

Modèle Multiniveau Dynamique basé sur la Densité: Application au Trafic Routier à Grande Échelle

Igor Haman Tchappi^{a,b}
igortchappi@gmail.com

Stéphane Galland^b
stephane.galland@utbm.fr

Yazan Mualla^b
yazan.mualla@utbm.fr

Amro Najjar^{d,e}
najjar@cs.umu.se

Vivient Corneille Kamla^c
vckamla@gmail.com

Jean Claude Kamgang^c
jckamgang@gmail.com

^aFaculty of Sciences, University of Ngaoundere, Ngaoundere, BP : 454, Cameroon

^bCIAD, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, F-90010 Belfort, France

^cENSAI, University of Ngaoundere, Ngaoundere, BP : 454, Cameroon

^dUmea University, 901 87 Umea, Sweden

^eAI-Robolab/ICR, Computer Science and Communications, University of Luxembourg, Luxembourg

Résumé

De nos jours, avec l'émergence d'objets et de voitures connectés, les systèmes de trafic deviennent de plus en plus complexes et présentent des comportements hiérarchiques à plusieurs niveaux d'observation. La plupart des modèles de simulation multiniveaux utilisent un ensemble de niveaux prédéfinis. La commutation dynamique des niveaux lors de l'exécution de la simulation permet d'adapter le modèle aux contraintes liées à la qualité des résultats ou aux ressources de calcul disponibles. Cet article présente un nouveau modèle multiniveau basé sur la densité pour la gestion dynamique d'une hiérarchie représentant un système de trafic. La proposition étend l'algorithme DBSCAN dans le contexte des systèmes multi-agents holonique. Une méthode de commutation dynamique entre les différents niveaux d'abstractions est proposée. À cette fin, des indicateurs multiniveaux basés sur l'écart type sont proposés afin d'évaluer la cohérence des résultats de la simulation. Le modèle proposé est testé avec le modèle de poursuite de voiture Intelligent Driver Model.

Mots-clés : Système MultiAgent Holonique, Modélisation et simulation multiniveau, DBSCAN, Trafic

Abstract

Nowadays, with the emergence of connected objects and cars, the road traffic systems become more and more complex and exhibit hierarchical and multi-level behaviors. Most of the multilevel simulation models use a set of predefined levels. Dynamic adaptation of the levels during the simulation execution enables to adapt the model to constraints related to the quality of the results or the available computing resources. This paper presents a novel density-based multilevel model for the dynamic management of an holarchy that is representing a road traffic system. The proposal extends the DBSCAN algorithm in the context of holonic multiagent systems. A method for switching dynamically between the different abstractions levels is proposed. To this purpose, mul-

tilevel indicators based on standard deviation are proposed in order to evaluate the consistency of the simulation results. The proposed model is tested with the Intelligent Driver car-following model on typical traffic study cases.

Keywords: Holonic Multiagent System; Multilevel Modeling and Simulation; DBSCAN; Road Traffic; Intelligent Driver Model

1 Introduction

La croissance de la population et l'augmentation du nombre d'utilisateurs sur les routes constituent aujourd'hui une source considérable de problèmes divers d'ordre sécuritaire, sanitaire, économique, énergétique et environnemental. Pour faire face à ces défis, il est nécessaire de fournir des systèmes de transport efficaces et durables. La modélisation et la simulation des flux de trafic est une des solutions importantes pour apporter des réponses à la problématique de l'amélioration des conditions de circulation des biens et des personnes en termes de réglementation et d'infrastructure. Il existe trois principales approches de modélisation et de simulation du trafic routier [14] : l'approche microscopique, mésoscopique et macroscopique. Les modèles microscopiques sont précis mais ne passent pas à l'échelle [21, 14], tandis que les modèles macroscopiques passent à l'échelle mais présentent un comportement grossier [21, 14]. Les modèles multiniveaux (combinaison de plusieurs niveaux de détail au sein d'un même modèle) quant à eux semblent être une approche appropriée pour modéliser le trafic à grande échelle [21, 2, 30]. La plupart des modèles multiniveaux de flux de trafic issus de la littérature [2, 21, 13] divisent premièrement le réseau routier en sections, de telle sorte que chaque représentation (micro, méso ou macro) soit associée à une section du réseau routier, et deuxièmement gèrent la transition à la frontière entre ces représentations. Ces modèles multiniveaux de trafic sont statiques car

les connexions entre les niveaux d'abstraction sont fixées à priori et ne peuvent pas être modifiées au cours de l'exécution [1]. Cependant, pour pouvoir observer certains phénomènes émergents tels que la congestion, une approche de modélisation multiniveaux dynamique est nécessaire [1, 27]. Contrairement aux modèles de trafic multiniveaux statiques, cet article propose un modèle multiniveau dynamique de trafic au travers des Systèmes MultiAgents Holonique (SMAH)

Les SMAH ont été appliqués avec succès à un large éventail d'applications [11, 10, 9, 29, 8, 26]. Les organisations holoniques font partie des modèles organisationnels réussis qui ont été introduit dans les Systèmes MultiAgents (SMA) [11]. Un holon, selon Koestler [18], est défini simultanément comme un tout et une partie qui peut se composer d'autres holons. La modélisation holonique est utilisée pour modéliser la nature hiérarchique intrinsèque des systèmes. Un SMAH est donc une structure récursive de holons [11]. Un SMAH permet de modéliser des systèmes complexes en définissant plusieurs niveaux d'abstraction du système [11]. Les SMAH sont des approches appropriées pour la modélisation et la simulation multiniveaux [10] de problèmes associés à plusieurs niveaux de détail, tel que le trafic [29].

Pour effectuer la modélisation et la simulation multiniveaux du trafic routier à grande échelle, le papier adapte l'algorithme DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) [6] à la modélisation et à la simulation multiniveaux du trafic via son extension holonique H-DBSCAN [31]. DBSCAN est un algorithme de partitionnement qui partitionne une base de données en clusters disjoints de sorte que les objets similaires appartiennent au même cluster. De même, H-DBSCAN partitionne une population d'agents en groupes disjoints de telle sorte que les agents proches appartiennent au même groupe. Le principal avantage de DBSCAN et de son extension holonique H-DBSCAN est qu'ils ne nécessitent pas de prédétermination du nombre de clusters à priori [6]. Cet avantage permet de créer un modèle multiniveau basé sur la densité, de sorte que la population d'agents représente le niveau inférieur et que les groupes d'agents trouvés par H-DBSCAN représentent le niveau supérieur. Pour évaluer notre modèle multiniveau basé sur la densité, une application est présentée et discutée. Le principal atout du modèle multiniveau proposé est sa dynamique, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de représentation fixée à priori pour les sections de la route et les représentations peuvent évoluer au cours de l'exécution.

La suite de cet article est organisée comme suit : la Section 2 présente les SMAH et le principe des modèles multiniveaux de trafic. La section 3 présente le modèle multiniveaux dynamique basé sur la densité proposé pour le trafic. La section 4 présente une application, l'évaluation et les performances de la proposition. Enfin, la section 5 conclut cet article et donne les axes de recherche futurs.

2 Travaux Connexes

2.1 Les Systèmes MultiAgents Holoniques

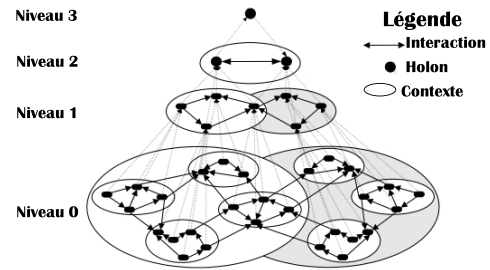


FIGURE 1 – Une holarchie imbriquée à quatre niveaux d'abstraction

Un SMAH est type particulier des SMA [22, 7, 15, 16] composé des holons. Le terme “holon” a été inventé par le philosophe hongrois Arthur Koestler en le basant sur le mot grec “holos” signifiant “tout” et le suffixe “-on” qui signifie “partie” [18]. Un holon est une structure fractale stable, cohérente et constituée de plusieurs holons agissant en tant que sous-structures. Un exemple biologique est donné par Koestler : un être humain est constitué d'organes, les organes à leur tour sont constitués de cellules qui peuvent être décomposées davantage et ainsi de suite. Aucun de ces composants biologiques ne peut être compris sans ses sous-composants ou sans le super-composant dont il fait partie. Dans le contexte des SMAH, un holon est assimilé à un agent qui peut se composer d'autres agents. Les holons sont des groupes autonomes et autosimilaires, imbriqués ou non. L'auto-similarité des holons permet de construire les SMAH sur la base de la composition des holons. Un SMAH est une structure récursive de holons [11]. Une holarchie représentée par la figure 1 est un schéma d'interconnexion entre les holons. Un SMAH permet deux types de communication [26] : (i) communication intra-niveau : holons communiquant avec d'autres holons au même niveau d'abstraction (“communication horizontale”), et (ii) communication inter-niveaux : lorsque des holons de deux niveaux différents communiquent (“communication verticale”).

	SMA	SMAH
Approche de conception	réductionnisme	holisme (hiérarchique et récursif)
Composition	agent atomique	holons (agent composé d'autres agents)
Représentation	Fine	Fine et grossière
Propriété émergente	Oui	Oui
Conception	Hétérogénéité des agents	Homogénéité des holons
Mise à l'échelle	Non	Oui

TABLE 1 – Différences principales entre MAS et SMAH

La table 1 met en évidence les principales différences entre les MAS et les SMAH. Les SMAH exhibent un comportement proche du comportement réel du système mais ne passe pas à l'échelle [25, 14]. Par contre, les SMAH peuvent exhiber un comportement grossier mais passent à l'échelle [10]. Pour modéliser et simuler des systèmes complexes à grande échelle, il faut gérer un compromis entre la précision de la simulation et la disponibilité des ressources computationnelles [25, 10]. Comme indiqué dans la Table 1, les SMAH semblent être approprié pour modéliser et simuler un système complexe à grande échelle [26, 10]. Puisque que les SMAH passent à l'échelle [9, 11] et qu'ils ont été appliqué avec succès dans la modélisation et la simulation du trafic [30, 26], cet article se focalise sur les SMAH avec communication intra et inter-niveaux pour la modélisation et la simulation du trafic à grande échelle basée sur la densité.

2.2 Concepts Basiques de la Modélisation Multiniveaux du Flux du Trafic

Comme indiqué précédemment, les approches microscopiques, mésoscopiques et macroscopiques permettent la modélisation et la simulation du trafic respectivement par des représentations fines, grossières et très grossières. Aucune approche n'est la meilleure car chacune d'elles possèdent ses avantages et ses inconvénients. En effet, les modèles microscopiques nécessitent un coût computationnel élevé et sont généralement appliqués avec une grande précision sur des petites zones urbaines, tandis que les modèles macroscopiques sont incapables de gérer la destination des véhicules et sont généralement appliqués sur des autoroutes avec un coût de calcul acceptable [30]. Les modèles multiniveaux ont été développés afin d'étudier les situations dans lesquelles les modèles microscopiques et macroscopiques ne conviennent pas, comme la modélisation et la simulation de trafic à grande échelle [21]. Les modèles multiniveaux combinent les avantages des modèles macro et micro, mais ils sont difficiles à réaliser [30]. En effet, comme le flux de trafic est modélisé par la vitesse, la longueur, l'accélération, la position, etc. des véhicules atomiques au niveau micro, tandis qu'il est généralement modélisé de manière macroscopique par la densité, le flux et la vitesse de l'ensemble du trafic, la gestion de l'intégration de ces deux représentations au sein d'un même modèle est une tâche difficile [30]. Plusieurs modèles multiniveaux de trafic ont été proposés dans la littérature [2, 21, 13]. La méthode la plus couramment proposée pour gérer la complexité des modèles multiniveaux de trafic est la division du réseau routier en parties de sorte que chaque niveau de détail soit associé à une partie du réseau routier. Le principe d'hybridation consiste donc à gérer la transition entre ces niveaux de détail à la frontière du réseau routier par l'agrégation/désagrégation [21] par exemple. La figure 2 présente la méthodologie courante des modèles multiniveaux de trafic.

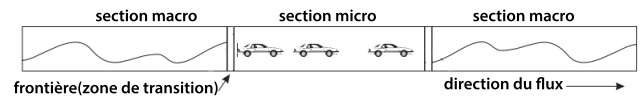


FIGURE 2 – Principe des modèles multiniveaux statiques [2]

Cette méthodologie possède plusieurs inconvénients :

- les niveaux de détail à interfacier sont choisis à priori soit micro-macro, micro-méso ou méso-macro. De plus, ces niveaux sont généralement deux. Nous soutenons qu'il peut être intéressant de prendre en compte plus de deux niveaux de détail notamment les représentations micro, méso et macro au sein d'un modèle multiniveau de trafic.
- manque de flexibilité et de réutilisabilité. En fait, les résultats du schéma de couplage macro-micro avec le modèle [19] de Lighthill et Whitham (LWR) pour la section macro et le modèle de vitesse optimale [24] pour la section micro présentée par Bourrel and Lesort [2], par exemple, ne peut pas être facilement étendu ni réutilisé pour modéliser un nouveau schéma de couplage du modèle LWR et du modèle Intelligent Driver Model (IDM) [32].
- le modèle multiniveau est statique et les niveaux de détail sont fixés à priori sur des sections routière et cette configuration ne peut pas évoluer au cours du temps. Cependant, pour pouvoir observer la formation de congestion ou pour trouver l'emplacement exact d'un bouchon dans une section macro, une approche de modélisation hybride dynamique est nécessaire [1].

Navarro et al. [23], Gaud et al. [10] ont proposé un modèle dynamique et multiniveau très intéressant. Cependant, ce modèle est dédié à la mobilité des piétons. Il existe très peu de travaux consacrés à la modélisation dynamique multiniveau du trafic routier [1, 12]. Tchappi et al. [30] dans leur revue identifie seulement deux travaux dans la littérature proposant de basculer dynamiquement et automatiquement entre les représentations du système : les travaux de l'équipe de H. Abouaïssa [12, 1] et les travaux de Sewall et al. [27]. Hassane et al. [12] propose SIMILAR/JAM-FREE pour gérer la modélisation dynamique multiniveau du trafic routier. SIMILAR est un framework utilisant le principe influence-réaction et la technologie à base d'agent pour la conception des simulations. JAM-FREE est un simulateur multiniveau de trafic à base d'agent. L'objectif des auteurs était de modéliser de manière dynamique et automatique le trafic multiniveau. L'idée et l'approche poursuivie par ces auteurs est très intéressante. Cependant, le modèle est très peu décrit,

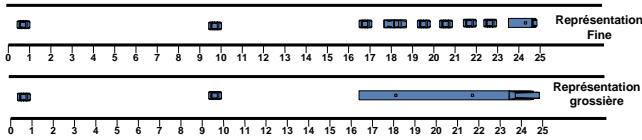


FIGURE 3 – Représentation fine/grossière (niveau inférieur/niveau supérieur)

plusieurs parties du modèle sont inachevées et le projet semble abandonné.

Sewall et al. [27] proposent un algorithme en temps réel pour la modélisation et la simulation hybride du trafic à grande échelle en utilisant à la fois une représentation continu et une représentation agent. Les auteurs proposent des techniques de couplage dynamique entre une représentation de véhicules discrets et une représentation continue. Ce travail est également intéressant, cependant, il se focalise sur la visualisation.

Cet article propose un modèle multiniveau dynamique et automatique du flux de trafic via les SMAH. Les exigences du modèle proposé sont :

- prendre en compte plusieurs niveaux de détail (micro, méso, macro) ;
- relier plusieurs niveaux de détail (micro, méso, macro) et permettre ainsi de faire ressortir les propriétés émergentes et la relation qui existe entre les niveaux d'abstraction ;
- gérer les transitions dynamique entre les niveaux de détail (micro, méso et macro) ;
- Pas de représentation fixe dédiée a priori pour un niveau particulier de détail ;
- migration dynamique (manque de ressources de calcul, visualisation, besoins de l'utilisateur, contraintes, etc.) entre les niveaux de détail (micro, méso et macro) ;

3 Modèle Multiniveau Dynamique basé sur la Densité

Cette section présente notre modèle dynamique multiniveau basé sur la densité pour gérer la simulation au cours du temps. L'idée du modèle proposée est inspirée du clustering de flux de données [28]. En effet, étant donné qu'un flux massif de données d'objets arrivent en permanence et à grande vitesse par des capteurs, il devient impossible de stocker toutes ces données en mémoire et même sur le disque dur [28]. De plus, le temps de traitement limité est un défi important pour les algorithmes de clustering de flux évolutif de données. Un moyen courant de résoudre ces défis consiste à conserver les résumés sur les données au lieu des données brutes d'origine et à les utiliser pour le clustering [4, 20]. Cette idée fonctionne assez bien pour clustering de flux évolutif de données. Notre proposition adapte cette

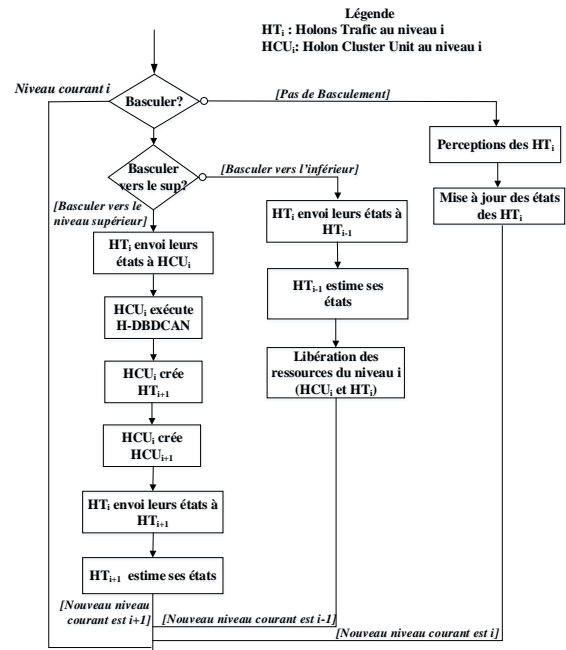


FIGURE 4 – Simulation Dynamique du comportement des holons

idée à la modélisation et à la simulation multiniveau à grande échelle du trafic. En effet, la simulation est effectuée à plusieurs niveaux d'abstraction, tel que le niveau micro représente des individus atomiques tandis que les niveaux supérieurs peuvent représenter des groupes d'individus. En d'autres termes, pour modéliser et simuler le trafic multiniveau dynamique à grande échelle, certains véhicules de la représentation fine sont regroupés pour obtenir une représentation grossière. La figure 3 présente un exemple de l'idée de la proposition. Comme indiqué sur cette figure, la représentation fine affiche 9 véhicules et la représentation grossière affiche 3 véhicules tel que le groupe formé de 7 véhicules (véhicules en convoi) est représenté par un véhicule de moindre précision. Les véhicules en convoi sont des véhicules ayant à peu près la même vitesse, se déplaçant sur la même voie et ayant à peu près la même distance entre eux. Les véhicules en convoi mènent à un état stationnaire du trafic. Un état de trafic est stationnaire [14] quand il ne change pas au cours du temps (il conserve la même configuration spatiale).

Chaque entité atomique du système est représentée par un agent. Tous les agents représentent la population globale. Comme indiqué précédemment, un holon est assimilé à un agent qui peut être composé d'autres agents. Au niveau microscopique (niveau le plus précis), un agent est un holon non décomposé (atomique). Aux niveaux supérieurs, un holon est un groupe de holons, qu'il soit composé ou non. Un holon peut donc être considéré soit comme une entité individuelle, soit comme un ensemble de sous-holons. Cette dualité est généralement appelée

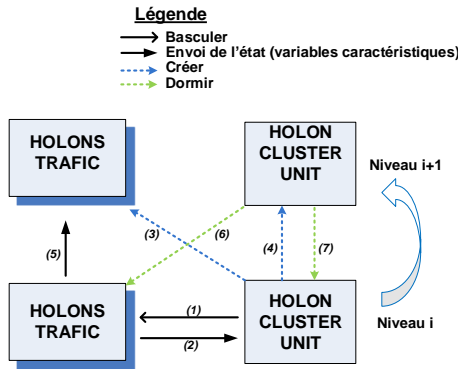


FIGURE 5 – Commuter vers une représentation grossière

effet Janus ¹ La proposition comporte deux types de holons :

- **Holons Trafic:** Les holons trafic sont des individus ou des groupes d'individus au sein du système de trafic. Les holons trafic peuvent être une paire véhicule/conducteur ou un groupe de paires véhicule/conducteur qui ont sensiblement la même vitesse, se déplacent sur la même voie et qui sont sensiblement équidistant.
- **Holons Cluster Unit:** Les holons cluster unit sont des holons particuliers créés à chaque niveau de la holarchie afin de simplifier le management de la holarchie au cours du temps. Le holon cluster unit n'affecte pas le comportement des holons trafic. Il est requis dans des circonstances particulières (lors d'une requête de commutation). Il y a toujours un holon cluster unit par niveau d'abstraction.

Les holons peuvent être simulés à plusieurs niveaux d'abstraction. La figure 4 décrit le modèle de comportement des holons. Il y a trois possibilités principales pour la simulation de holons :

- **Aucune commutation:** conserver la même représentation (statu-quo au niveau courant i). Sans requête de commutation, les holons trafic sont simulés au niveau courant i . Les holons trafic perçoivent l'environnement et mettent à jour leurs états à chaque pas de temps, comme indiqué dans la figure 4. Dans ce cas, la seule tâche du holon cluster unit est de vérifier si une requête de commutation vers le niveau supérieur ou inférieur est requise en fonction des insuffisances de ressources de calcul, de la visualisation, des contraintes, etc. Le nouveau niveau courant reste i et la simulation se poursuit au niveau i .
- **Commuter vers le niveau supérieur:** vers une représentation plus grossière (du niveau courant i vers le niveau $i + 1$), comme illustré par la

figure 5. Dans ce cas, le holon cluster unit au niveau i envoie une requête de commutation aux holons trafic au niveau i , comme indiqué par la flèche (1). Tous les holons trafic du niveau i envoient leurs états au holon cluster unit au niveau i indiqué par la flèche (2). Le holon cluster unit au niveau i rassemble les variables caractéristiques de tous les holons trafic au niveau i et applique l'algorithme H-DBSCAN [31] afin de construire le niveau $i + 1$. H-DBSCAN est une extension de l'algorithme DBSCAN [6] que nous avons proposé dans nos travaux antérieurs. Comme DBSCAN, dans H-DBSCAN [31], la densité associée à un holon h est obtenue en comptant le nombre de holons dans une région d'un rayon spécifié autour du holon h (les voisins proches du holon h). Les holons dont la densité est supérieure à un seuil spécifié sont regroupés dans un super-holon situé au niveau immédiatement supérieur. En d'autres termes, le résultat de H-DBSCAN conduit le holon cluster unit à créer des super-holons trafic appropriés au niveau $i + 1$ (indiqués par la flèche (3)) tels que les sous-holons trafic en convoi au niveau i soient regroupés dans un seul super-holon trafic au niveau $i + 1$. Pour plus d'informations sur H-DBSCAN, le lecteur est renvoyé à [31]. Le holon cluster unit au niveau i crée également son propre super-holon cluster unit (holon cluster unit au niveau $i + 1$) représentée par la flèche (4). Ensuite, les sous-holons trafic au niveau i envoient leurs états à leurs super-holons trafic respectifs au niveau $i + 1$ indiqués par la flèche (5). Les super-holons trafic utilisent les états de leurs sous-holons trafic pour estimer leurs propres états. Tous les holons du niveau i deviennent inactifs, comme indiqué par la flèche (6-7), le nouveau niveau courant devient $i + 1$ et la simulation se poursuit au niveau $i + 1$. Notez que macro est le niveau le plus élevé : il n'est pas possible d'aller plus haut que le niveau macro.

- **Commuter vers le niveau inférieur:** vers une représentation plus fine (du niveau courant i vers le niveau $i - 1$), comme illustré par la figure 6. Dans ce cas, le holon cluster unit au niveau i envoie une requête de commutation aux holons trafic au niveau i , comme indiqué par la flèche (1). Puisque tous les sous-holons du niveau $i - 1$ sont inactifs, la première étape consiste à réinvoquer tous les sous-holons représentés par les flèches (2) et (3). Ensuite, chaque super-holon trafic au niveau i génère les états de ses sous-holons trafic selon une distribution probabiliste et envoie ces états à ses sous-holons trafic au niveau $i - 1$ indiqués par la flèche (4). Étant donné que les niveaux supérieurs diminuent la précision de la simulation et ne sont requis que si nécessaire (besoins de l'utilisateur, manque de ressources de calcul, visualisation, etc.), les niveaux supérieurs sont libérés lors du passage vers un niveau inférieur indiqué par la flèche (5-6). En effet, dans la mesure du possible, la

1. Janus est un ancien dieu romain décrit comme ayant deux visages, car il regarde à la fois vers le futur et vers le passé.

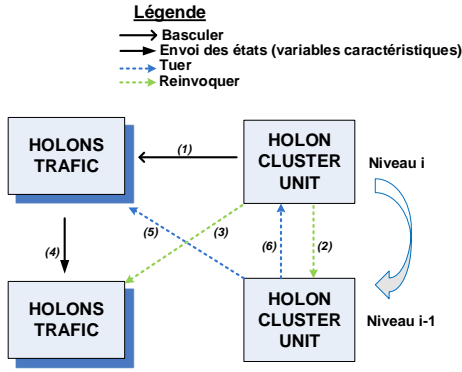


FIGURE 6 – Commuter vers une représentation plus fine

simulation a tendance à se dérouler autant que possible au niveau inférieur. Le nouveau niveau courant devient $i - 1$ et la simulation se poursuit au niveau $i - 1$. Notez que le niveau micro est le niveau le plus bas : il est impossible de descendre plus bas que le niveau micro.

Le modèle proposé est général et peut être adapté à plusieurs modèles de poursuite.

4 Application par le Modèle IDM (Intelligent Driver Model)

Le modèle d'accélération du holon trafic est basé sur le modèle IDM [32] et présenté dans la section 4.1. Notre modèle peut être adapté aux autres modèles de poursuite. Pour modéliser les holons trafic, la section 4.2 présente les paramètres décrivant les états internes des holons trafic. En cas de non commutation, les holons trafic perçoivent l'environnement (cf. section 4.3) et mettent à jour leurs états (cf. section 4.4). En cas de commutation vers le niveau immédiatement supérieur, les super-holons trafic estiment leurs états, présentés dans la section 4.5. Dans le cas d'une commutation vers le niveau immédiatement inférieur les sous-holons trafic estiment leurs états comme présenté dans la Section 4.5. Enfin, une étude de cas et une discussion sont présentées.

4.1 Intelligent Driver Model

IDM [32] est un modèle poursuite à temps continu pour la simulation du trafic sur autoroute et zone urbaine. Nous avons choisi IDM parce que sa mise en oeuvre est simple, que les résultats du calibrage sont disponibles et IDM tend à devenir un standard en matière de simulation microscopique du trafic. De plus, IDM a tendance à être un modèle de poursuite réaliste². IDM est formulé comme une équation différentielle ordinaire et, par conséquent, l'espace et

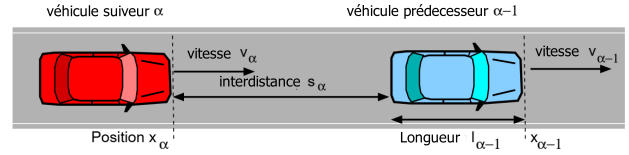


FIGURE 7 – Paramètres des modèles de poursuite. Les indices des véhicules α sont ordonnés de tel sorte que $(\alpha - 1)$ dénote le véhicule prédécesseur. s_α est la distance entre pare-chocs définie par $s_\alpha = x_{\alpha-1} - x_\alpha - l_{\alpha-1}$. l_α est la longueur du véhicule et x_α la position. La vitesse relative est définie par $\Delta v_\alpha := v_\alpha - v_{\alpha-1}$ [17]

le temps sont traités comme des variables continues. IDM est caractérisé par une fonction d'accélération $\dot{v} := dv/dt$ qui dépend de la vitesse réelle $v(t)$, de l'interdistance $s(t)$ et de la différence de vitesse $\Delta v(t)$ comme indiqué par la figure 7. L'accélération IDM du véhicule α est donnée par Eq. (1).

$$\dot{v}_\alpha = \frac{dv_\alpha}{dt} = a \left[1 - \left(\frac{v_\alpha}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v_\alpha, \Delta v_\alpha)}{s_\alpha} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\text{avec } s^*(v_\alpha, \Delta v_\alpha) = s_0 + v_\alpha T + \frac{v_\alpha \Delta v_\alpha}{2\sqrt{ab}}.$$

v_0 est la vitesse désirée. s_0 est l'inter-distance minimale. T est l'écart temporel désiré. a est l'accélération maximale du véhicule et b est la décélération confortable. L'accélération IDM d'un véhicule α peut se diviser en un terme représentant le trafic libre donné par $\dot{v}_\alpha^{libre} = a(1 - (v_\alpha/v_0)^\delta)$ et un terme représentant l'interaction donné par : $\dot{v}_\alpha^{int} = -a(s^*(v_\alpha, \Delta v_\alpha)/s_\alpha)^2$

4.2 Estimation des Paramètres des Holons Trafic

Les paramètres qui décrivent l'état d'un holon trafic α sont : la position x_α , la vitesse v_α , l'accélération \dot{v}_α , l'inter-distance courante entre le véhicule leader et le véhicule suiveur s_α , la voie où se déplacent les holons trafic L_α , la longueur l_α et le poids (le nombre de sous-holons trafic composant un super-holon trafic) w_α . En plus, il existe des paramètres IDM fixes, définis par le biais de la calibration : l'écart temporel désiré T , l'accélération maximale a et décélération b .

Comme indiqué précédemment, la complexité conduit à un compromis [25]. La simulation au niveau micro est précise mais elle nécessite un coût de calcul élevé, tandis que la simulation aux niveaux supérieurs est grossière mais possède un coût de calcul acceptable. Dans notre modèle, la simulation peut basculer vers une représentation plus grossière ou vers une représentation plus fine et inversement, sachant que les représentations les plus fines sont les

2. www.traffic-simulation.de

plus désirées. Comme nous considérons plusieurs niveaux de détail dans le même modèle, la question de la transition entre ces niveaux devient cruciale [10]. Les niveaux supérieurs diminuent la précision de la simulation et leur intégration nécessite donc de quantifier l'erreur d'approximation. Cette action est effectuée par des indicateurs multiniveaux au sein des SMAH [8, 9]. Les indicateurs multiniveaux décrits dans ce document sont basés sur l'écart type. L'écart-type est un concept statistique utilisé pour mesurer la dispersion d'un ensemble de données. Lorsque la valeur de l'écart type est petite alors les données sont sensiblement homogènes tandis que lorsque la valeur de l'écart type est élevée alors les données semblent être hétérogènes. Dans cet article, l'écart-type est utilisé pour mesurer l'homogénéité des sous-holons au sein de leur super-holon. La faible valeur de l'écart type signifie que les sous-holons semblent homogènes et que leur regroupement au sein d'un super-holon semble être acceptable. Au contraire, la valeur élevée de l'écart type signifie que les sous-holons sont hétérogènes et que leur regroupement au sein d'un super-holon semble être mauvaise. L'écart-type s'applique aux variables vitesse σ^{vit} et inter-distance σ^{dist} . L'écart-type des vitesses mesure la dispersion de la vitesse des sous-holons et l'écart type des inter-distances mesure la dispersion des inter-distances entre les sous-holons. Notons que pour un holon atomique α , $\sigma_{\alpha}^{\text{vit}} = \sigma_{\alpha}^{\text{dist}} = 0$ et $w_{\alpha} = 1$.

4.3 Modèle de Perception : Mise à jour du voisinage

La simulation multiniveaux nécessite une distinction claire entre le modèle d'application agent et le modèle de l'environnement [10] afin de permettre une gestion indépendante et spécifique de leurs niveaux d'abstraction respectifs. Ce manuscrit se focalise sur le modèle d'application agent. Le modèle d'environnement multiniveaux pour la simulation de trafic basé sur les SMAH a déjà été proposé dans la littérature [9, 8]. Sur la base de ces travaux, un holon trafic α peut percevoir l'environnement à chaque pas de temps, ce qui lui permet de connaître la position et la vitesse du holon trafic prédécesseur $\alpha - 1$ donné par le modèle d'environnement. Cela permet au holon trafic de calculer l'inter-distance nette par rapport à son prédécesseur holon trafic s_{α} et à la différence de vitesse par rapport à son prédécesseur holon trafic Δv_{α} .

4.4 Modèle de comportement : Mise à jour des états

L'espace et le temps sont traités comme des variables continues par IDM. Notre modèle est un modèle à pas de temps. Nous avons donc besoin d'un schéma de comportement discret pour chaque holon trafic à chaque pas de temps. Dans les modèles de poursuite ou les modèles à base d'agents, il est

naturel d'utiliser un schéma explicite supposant les *accélérations* constantes à chaque intervalle de pas de temps Δt [17], ce qui conduit donc aux règles de mises à jour numériques présentées par Éq. (2). Eq. (2) converge vers la solution exacte de Eq. (1) pour $\Delta t \rightarrow 0$ [17]. Eq. (2) décrit le comportement d'un holon trafic utilisé pour mettre à jour ses états au cours du temps

$$\begin{aligned} v_{\alpha}(t + \Delta t) &= v_{\alpha}(t) + \dot{v}_{\alpha}(t)\Delta t, \\ x_{\alpha}(t + \Delta t) &= x_{\alpha}(t) + v_{\alpha}(t)\Delta t + \frac{1}{2}\dot{v}_{\alpha}(t)(\Delta t)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

4.5 Estimation des états du niveau inférieur vers le niveau supérieur

Soit h un super-holon trafic qui possède n de sous-holons trafic $h_{\alpha}, \alpha = 1, \dots, n$. Les indices α sont ordonnés de telle sorte que $(\alpha - 1)$ dénote le holon trafic prédécesseur. Les états (variables caractéristiques) d'un super-holon trafic h sont estimés à partir des états de ses sous-holons trafic $h_{\alpha}, \alpha = 1, \dots, n$ et donnés par Eq. (3) - (9). Dans la suite, nous supposons que les variables avec indices sont pour les sous-holons trafic et les variables sans indices sont pour les super-holons trafic.

- **Vitesse:** La vitesse d'un super-holon trafic est donnée par Eq. (3). C'est la moyenne des vitesses de ses sous-holons trafic.

$$v = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n v_{\alpha} \quad (3)$$

- **Position:** La Position d'un super-holon trafic est donnée par Eq. (4). C'est la position du sous-holon trafic qui précède tous les autres sous-holons trafic.

$$x = x_1 \quad (4)$$

- **Voie:** La voie d'un super-holon trafic est donnée par Eq. (5). C'est la même voie que tous les sous-holons trafic.

$$L = L_{\alpha}, \alpha = 1, \dots, n \quad (5)$$

- **Longueur:** La longueur d'un super-holon trafic est donnée par Eq. (6). C'est la longueur agrégée des sous-holons trafic ainsi que de l'inter-distance entre eux.

$$l = \sum_{\alpha=1}^n l_{\alpha} + \sum_{\alpha=1}^{n-1} s_{\alpha} \quad (6)$$

- **Poids:** Le poids d'un super-holon trafic est donné par Eq. (7). C'est la somme des poids de ses sous-holons trafic.

$$w = \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} \quad (7)$$

- **Ecart type des vitesses:** L'écart type des vitesses est donné par Eq. 8. Il mesure la dispersion entre les vitesses des sous-holons trafic.

$$\sigma^{vit} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n (v_{\alpha} - \mu^{vit})^2} \quad (8)$$

$$\mu^{vit} = v = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n v_{\alpha}$$

- **l'écart type des interdistances:** L'écart type des inter-distances est donné par Eq. 9. Il mesure la dispersion des inter-distances entre les sous-holons trafic.

$$\sigma^{dist} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{\alpha=1}^{n-1} (s_{\alpha} - \mu^{dist})^2} \quad (9)$$

$$\mu^{dist} = 1/(n-1) \sum_{\alpha=1}^{n-1} s_{\alpha}$$

Plus la valeur de σ^{dist} et de σ^{vit} , est petite, plus le regroupement au sein d'un super-holon trafic est acceptable.

4.6 Estimation des états du niveau supérieur vers le niveau inférieur

Les états (variables caractéristiques) des sous-holons trafic $h_{\alpha}, \alpha = 1, \dots, n$ sont générés à partir de l'état de leur super-holon trafic h .

- **Vitesses:** Nous supposons que les vitesses des sous-holons trafic au sein du super-holon suivent la loi normale avec la moyenne μ^{vit} et l'écart type σ^{vit} . La loi normale est le modèle le plus répandu pour caractériser la variation quantitative des données. La loi normale est une norme de référence pour de nombreux problèmes de probabilité et se rapproche à de nombreux phénomènes naturels [5]. Les données dans la loi normale sont résumées en utilisant la moyenne et l'écart type [5], ce qui est le cas dans notre modèle. Pour générer les vitesses des sous-holons trafic basées sur la vitesse et l'écart type de la vitesse du super-holon trafic, le modèle utilise la méthode de Box-Muller [3]. La transformation de Box-Muller est une méthode d'échantillonnage de nombres pseudo-aléatoire permettant de générer des paires de nombres aléatoires indépendants, standard et normalement distribués. La transformation Box-Muller standard génère des valeurs à partir de la loi normale standard $\mathcal{N}(0, 1)$. De $\mathcal{N}(0, 1)$, nous pouvons déduire $\mathcal{N}(\mu^{vit}, (\sigma^{vit})^2)$ tel que si $X \sim \mathcal{N}(0, 1)$ et $Z = \mu^{vit} + \sigma^{vit} X$ alors $Z \sim \mathcal{N}(\mu^{vit}, (\sigma^{vit})^2)$. Les vitesses $v_{\alpha, \alpha=1, \dots, n}$ des sous-holons trafic sont données par Eq. 10.

$$v_{\alpha, \alpha=1, \dots, n} = \mu^{vit} + \sigma^{vit} \text{Box-Muller}(0, 1) \quad (10)$$

- **Positions:** Nous supposons que les interdistan-ces entre les sous-holons trafic au sein de leur super-holon suivent la loi normale avec la moyenne μ^{dist} et l'écart type σ^{dist} . La position des sous-holons trafic $x_{\alpha, \alpha=1, \dots, n}$ est donnée par Eq. (11).

$$\begin{cases} x_1 = x \\ x_{\alpha, \alpha=2, \dots, n} = x_{\alpha-1} - l_{\alpha-1} - s_{\alpha} \end{cases} \quad (11)$$

avec $s_{\alpha} = \mu^{dist} + \sigma^{dist} \text{Box-Muller}(0, 1)$

- **Voies:** La voie des sous-holons trafic $L_{\alpha, \alpha=1, \dots, n}$ est la même voie que celle de leur super-holon trafic présenté par (12).

$$L_{\alpha, \alpha=1, \dots, n} = L \quad (12)$$

- **Longueur, poids:** d'un sous-holon trafic demeure le même qu'avant la requête de commutation vers les niveaux supérieurs.

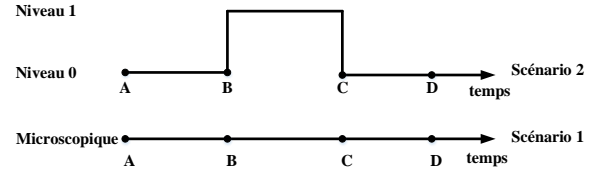


FIGURE 8 – Deux scénarios d'exécution

4.7 Résultats expérimentaux et discussion

Pour évaluer notre modèle multiniveau dynamique basé sur la densité, deux scénarios sont définis comme indiqué par la figure 8. Dans le scénario 1, la simulation est effectuée uniquement au niveau 0 du point A au point D. Dans le scénario 2, de A à B et de C à D, la simulation est effectuée au niveau 0 et de B à C, la simulation est au niveau 1. La figure 9 présente la durée d'exécution du modèle

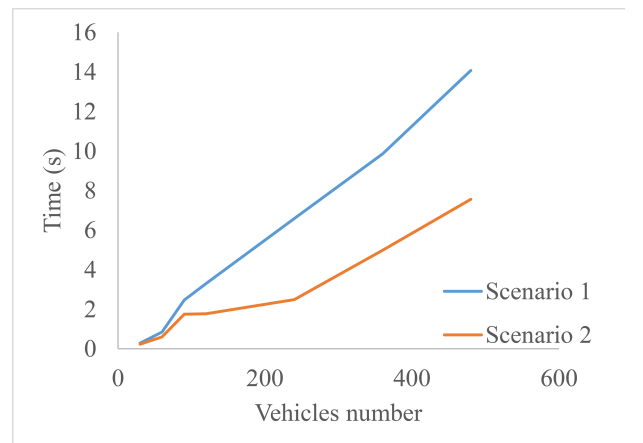


FIGURE 9 – Performance du modèle

multiniveau proposé (scénario 2) et du modèle entièrement microscopique (scénario 1) pour plusieurs véhicules avec une perte de précision maximale de précision toujours inférieure à 10 %. Le gain computationnel est compris entre 25% et 42%. Le gain computationnel étant supérieur à la perte de la précision rend notre approche multiniveau basée sur la densité très intéressante pour gérer la modélisation et la simulation du trafic routier à grande échelle.

Dans le trafic réel, notre modèle multiniveau peut être appliqué avec succès comme suit : la représentation grossière dans les sections de la route où le trafic est stationnaire et la représentation fine dans les sections où le trafic n'est pas stationnaire. Le trafic est stationnaire lorsque le trafic évolue en conservant la même configuration (toutes les trajectoires sont parallèles et équidistantes). Autrement dit, le trafic est stationnaire lorsque la différence de vitesse entre les véhicules est sensiblement nulle. Le principal avantage de la décomposition stationnaire / non stationnaire est qu'elle n'est pas statique à priori et dépend du flux. Plusieurs situations conduisent à un état de trafic stationnaire, tel que congestion, convoi, peloton, etc. En effet, la congestion, par exemple, est un phénomène récurrent. TomTom³, dans son rapport de 2013, indique que, dans des villes comme Moscou, Rio de Janeiro, Mexico, Istanbul et Beijing, les gens dépensent en moyenne plus de 75% de temps supplémentaire en raison des bouchons. En outre, dans son rapport de 2009, le Texas Transportation Institute, qui mène une enquête sur la congestion du trafic aux États Unis, a déclaré qu'en 2007, la congestion avait occasionné un retard de déplacement estimé à 4,2 milliards d'heures. Les embouteillages mettent en évidence les groupes de véhicules, en particulier aux heures de pointe, ce qui rend le trafic stationnaire. Cependant, dans la vie réelle, le trafic est stationnaire pendant une période spécifique et devient ensuite stationnaire. Il est donc nécessaire de prendre en compte le temps maximum lorsque le trafic est stationnaire lors de l'exécution des niveaux supérieurs de notre modèle. En d'autres termes, nous devons évaluer le temps d'exécution maximal du niveau supérieur, ce qui permet de conserver un faible taux de perte de précision. Cela se fera dans le futur.

5 Conclusion

Le paradigme SMAH est un outil efficace pour modéliser des systèmes complexes multiniveaux à grande échelle. Cet article propose un modèle multiniveau dynamique du trafic à grande échelle basé sur la densité. Le modèle se focalise sur H-DBSCAN en tant qu'extension de l'algorithme de clustering bien connu DBSCAN pour créer la hiérarchie à plusieurs niveaux de détail. Une méthode pour basculer dynamiquement entre les niveaux supérieurs et inférieurs est présentée. L'évaluation du modèle présente des

bons résultats pour faire face au compromis entre la précision de la simulation et la disponibilité des ressources de calcul. Les travaux futurs incluent la limitation de l'intervalle d'exécution des niveaux supérieurs pour conserver de bons résultats.

Remerciements

Ce travail est partiellement supporté par le Conseil Régional de Bourgogne France-Comté dans le cadre du projet UrbanFly 20174-06234/06242. Ce travail est également partiellement supporté par le programme Wallenberg AI, Autonomous Systems and Software Program (WASP) financé par la fondation Knut et Alice Wallenberg.

Références

- [1] N Bouha, G Morvan, A Hassane, and Y Kuber. 2015. A first step towards dynamic hybrid traffic modelling. In *Proc. of 29th European Conf. on modelling and simulation (ECMS)*. 64–70.
- [2] E Bourrel and J Lesort. 2003. Mixing micro and macro representations of traffic flow : a hybrid model based on the LWR theory. In *82th Annual Meeting of the Transportation Research Board*.
- [3] G.E.P. Box and M.E. Muller. 1958. A Note on the Generation of Random Normal Deviates. *Ann. Math. Statist.* (1958). <https://doi.org/10.1214/aoms/1177706645>
- [4] F Cao, M Ester, W Qian, and Zhou A. 2006. Density-Based Clustering over an Evolving Data Stream with Noise. In *SDM*.
- [5] L Eckhard and Werner S.A. 2011. Problems with Using the Normal Distribution and Ways to Improve Quality and Efficiency of Data Analysis. *PLOS ONE* (2011). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0021403>
- [6] M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, and X. Xu. 1996. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In *2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data mining*. 226–231.
- [7] Jacques Ferber. 1999. *Multi-Agent Systems. An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Addison Wesley.
- [8] S Galland, F Balbo, N Gaud, S Rodriguez, G Picard, and O Boissier. 2015. A multidimensional environment implementation for enhancing agent interaction. In *14th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS15)*.

3. TomTom est une entreprise leader dans la fabrication de produits de navigation pour le trafic.

- [9] S Galland and N Gaud. 2014. Holonic model of a virtual 3D indoor environment for crowd simulation. In *Proceedings of the International Workshop on Environments for Multiagent Systems (E4MAS14)*. Springer.
- [10] N. Gaud, S. Galland, F. Gechter, V. Hilaire, and A. Koukam. 2008. Holonic multilevel simulation of complex systems : Application to real-time pedestrians simulation in virtual urban environment. *Simulation Modelling Practice and Theory, Elsevier* (2008).
- [11] C. Gerber, J. Siekmann, and G. Vierke. 1999. Holonic Multi-Agent Systems. *Research Center for Artificial Intelligence (DFKI) Tech. Rep. 681, German* (1999).
- [12] A Hassane, Y Kubera, and G Morvan. 2014. Dynamic Hybrid Traffic Flow Modeling. (2014). <https://doi.org/arXiv:1401.6773v1>
- [13] MS EL Hmam, A Hassane, D JOLLY, and A Benasser. 2006. Macro-Micro Simulation of Traffic Flow. *IFAC Proceedings Volumes* (2006). <https://doi.org/10.3182/20060517-3-FR-2903.00189>
- [14] Barceló Jaume. 2010. *Fundamentals of Traffic Simulation*. Springer.
- [15] N.R. Jennings. 2001. An agent-based approach for building complex software systems. *Commun. ACM* 44, 4 (April 2001), 35–41.
- [16] N. R. Jennings and M. J. Wooldridge. 1998. Applications of intelligent agents. *Agent Technology : Foundations, Applications and Markets* (1998).
- [17] A Kesting, M Treiber, and D Helbing. 2008. *Agents for Traffic Simulation*. Technical Report arXiv :0805.0300. <https://arxiv.org/pdf/0805.0300.pdf>
- [18] Arthur Koestler. 1967. *The Ghost in The Machine*. Hutchinson.
- [19] M. J. Lighthill, F. R. S., and G. B. Whitham. 1955. On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* (1955). <https://doi.org/10.1098/rspa.1955.0089>
- [20] L. Liu, H. Huang, Y. Guo, and F. Chen. 2009. rDenStream, A Clustering Algorithm over an Evolving Data Stream. In *2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science*.
- [21] S Mammar, S Mammar, and J Lebacque. 2006. Highway Traffic Hybrid Macro-micro Simulation Model. In *11th IFAC Symposium on Control in Transportation System*.
- [22] Y Mualla, W Bai, S Galland, and C Nicolle. 2018. Comparison of agent-based simulation frameworks for unmanned aerial transportation applications. *Procedia Comput. Sci* 130 (2018), 791–796.
- [23] Laurent Navarro, Vincent Corruble, Fabien Flacher, and Jean-Daniel Zucker. 2013. A flexible approach to multi-level agent-based simulation with the mesoscopic representation. In *Proceedings of the 2013 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems*. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 159–166.
- [24] G.F. Newell. 1989. Comments on traffic dynamics. *Transportation Research Part B : Methodological* (1989). [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(89\)90015-5](https://doi.org/10.1016/0191-2615(89)90015-5)
- [25] D. E. O’Leary. 1998. Developing multiple-agent systems is more than top-down vs. bottom-up. *IEEE Intelligent Systems and their Applications* (1998). <https://doi.org/10.1109/5254.671082>
- [26] S. Rodriguez, V. Hilaire, and A. Koukam. 2007. Towards a holonic multiple aspect analysis and modeling approach for complex systems : Application to the simulation of industrial plants. *Simulation Modelling Practice and Theory, Elsevier* (2007).
- [27] J Sewall, D Wilkie, and M.C. Lin. 2011. Interactive Hybrid Simulation of Large-scale Traffic. *ACM Trans. Graph.* 30, 6, Article 135 (Dec. 2011), 12 pages. <https://doi.org/10.1145/2070781.2024169>
- [28] M Stratos, E Ntoutsis, N Pelekis, and T Yannis. [n. d.]. An evaluation of data stream clustering algorithms. *Statistical Analysis and Data Mining : The ASA Data Science Journal* ([n. d.]). <https://doi.org/10.1002/sam.11380>
- [29] IH Tchappi, S Galland, VC Kamla, and JC Kamgang. 2018. A Brief Review of Holonic Multi-Agent Models for Traffic and Transportation Systems. *Procedia Computer Science* (2018).
- [30] IH. Tchappi, VC Kamla, S. Galland, and JC Kamgang. 2017. Towards an Multilevel Agent-based Model for Traffic Simulation. *Procedia Computer Science*, 887–892.
- [31] IH. Tchappi, VC Kamla, S. Galland, JC Kamgang, CMS. Nono, and H. Zhao. 2018. Holonification Model for a Multilevel Agent-Based System. Application to Road Traffic. *Personal and Ubiquitous Computing* (2018).
- [32] M. Treiber, A. Hennecke, and D. Helbing. 2000. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E* 62 (2000).