant le comportement individuel des véhicules et leurs interactions avec l'environnement, et qui, comme nous l'avons expliqué, peut être étudié de manière isolée dans son cadre expérimental (MicroscopicCon EF) ;
- ✓ Le modèle dit MacroPro (pour macroscopic production), qui est le modèle fonctionnel décrit précédemment, et qui peut lui aussi être étudié de manière isolée dans son cadre expérimental (MacroscopicPro EF) ;
- ✓ Le modèle dit MicroPro (pour microscopic production), qui est un modèle caractérisant la dynamique de fonctionnement d'un feu tricolore, lui aussi pouvant être étudié de manière isolée dans son cadre expérimental (MicroscopicPro EF).

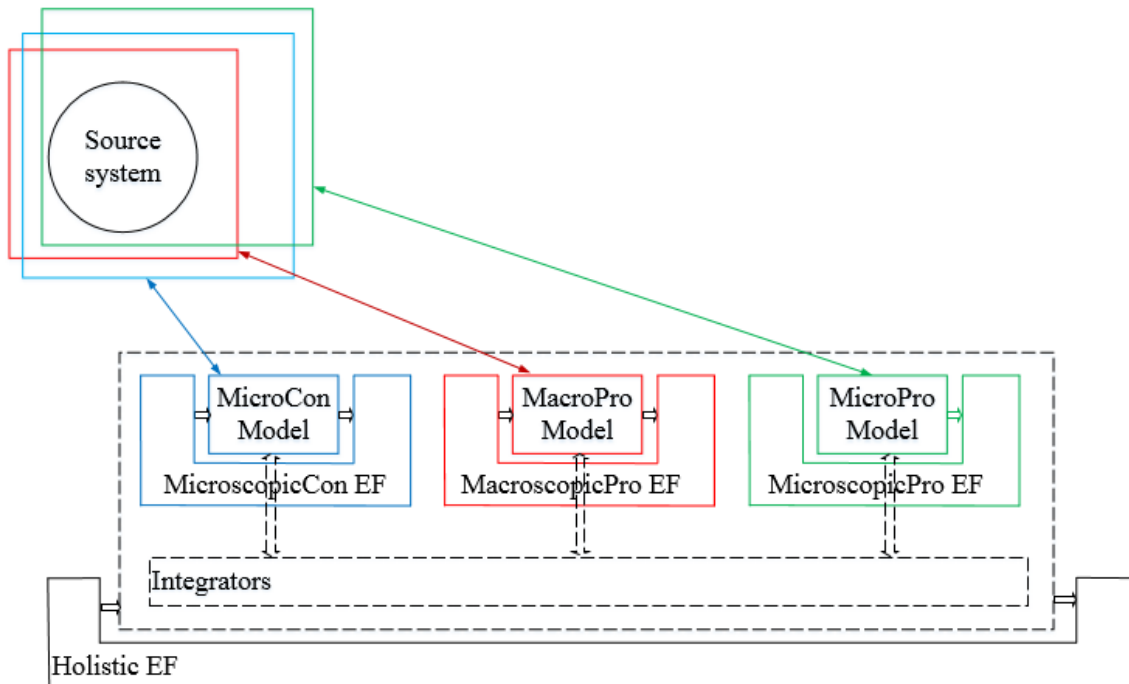


Figure 61: Intégration holistique des perspectives de l'étude de cas

L'intégration de ces modèles établit, d'une part, un lien entre les sorties et les entrées de ces modèles (principe du *coupling* que formalise DEVS), et d'autre part, un lien entre les sorties de certains modèles avec les paramètres d'autres modèles (principe du *bridging* que nous avons formalisé à travers DEVS paramétrique).

La figure 62 montre les liens de couplage et de pontage entre les modèles intégrés de notre solution holistique :

- Comme décrit auparavant, le modèle de conduite (de Chandler) peut recevoir en entrée sa fiche, renvoie sa fiche mise à jour par sa décision de conduite, et est paramétré par la sensibilité du conducteur, son temps de réaction, et la vitesse maximale du véhicule.
- Le modèle de flux que nous avons construit reçoit les fiches de véhicule présents dans le réseau, renvoie l'ensemble de ces fiches après les avoir mises à jour à l'aide des règles de déplacement du réseau, et est paramétré par les taux d'arrivée de véhicule, les probabilités de transfert, et les vitesses de déplacements).
- Le modèle de feu tricolore peut recevoir des contrôles (d'allumage ou d'extinction), renvoie un signal correspondant à son état courant (couleur du feu), et est paramétré par les durées fixées de ces couleurs de feu.
- Le modèle de conduite et le modèle de flux sont couplés entre eux, le modèle de flux recevant de chaque modèle de conduite correspondant à un véhicule dans le réseau sa fiche courante, et lui renvoyant cette fiche mise à jour.
- Le signal renvoyé par le feu tricolore impacte sur le paramètre de sensibilité des conducteurs concernés (lorsque le feu est au rouge, le paramètre d'accélération du modèle de comportement des véhicules est modifié en conséquence en accélération négative et non positive ; lorsque le feu est au vert, c'est le contraire).
- Le signal renvoyé par le feu tricolore impacte également sur le paramètre donnant les probabilités de transfert pour la voie concernée (lorsque le feu est au rouge, la probabilité de transfert est nulle).

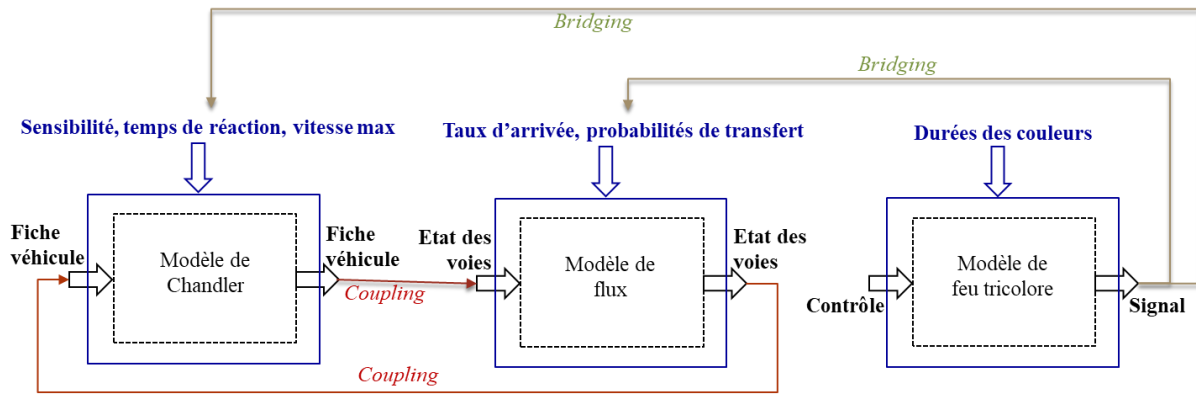


Figure 62: Intégration holistique des perspectives de l'étude de cas

4.4.5 Exécution et animation de la simulation

La figure 63 donne un aperçu de la simulation du modèle de l'étude de cas. Anylogic permet de définir de manière simple et intuitive les critères de performance à évaluer, et de présenter les résultats de leur évaluation sous forme d'objet graphique statistique. Ainsi, la figure 63 montre, en plus de l'écoulement animé du flux de véhicules, la distribution des temps de séjour des véhicules dans le réseau, ainsi que le temps de séjour moyen instantané.

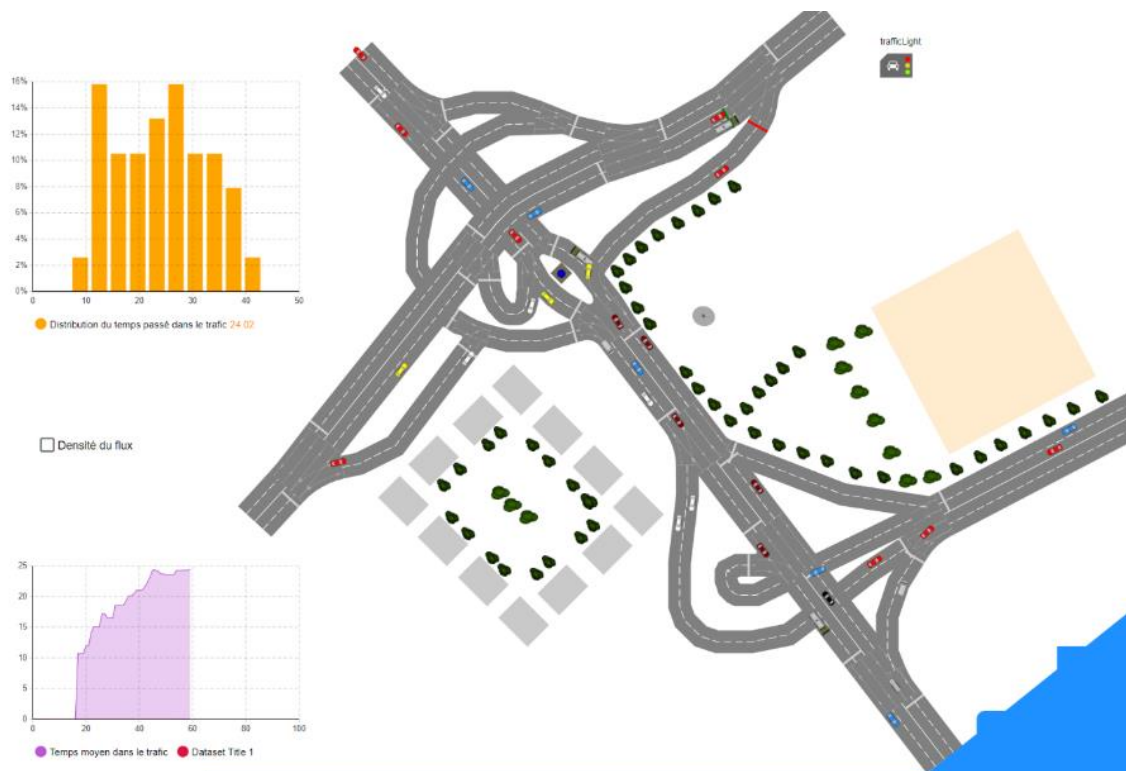


Figure 63: Aperçu de la simulation en 2D de l'étude de cas

Rappelons que ces résultats statistiques n'appellent pas à conclusion pour ce qui concerne le trafic réel de Bamako, dès lors que le paramétrage du modèle ne repose pas sur des données terrain. Néanmoins, l'exploration de plusieurs scénarios est possible par variation des valeurs

des paramètres. Par exemple, différents réglages de la durée du vert ou du rouge du feu tricolore montrent une incidence forte sur la fluidité de l'ensemble du trafic, ce qui se traduit par une variation de la distribution du temps passé dans le réseau par les véhicules, mais aussi celle du temps moyen de séjour dans le trafic, comme l'illustre la figure 64.

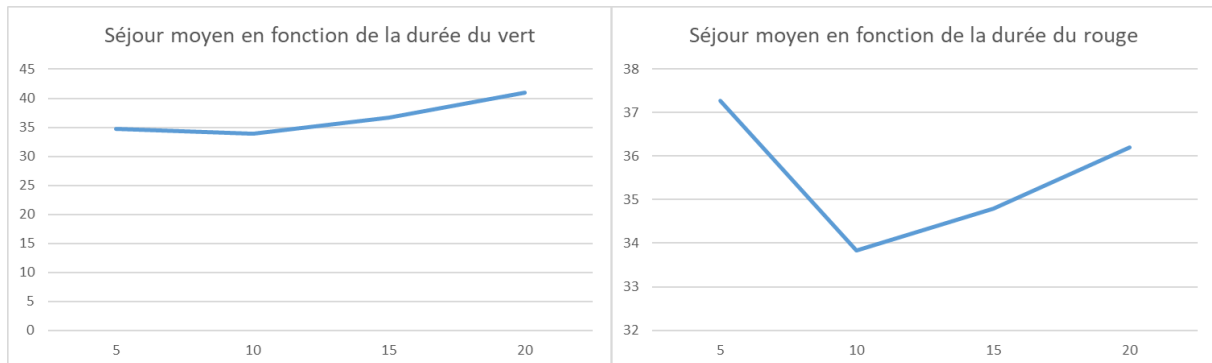


Figure 64: Quelques scénarios de congestion selon le réglage du feu tricolore

La figure 65 montre une vue aérienne de la scène de simulation. Anylogic permet, grâce à des objets Camera, de positionner des vues spécifiques dans la scène, et de les observer durant l'exécution de la simulation. Cette fonctionnalité est un élément important pour la validation visuelle du modèle par les experts du trafic.



Figure 65: Aperçu de la simulation en 3D de l'étude de cas

La figure 66 montre la distribution de la densité de flux sur les différents axes du réseau. Le code couleur adopté par Anylogic permet de distinguer les axes les plus fluides (tendances vertes) des axes les plus chargés (tendances rouges).



Figure 66: Aperçu de la distribution dynamique de densité de flux de l'étude de cas

La figure 67 montre la vue d'un conducteur spécifique. Ainsi, il est possible de suivre un usager donné tout le long de son parcours dans le réseau, et d'observer l'impact de ses décisions sur son environnement.



Figure 67: Aperçu de la vue d'un usager dans l'étude de cas

4.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les principes globaux qui guident l'implémentation en Anylogic des composants de la librairie de modèles identifiés dans notre ontologie spécifique. Le comportement de chacun des différents modèles est spécifié par un diagramme statechart.

Nous avons également montré une mise en œuvre du cadre ainsi construit et implémenté, sur une étude de cas. Dans ce contexte, nous avons montré comment l'ontologie est taillée pour dériver l'arborescence du modèle de simulation, et comment les différents composants doivent être intégrés pour produire le modèle global final.

Enfin, nous avons montré quelques écrans illustrant ce que Anylogic permet d'obtenir, en terme d'exécution et d'animation du modèle de simulation.

Conclusion générale

Les systèmes de transport urbain sont complexes. Cette complexité est liée à la nature des entités constituant ces systèmes ainsi qu'à leurs interactions. Chaque entité constitue un système autonome caractérisé par son propre comportement. Un système de transport urbain peut être observé sous plusieurs aspects pour mieux appréhender sa complexité. C'est dans ce contexte qu'une approche rigoureuse de modélisation et simulation (M&S) devient une nécessité pour l'étude de tels systèmes. Notre travail de thèse se situe dans le cadre de la proposition d'un cadre de modélisation multi-perspective et de simulation holistique pour l'étude des systèmes de transport urbain.

Nous avons conduit un travail, dont la présentation est structurée en quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à la description des modèles conventionnels les plus connus de la théorie du trafic routier et à celle de quelques outils logiciels de simulation du domaine. Le deuxième chapitre présente les formalismes et méthodes utilisés dans le cadre de notre travail. Le troisième chapitre présente les différentes étapes de la construction de l'ontologie du domaine de la M&S des STU, et donne la spécification dans le formalisme HiLLS des différents modèles conventionnels de la théorie du trafic. Le quatrième chapitre traite de l'implémentation des différents modèles ainsi spécifiés et propose une mise en œuvre de notre cadre sur une étude de cas.

A la lumière de nos efforts, nous tirons quelques conclusions sur les résultats obtenus, les apports de notre travail, mais également les limites actuelles de ce travail. Ceci nous permet de dégager quelques perspectives que nous jugeons importantes pour notre activité de recherche future.

Au nombre des résultats obtenus :

- ✓ Nous avons élaboré une ontologie de M&S des STU et une librairie de modèles conventionnels, qui sont mobilisables de manière générique sur n'importe quel système de transport urbain. L'ontologie peut être élargie progressivement pour prendre en compte d'autres perspectives, et la librairie de modèles peut graduellement être enrichie. Ceci constitue un puissant outil d'aide à la décision, et désormais, nous pouvons nous consacrer à une étude très approfondie du trafic urbain de Bamako, afin d'apporter des réponses pertinentes aux multiples défis qu'il connaît.
- ✓ Nous avons réussi à combiner la puissance d'expression de HiLLS, formalisme visuel de haut niveau, avec la rigueur méthodologique de MPM&HS. Cette combinaison met en évidence, de manière notable, le fait que HiLLS permet d'assurer une continuité de représentation de connaissance de la phase d'analyse du domaine à celle de spécification des modèles, ce qui en général fait classiquement intervenir plusieurs formalismes différents. De ce fait, l'usage de HiLLS réduit les erreurs sémantiques qui peuvent se produire lors du passage de l'analyse du domaine à la construction du modèle de simulation. En particulier, HiLLS est une alternative très intéressante au couple DEVS et SES/MB.
- ✓ Nous avons démontré que Anylogic peut servir d'environnement logiciel de simulation efficace pour l'implémentation des modèles HiLLS, et de ce fait, permet de capitaliser sur les innombrables fonctionnalités de cet outil, notamment celles relatives à la visualisation, à l'animation, et aux évaluations statistiques des résultats d'exécution. Comme langage visuel de haut niveau accessible à la simulation, à

l'analyse formelle de propriétés, et à l'enactement, HiLLS a vocation à s'appuyer sur des outils logiciels dédiés à ces différentes formes d'analyse. Anylogic est donc un excellent candidat pour être le support standard de HiLLS pour la simulation. D'autres outils conviendraient mieux pour les autres formes d'analyse (comme UPPAAL pour l'analyse formelle, et BPEL pour l'enactement).

Au nombre des apports :

- ✓ Par rapport à l'état de l'art, notre travail allie le meilleur des trois mondes, i.e., les approches macroscopique, microscopique, et mésoscopique d'étude des STU. Il existe, certes, des outils combinant au moins deux de ces approches. Nous pensons que notre cadre est plus ouvert, car plus accessible à la collaboration avec les experts du domaine des STU (alors que les outils existants nécessitent une expertise en modélisation qui n'est pas forcément partagée par les non spécialistes de simulation), mais aussi plus adéquat pour la recherche, car nous pouvons y apporter les extensions que nous voulons sans contraintes propriétaires.
- ✓ Désormais, nous disposons d'un puissant outil d'aide à la décision. Il nous permettra de développer des collaborations avec les décideurs publics, mais aussi avec les opérateurs de transport. Nous pourrions envisager plusieurs sujets de stage, de projet, et de thèse, en partenariat avec les disciplines des Sciences Humaines et Sociales, et celles du Transport et de la mobilité.

Au nombre des limites actuelles :

- ✓ La transformation des spécifications HiLLS en modèles Anylogic n'est pas automatique. Pour des études de petite dimension, ceci ne constitue pas un défi. Mais pour des études de grande envergure, la réécriture non automatisée des modèles HiLLS en leur contreparties Anylogic peut être chronophage et source d'erreurs.
- ✓ L'étude de cas présentée ne s'appuie pas sur des données réelles (les stops et autres signalisation n'existent pas dans le système réel, l'indiscipline chronique des conducteurs n'est pas prise en compte, etc.), et ne permet pas de dériver de conclusion sur la gestion du trafic urbain de Bamako.

Ce travail est donc loin d'être achevé. Nous envisageons les perspectives suivantes, pour notre activité de chercheur dans les années à venir :

- ✓ Nous allons entamer une étude plus réaliste du trafic urbain de Bamako, sur la base d'informations de terrain récoltées, avec une définition plus fine de divers profils de conducteur (en particulier, le comportement erratique, voire dangereux des conducteurs de Sotrama), et des objectifs ciblés (comme l'étude de l'impact de la régulation des feux ou de leur introduction à certains endroits du réseau sur la fluidité du trafic).
- ✓ Nous envisageons également d'élargir la zone d'étude, pour aller bien au-delà de celle circonscrite dans notre cas, dans l'optique de progressivement couvrir le réseau entier de la ville.
- ✓ Plus important, nous prévoyons la prise en compte d'autres perspectives, comme la météo (qui de toute évidence impacte la circulation des flux de transport urbain), mais aussi la croissance démographique, la pandémie, etc.

Bibliographie

- Aliyu, H. O., Maïga, O., & Traoré, M. K. (2016). The high level language for system specification: A model-driven approach to systems engineering. *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 7(01), 1641003.
- Al-Jameel, H. A. (2009). Examining and Improving the Limitations of Gazis-Herman-Rothery Car-following Model. In: *Salford Postgraduate Annual Research Conference (SPARC)*. University of Salford, UK.
- Aw, A., & Rascole, M. (2000). Resurrection of second order models of traffic flow. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 60, 916-938.
- Bando, M., Hasebe, K., Nakanishi, K., Nakayama, A., Shibata, A., & Sugiyama, Y. (1995). Phenomenological study of dynamical model of traffic flow. *Journal de Physique I*, 5(11), 1389-1399.
- Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata, A., & Sugiyama, Y. (1995). Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation. *Physical review E*, 51(2), 1035.
- Banos, A., & Thévenin, T. (2010). *Système de transport urbain: caractérisation de l'offre et estimation de la demande*. Lavoisier.
- Barceló, J. (2010). *Fundamentals of traffic simulation* (Vol. 145). New York: Springer.
- Barceló, J., Casas, J., Ferrer, J. L., & García, D. (1998). Modelling advanced transport telematic applications with microscopic simulators: The case of aimsun. *Simulation technology, Science and Art, Proceedings of the 10th European Simulation Symposium* (pp. 362-367). A. Bargiela and E. Kerckhoffs (Eds.).
- Barceló, J., Ferrer, J. L., & Grau, R. (1994). AIMSUN2 and the GETRAM Simulation Environment. *Proc. 13th EURO Conference*.
- Ben-Akiva, M., Bierlaire, M., Burton, D., Koutsopoulos, H. N., & Mishalani, R. (2001). Network State Estimation and Prediction for Real-Time Transportation Management Applications. *Networks and Spatial Economics*, 1(3/4), 293-318.
- Bonnafous, A. (1996). Le système des transports urbains. *Economie et statistique. Regard socioéconomique sur la structuration de la ville*, 294-295, 99-108.
- Bonnafous, A., & Puel, H. (1983). *Physionomies de la ville* (Vol. 8). Editions de l'Atelier.
- Borschchev, A. (2013). *The big book of simulation modeling. Multimethod modeling with AnyLogic 6*.
- Bourrel, E., & Lesort, J. B. (2003). Mixing microscopic and macroscopic representations of traffic flow: Hybrid model based on Lighthill–Whitham–Richards theory. *Transportation Research Record*, 1852(1), 193-200.
- Brackstone, M., & McDonald, M. (1999). Car-following: a historical review. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2(4), 181-196.
- Brailsford, S., Churilov, L., & Dangerfield, B. (2014). *Discrete-Event Simulation and System Dynamics for Management Decision Making, First Edition*. Wiley.
- Brockfeld, E., Barlovic, R., Schadschneider, A., & Schreckenberg, M. (2001). Optimizing traffic lights in a cellular automaton model for city traffic. *Physical Review E*, 64(5), 056132.
- Buisson, C., & Lesort, J. B. (2010). *Comprendre le trafic routier. Méthodes et calcul*. Editions du Certu.
- Burghout, W. (2004). *Hybrid microscopic-mesoscopic traffic simulation*. Doctoral Dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

- Burghout, W. (2005). Mesoscopic simulation models for short-term prediction. *PREDIKT project report CTR*, 3.
- Cameron, G. D., & Duncan, G. I. (1996). PARAMICS—Parallel microscopic simulation of road traffic. *The Journal of Supercomputing*, 10(1), 25-53.
- Cascetta, E. (2009). *Transportation systems analysis: models and applications* (Vol. 29). Springer Science & Business Media.
- Chandler, R. E., Herman, R., & Montroll, E. W. (1958). Traffic dynamics: studies in car following. *Operations Research*, 6(2), 165-184.
- Chi, S. D., Lee, J. O., & Kim, Y. K. (1995). Discrete event modeling and simulation for traffic flow analysis. In *Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century. IEEE International Conference on*, 1, 783-788.
- Cohen, S. (1993). *Ingénierie du Trafic Routier. Eléments de théorie du trafic et applications. Variables de trafic macroscopiques*.
- Daganzo, C. (1995). Requiem for second-order fluid approximations of traffic flow. *Transportation Research Part B, Methodological*, 29(2).
- Djitog, I., Aliyu, H. O., & Traoré, M. K. (2017). Multi-Perspective Modeling of Healthcare Systems. *International Journal of Privacy and Health Information Management (IJPHIM)*, 5(2), 1-20.
- Djitog, I., Aliyu, H. O., & Traoré, M. K. (2018). A model-driven framework for multi-paradigm modeling and holistic simulation of healthcare systems. *Simulation*, 94(3), 235-257.
- El Hmam, M. S., Jolly, D., Abouaissa, H., & Benasser, A. (2008, janvier). Modelisation hybride du flux de trafic. Methodologies ET Heuristiques pour l'Optimisation des Systemes Industriels,. *Mohsi*, 193-198.
- Flekkøy, E. G., Wagner, G., & Feder, J. (2000). Hybrid model for combined particle and continuum dynamics. *EPL (Europhysics Letters)*, 52(3), 271.
- Gawron, C. (1998). *Simulation-Based Traffic Assignment: Computing User Equilibria in Large Street Networks*. Cologne: PhD thesis, University of Cologne.
- Gazis, D. C. (2002). *Traffic theory* (Vol. 50). Springer Science & Business Media.
- Gazis, D. C., Herman, R., & Potts, R. B. (1959). Car-following theory of steady state flow. *Operations Research*, 7(4), 499-505.
- Gazis, D. C., Herman, R., & Rothery, R. W. (1961). Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow. *Operations research*, 9(4), 545-567.
- Gerlough, D. L., & Huber, M. J. (1975). *Traffic flow theory: a monograph*. TRB special report 165.
- Gipps, P. G. (1981). A behavioral car-following model for computer simulation. *Transport Res B*, 15, 105–111.
- Gipps, P. G. (1986). A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 20(5), 403-414.
- Greenshields, B. D., Channing, W., & Miller, H. (1935). A study of traffic capacity. In *Highway research board proceedings. National Research Council (USA)*. 1935. Highway Research Board.
- Grigoryev, I. (2015). *AnyLogic 7 in three days. A quick course in simulation modeling*.
- Grigoryev, I. (2018). *AnyLogic in three days. A quick course in simulation modeling*.
- Guide, T. S. (2008). *Traffic Simulation Software*. Caliper. MA, 18.
- Haj-Salem, H., Elloumi, N., Mammam, S., Papageorgiou, M., Chrisoulakis, J., & Middelham, F. (1994). METACOR: A macroscopic modelling tool for urban corridor. *Towards An Intelligent Transport System. Proceedings Of The First World Congress On Applications Of Transport Telematics and Intelligent Vehicle-Highway Systems*, 3. Paris.

- Haj-Salem, H., Elloumi, N., MAMMAR, S., Papageorgiou, M., Chrisoulakis, J., & Middelham, F. (1994). METACOR: A Macroscopic Modelling Tool for Urban Corridor.
- Hoogendoorn, S. P., & Bovy, P. H. (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), pp. 283-303.
- Jayakrishnan, R., Mahmassani, H. S., & Hu, T. Y. (1994). An Evaluation Tool for Advanced Traffic Information and Management Systems in Urban Networks. *Transportation Research C*, 2C, 129-147.
- Kesting, A., Treiber, M., & Helbing, D. (2007). General lane-changing model MOBIL for car-following models. *Transportation Research Record*, 1999(1), 86-94.
- Koné, Y., Maïga, O., & Traoré, M. K. (2020). USING HILLS AS A COMMON CONCRETE SYNTAX FOR SES AND DEVS: APPLICATION TO MICROSCOPIC SIMULATION OF TRAFFIC. *SummerSim*.
- Kosonen, I. (1996). *HUTSIM - Simulation tool for traffic signal control planning*. Transportation Engineering, Publication 89. Otaniemi.
- Laval, J. A., & Leclercq, L. (2008). Microscopic modeling of the relaxation phenomenon using a macroscopic lane-changing model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(6), 511-522.
- Leclercq, L., & Becarie, C. (2012). Meso lighthill-whitham and richards model designed for network applications. 12-0387.
- Leonard, D. R., Power, P., & Taylor, N. (1989). CONTRAM: structure of the model. *Transportation Research Laboratory, Crowthorn TRL Report RR*, 178.
- Leutzbach, W. (1988). *Introduction to the theory of traffic flow* (Vol. 47). Berlin: Springer-Verlag.
- Lighthill, M. J., & Whitham, G. B. (1955). On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 229(1178), 317-345.
- Magne, L., Rabut, S., & Gabard, J. F. (2000, May). Towards an hybrid macro-micro traffic flow simulation model. *INFORMS spring 2000 meeting*.
- Mahut, M. (2001). A multi-lane extension of the Space-Time Queue Model of Traffic Dynamics. *TRISTAN IV, Azores Islands*.
- Mahut, M., Florian, M., & Tremblay, N. (2003). Space-Time Queues and Dynamic Traffic Assignment: A model, algorithm and applications. *Transportation Research Board*.
- Maïga, O. (2015). *An Integrated Language for the Specification, Simulation, Formal Analysis and Enactment of Discrete Event Systems*. Clermont Ferrand, France: PhD Thesis, Université des Sciences, Techniques et Technologies de Bamako & Université Blaise Pascal – Clermont Ferrand 2.
- May, A. D. (1990). *Traffic flow fundamentals*.
- Messner, A., & Papageorgiou, M. (1990). METANET: A macroscopic simulation program for motorway networks. *Traffic engineering & control*, 31(8-9), 466-470.
- Nagel, K., & Schreckenberg, M. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de physique I*, 2(12), 2221-2229.
- Newell, G. F. (1961). Nonlinear effects in the dynamics of car following. *Operations Research*, 9, 209-229.
- Ören, T. I., Zeigler, B. P., & Elzas, M. S. (1985). *Simulation and model-based methodologies: An integrative view* (Vol. 10). NATO ASI Series, Series F: Computer and System Sciences.
- Payne, H. J. (1971). Models for Freeway Traffic and Control. In: *Bekey, G.A. (ed), Mathematical Models of Public Systems*, 1, 51-61.
- Prigogine, I., & Herman, R. (1971). Kinetic theory of vehicular traffic. 100.

- Richards, P. I. (1956). Shock waves on a Highway. *Operations Research*, 4(1), 42-51.
- Rickert, M., & Wagner, P. (1996). Parallel real-time implementation of large-scale, route-plan-driven traffic simulation. *International Journal of Modern Physics C*, 7(02), 133-153.
- Sarjoughian, H. S., & Cellier, F. E. (2013). *Discrete event modeling and simulation technologies: a tapestry of systems and AI-based theories and methodologies*. Springer Science & Business Media.
- Sewall, J., Wilkie, D., & Lin, M. C. (2011, December). Interactive hybrid simulation of large-scale traffic. *Proceedings of the 2011, SIGGRAPH Asia Conferenc*, pp. 1-12.
- Smith, G. (2012). *The Object-Z Specification Language* (Vol. 1). Springer Science & Business Media.
- Traoré, M. K. (2019). Multi-Perspective Modeling and Holistic Simulation. *Complexity Challenges in Cyber Physical Systems*, 83.
- Traoré, M. K., & Muzy, A. (2006). Capturing The Dual Relationship Between Simulation Models and Their Context. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 14(2), 126-142.
- Traoré, M. K., Zacharewicz, G., Duboz, R., & Zeigler, B. (2018). Modeling and simulation framework for value-based healthcare systems. *SIMULATION*, 0037549718776765.
- Treiber, M., & Kesting, A. (2014). Traffic flow dynamics: data, models and simulation. *Physics Today*, 67(3), 54.
- Treiber, M., Hennecke, A., & Helbing, D. (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical review E*, 62(2), 1805.
- Van Vliet, D. &. (1997). Saturn 9.3-user manual. *The Institute for Transport Studies*, 3.
- Wainer, G. A., & Mosterman, P. J. (2016). *Discrete-event modeling and simulation: theory and applications*. CRC press.
- Zeigler, B. P. (1976). *Theory of Modeling and Simulation*. Wiley Interscience.
- Zeigler, B. P. (1984). *Multifaceted modelling and discrete event simulation*.
- Zeigler, B. P., Kim, T. G., & Praehofer, H. (2000). *Theory of modeling and simulation*. Academic press.
- Zeigler, B. P., Traoré, M. K., Zacharewicz, G., & Duboz, R. (2019). *Value-based Learning Healthcare Systems*. Institution of Engineering and Technology.
- Zhang, H. (2002). A non-equilibrium traffic model devoid of gas-like behavior. *Transportation Research Part B, Methodological*, 36, 275-190.