

**Thèse de doctorat**

**Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de  
VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS**

Discipline, spécialité selon la liste des spécialités pour lesquelles l'Ecole Doctorale est accréditée :

**INFORMATIQUE**

**Présentée et soutenue par Feirouz, KSONTINI.**

**Le 13/11/2013, à Valenciennes**

**Ecole doctorale :**

Sciences Pour l'Ingénieur (SPI)

**Equipe de recherche, Laboratoire :**

Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH)

**Modèle d'agent fondé sur les affordances : application à la simulation de trafic routier**

**JURY**

**Président du jury**

– Koukam, Abderrafiaa. Professeur. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

**Rapporteurs**

– Gleizes, Marie-Pierre. Professeur. Université de Toulouse.  
– Simonin, Olivier. Professeur. INSA Lyon.

**Examineurs**

– Gattuso, Domenico. Professeur. Mediterranea University of Reggio Calabria.  
– Lourdeaux, Domitile. Maître de Conférence HdR. Université de Technologie de Compiègne.

**Directeur de thèse**

– Mandiau, René. Professeur. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.

**Co-directeurs de thèse**

– Espié, Stéphane. Directeur de Recherche, Hdr. IFSTTAR, Marne la Vallée.  
– Guessoum, Zahia. Maître de Conférence Hdr. Université de Pierre et Marie Curie.



## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier l'IFSTTAR (ex INRETS) qui m'a accueilli dans ses locaux et qui m'a donné les moyens techniques et financiers de réaliser mon projet de thèse dans de bonnes conditions.

Je tiens ensuite à remercier Marie-Pierre Gleizes et Olivier Simonin pour avoir accepté de rapporter ce travail et pour le temps qu'ils ont consacré à lire ce manuscrit. Je les remercie pour leurs nombreuses remarques sur les travaux réalisés, mais aussi pour les discussions et les commentaires qui ont été pour moi très instructifs. Je remercie également Abderrafiaa Koukam pour avoir accepté de présider ma soutenance et pour l'intérêt qu'il a apporté à ma thèse. Enfin je tiens à remercier Domitile Lourdeaux et Domenico Gattuso de leur participation au jury et pour leurs questions et remarques constructives.

Je tiens à remercier vivement mes encadrants, Zahia Guessoum, Stéphane Espié et René Mandiau. Je les remercie pour leur disponibilité, leur réactivité à la lecture et à la correction de mes documents et leur soutien. Je remercie Zahia pour sa grande disponibilité, ses conseils et son optimisme qui m'ont beaucoup aidé à avancer dans les grands moments de doute. Je remercie également Stéphane de m'avoir accueilli dans son équipe, de m'avoir initié à la simulation et de m'avoir aiguillé quand il le fallait. Je remercie René d'avoir accepté de diriger la thèse, pour sa disponibilité, ses précieux conseils et pour toutes les discussions qui ont contribué à améliorer mon travail.

Je tiens à remercier également, les membres du laboratoire LEPSIS pour les quatre années passées au sein de ce laboratoire. Je remercie le directeur de l'équipe Didier Aubert de m'avoir accueilli pendant toutes ces années ainsi que tous ceux qui ont partagé des moments scientifiques ou amicaux. Mes remerciements s'adressent également aux membres du laboratoire LAMIH de l'Université de Valenciennes de m'avoir accueilli dans leur équipe et plus particulièrement Christophe Kolski et Emmanuel Adam pour leurs conseils lors de la préparation de la soutenance de thèse. Je tiens également à remercier, Abderrahmane, Abdourahmane, Jyida, Elise, Enoch, Julien, Utku, Lancelot, Ferhat, Omar, Selem, Amir, Ahlem, Clémentine, Souhir,... (la liste est certainement encore longue) pour leurs amitiés et les discussions diverses et variées aussi bien sur des aspects liés à mon sujet de thèse que d'autres plus éloignés.

Un grand merci à tous mes amis qui m'ont encouragé de près ou de loin pendant ma thèse, je pense particulièrement à tous les membres de ma famille et plus spécialement mes parents qui n'ont cessé de croire en moi. Je remercie également, mes soeurs et leurs maris pour leur soutien et leurs encouragements.

Je termine cette page en remerciant du fond du coeur, mon mari Zied, pour son soutien continu, de m'avoir supporté surtout vers la fin de la thèse et pour tous ces week-end passés à relire avec moi articles, rapports, chapitre de thèse,... Ses encouragements et son soutien y sont pour beaucoup dans l'aboutissement de ce travail.



*À Zied*



# Table des matières

<b>Table des figures</b>	<b>ix</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
1 Contexte . . . . .	1
2 Motivations . . . . .	2
3 Contributions . . . . .	4
4 Organisation de la thèse . . . . .	5
<b>1 Les approches de modélisation et simulation de trafic</b>	<b>7</b>
1.1 Simulation de trafic routier . . . . .	8
1.1.1 Définition du trafic routier . . . . .	8
1.1.2 Simulation du trafic routier : critères de classification . . . . .	9
1.1.3 Les modèles de trafic . . . . .	11
1.1.4 Modélisation de la tâche de conduite . . . . .	14
1.2 Approche multi-agent . . . . .	15
1.2.1 Les systèmes multi-agents . . . . .	16
1.2.2 Agent . . . . .	17
1.2.3 Environnement . . . . .	19
1.2.4 Interaction . . . . .	22
1.2.5 Organisation . . . . .	22
1.3 Approche multi-agent et simulation . . . . .	23

1.3.1	Principes . . . . .	23
1.3.2	Applications multi-agents . . . . .	24
1.3.3	Simulation multi-agent de trafic . . . . .	25
<b>2</b>	<b>Simulation de trafic : occupation de l'espace et représentation de l'environnement</b>	<b>31</b>
2.1	Occupation de l'espace et simulation de trafic routier . . . . .	32
2.1.1	Pratiques réelles des conducteurs . . . . .	32
2.1.2	Approches existantes pour étudier l'occupation de l'espace . . . . .	36
2.1.3	Synthèse . . . . .	42
2.2	Représentation de l'environnement par l'agent conducteur . . . . .	42
2.2.1	Perception en psychologie cognitive . . . . .	43
2.2.2	Perception en SMA . . . . .	44
2.2.3	Représentation mentale de l'environnement . . . . .	46
2.3	Analyse et positionnement par rapport aux travaux précédents . . . . .	52
2.3.1	Hétérogénéité des comportements . . . . .	52
2.3.2	Nombre de véhicules . . . . .	53
2.3.3	Représentation de l'environnement . . . . .	54
2.3.4	Évaluation et choix de la voie . . . . .	55
<b>3</b>	<b>Représentation ego-centrée de l'agent fondée sur les affordances</b>	<b>59</b>
3.1	Les affordances . . . . .	60
3.1.1	La théorie des affordances . . . . .	61
3.1.2	Modélisation à base d'affordances . . . . .	62
3.1.3	Discussion . . . . .	69
3.2	Modèle d'interaction avec l'environnement . . . . .	72
3.2.1	Représentation ego-centrée et raisonnement spatial qualitatif . . . . .	72
3.2.2	Les voies virtuelles . . . . .	73
3.2.3	Affordances et voies virtuelles . . . . .	78
3.3	Un modèle d'agent fondé sur les affordances . . . . .	80

3.3.1	Architecture de l'agent . . . . .	81
3.3.2	La perception . . . . .	82
3.3.3	Décision et Action . . . . .	90
3.3.4	Algorithmes de construction de la <i>REE</i> . . . . .	91
3.4	Instanciation du modèle et exemples illustratifs . . . . .	95
3.4.1	Exemple 1 : cas d'un deux-roues motorisé dans une situation de faufilement . . . . .	95
3.4.2	Exemple 2 : cas d'une voiture dans une réduction de voies . . . . .	98
<b>4</b>	<b>Évaluation et validation du modèle</b>	<b>103</b>
4.1	Le modèle de simulation comportementale ArchiSim . . . . .	104
4.1.1	Démarche . . . . .	104
4.1.2	Architecture . . . . .	105
4.1.3	Production de trafic sous ArchiSim . . . . .	109
4.2	Évaluation de notre approche . . . . .	111
4.2.1	Expérimentation sur la base de scénarii . . . . .	112
4.2.2	Simulation d'un circuit réel et validation . . . . .	115
4.3	Conclusion . . . . .	124
	<b>Conclusion générale</b>	<b>125</b>
1	Introduction . . . . .	125
2	Contributions . . . . .	126
2.1	Un modèle d'interaction avec l'environnement fondé sur les affordances . . . . .	126
2.2	Une représentation ego-centrée de l'environnement . . . . .	127
2.3	Validation du modèle dans le cadre de la simulation du trafic routier . . . . .	127
3	Perspectives . . . . .	128
3.1	Validation . . . . .	128
3.2	Amélioration du modèle d'affordance . . . . .	129
3.3	Perspectives applicatives . . . . .	130

**Publications**

**133**

**Bibliographie**

**135**

# Table des figures

1.1	Axe pratique d'évaluation de la capacité d'un agent à accomplir individuellement des tâches complexes et à planifier ses actions (d'après [Ferber, 1995]). . . . .	19
1.2	Principes de la simulation multi-agent (d'après [Drogoul, 1993]) . . . . .	24
2.1	Positionnement des véhicules sur la chaussée : cas d'un véhicule mal garé sur la chaussée	33
2.2	Cas d'un véhicule d'urgence . . . . .	34
2.3	Positionnement des véhicules sur la chaussée : cas d'un carrefour . . . . .	34
2.4	Positionnement des motos sur la chaussée . . . . .	35
2.5	Modèle de perception active [Weyns <i>et al.</i> , 2004] . . . . .	45
2.6	Relations spatiales allo-centrées vs. ego-centrées [Wagner et Hübner, 2005] . . . . .	47
2.7	Zones de contrôle d'un conducteur simulé (d'après [El Hadouaj, 2004]) . . . . .	48
2.8	Possibilités de structuration de la route illustrée en (a) : (b) Route découpée en sous-voies pour les deux-roues : une voie de circulation correspond à trois voies pour les deux-roues. (c) Route structurée d'une manière centrée autour du deux-roues en voies de la largeur du deux-roues. . . . .	49
2.9	Exemple de voies virtuelles calculées à partir des autres usagers [Bonte <i>et al.</i> , 2006] .	51
2.10	Déplacement des deux-roues : (a) Selon le modèle de [Bonte <i>et al.</i> , 2006], (b) Selon les observations de la réalité . . . . .	54
2.11	Situation de blocage suite à un accident . . . . .	55
3.1	Un exemple d'un graphe représentant les relations d'affordances pour un SMA selon l'approche de [Papasimeon, 2009]. Certaines entités sont des agents et sont représentées par un double cercle. Dans ce système, les agents sont $\alpha$ , $\beta$ et $\gamma$ . Les affordances sont représentées par des arcs. Chaque affordance $k^{th}$ entre un agent $i$ et une entité $j$ est notée par $\phi_{ij}^k$ . . . . .	66

3.2	(a) Route congestionnée où un conducteur doit se représenter la situation. (b) Point de vue d'un automobiliste sur la route congestionnée. (c) Point de vue d'un conducteur deux-roues sur la route congestionnée [Bonte <i>et al.</i> , 2006]	75
3.3	Illustration des propriétés d'une voie	76
3.4	Illustration des propriétés d'une voie	77
3.5	Effet paroi lié à la voie adjacente	78
3.6	Modèle d'interaction avec l'environnement	79
3.7	Architecture de l'agent	81
3.8	Caractérisation des intervalles	86
3.9	Les intervalles virtuels	87
3.10	Exemple d'une situation routière à 2 voies physiques	95
3.11	Identifications des intervalles bruts	96
3.12	Construction des intervalles virtuels	97
3.13	Identification des affordances	98
3.14	Choix de l'agent $a_1$	98
3.15	Exemple d'une situation routière à 3 voies physiques	99
3.16	Identification des intervalles bruts	99
3.17	Construction des intervalles virtuels	100
3.18	Identification des affordances	100
4.1	Architecture globale d'ArchiSim	106
4.2	L'outil de génération du trafic Distrib	110
4.3	Outils de simulation développés pour ArchiSim	111
4.4	Comparaison du comportement des deux-roues avec le modèle de référence (sans voies virtuelles) et avec notre modèle (ajout des voies virtuelles)	113
4.5	Courbe de vitesse des deux-roues motorisés	114
4.6	Simulation sans les voies virtuelles au niveau d'un carrefour	115
4.7	Simulation avec le modèle à base d'affordances au niveau d'un carrefour	116
4.8	Comparaison entre les temps de parcours réels et les temps de parcours simulés	120
4.9	Écartement des autres véhicules en présence d'un véhicule d'urgence	122

4.10 Résultats de simulation dans le cas où le véhicule d'urgence s'arrête aux feux . . . .	123
4.11 Résultats de simulation dans le cas où le véhicule d'urgence ne s'arrête pas aux feux	123



# Introduction générale

## 1 Contexte

Les problèmes liés à la sécurité routière d'un côté et la volonté de vouloir toujours améliorer la circulation du trafic de l'autre poussent les autorités publiques à mener continuellement des études et des investigations afin de trouver des solutions pour améliorer le trafic routier et ses conditions de circulation. Les enjeux actuels en termes de sécurité concernent certains usagers de la route qui peuvent être considérés plus vulnérables que d'autres. Il s'agit particulièrement des conducteurs des deux-roues motorisés (2RM). La mortalité liée aux accidents qui impliquent les 2RM ne diminue pas dans un contexte de réduction générale, ceci en partie du fait d'une augmentation du nombre de deux-roues motorisés. L'hétérogénéité des usagers, et par conséquent, de leurs comportements augmente les risques liés à la sécurité routière et pose un certain nombre de problèmes concernant l'état de circulation du trafic. Les usagers des 2RM ont des comportements de déplacement qui sont différents des autres conducteurs. Vu leur taille, ils ont tendance à se faufiler entre les files de véhicules afin de diminuer leur temps de trajet [Aupetit et Espié, 2012]. La problématique consiste à comprendre et analyser ces pratiques et trouver des solutions durables permettant d'améliorer les conditions de circulation aussi bien en termes de réglementation qu'en termes d'infrastructure.

La simulation du trafic routier contribue à apporter des réponses aux problèmes pré-cités. Elle est utilisée dans le but de représenter le trafic, de comprendre les phénomènes qui peuvent émerger et de permettre d'effectuer des choix en termes de politiques de transport. La simulation du trafic routier a vu apparaître, depuis une vingtaine d'années, une nouvelle approche de modélisation, dite approche comportementale. Cette approche privilégie l'étude des interactions des entités composant le trafic plutôt que l'étude mathématique du trafic proprement dite ; on parle aussi d'approche « individuelle ». Ainsi, dans un modèle de simulation comportementale, une entité simulée prend en compte son environnement et s'adapte en permanence à son contexte routier. Les phénomènes de trafic, tels que la congestion ou l'occupation des voies de circulation, émergent car ils sont le résultat des pratiques individuelles, de la variété des comportements et des interactions entre les différentes entités.

Nous abordons, dans cette thèse, la simulation de trafic en considérant une approche comportementale fondée sur les systèmes multi-agents. Cette approche est développée depuis une vingtaine

d'années à l'IFSTTAR (ex INRETS) dans le projet de la simulation de trafic ArchiSim [Espié, 1995] dont l'objectif est de proposer une architecture de simulation aussi complète et aussi générique que possible. L'idée consiste à développer des simulateurs de conduite dédiés à l'étude des comportements du conducteur et du trafic. L'une des problématiques étudiées consiste à concevoir des simulateurs de conduite capables d'immerger un conducteur réel dans un trafic routier simulé, interactif et réaliste. L'approche développée au sein de l'IFSTTAR (ex INRETS) combine un modèle comportemental de trafic (ArchiSim) et une architecture distribuée de simulation de conduite (Sim<sup>2</sup>). La première originalité de ces travaux, est de considérer pleinement le rôle du conducteur dans la génération des situations de trafic et, conséquemment, de construire un modèle de trafic fondé sur un sous-modèle de comportement établi à partir d'études menées en psychologie de la conduite. La deuxième originalité de ces travaux est de voir dans les principes des systèmes multi-agents un support théorique en totale adéquation avec l'approche comportementale, et d'essayer de tirer profit de ces principes et des travaux associés pour apporter de nouvelles solutions à la problématique de la simulation de trafic routier.

Le travail présenté dans cette thèse s'intègre dans le cadre du modèle de trafic ArchiSim.

## 2 Motivations

En matière de gestion de trafic routier, l'occupation de l'espace au sol est un problème de recherche bien connu. Dans les zones urbaines et dans un contexte de trafic dense, une mauvaise gestion de l'occupation de l'espace routier peut favoriser divers effets négatifs comme par exemple la congestion du trafic. La chaussée est souvent décomposée en voies de circulation et cette décomposition de l'espace routier est généralement respectée par les conducteurs. Cependant, la réalité montre que les pratiques des conducteurs humains ne sont pas toujours contraintes par cette gestion physique de l'espace routier. On peut aussi noter que de nombreux gouvernements européens étudient l'adaptation dynamique de l'espace routier et son influence sur le trafic.

Nous nous intéressons, dans cette thèse, à la reproduction de pratiques observées. Il s'agit de pouvoir simuler des comportements liés à des phénomènes d'occupation de l'espace au sol, en particulier pour des contextes de trafic très dense en milieu urbain. Nous pouvons citer des exemples de situations auxquelles nous nous intéressons : les phénomènes de faufilement (2 roues, véhicules d'urgence, etc.), les phénomènes de réappropriation de l'espace en approche et dans les carrefours, les phénomènes liés à des événements spécifiques (véhicule mal garé, véhicule en situation d'urgence, etc.). Dans ces situations, la présence de marquages au sol n'empêche pas les conducteurs de s'approprier l'espace roulant en fonction de leurs buts et du contexte. On peut considérer que chaque conducteur surcharge, dans ces situations, la structure de la route proposée par le marquage au sol en se construisant une représentation ego-centrée qui lui est propre et qui répond à ses buts.

Les systèmes multi-agents (SMA) fournissent une solution aux problèmes posés par la simulation du trafic routier [Bazzan *et al.*, 1999, Doniec *et al.*, 2008], la gestion du trafic [Vasirani *et al.*, 2012],

le contrôle des feux de circulation [Bazzan, 2005], etc. Cependant, pour la problématique de l'occupation de l'espace, les modèles existants considèrent souvent que le comportement du conducteur est normatif en termes d'occupation de l'espace. Ces modèles ne prennent pas en compte les phénomènes observés dans la réalité tels que les manoeuvres de faufilement entre les véhicules ou l'allocation dynamique des voies [Hidas, 2002, El Hadouaj *et al.*, 2004, Kesting *et al.*, 2009, Dai et Li, 2010]

Néanmoins, il y a eu très peu de travaux qui se sont intéressés à la problématique de l'occupation de l'espace telle que nous pouvons l'observer dans certaines situations ou pour un certain type d'usager. [Bonte *et al.*, 2006, Lee *et al.*, 2009] ont proposé des modélisations pour le cas particulier des deux-roues motorisés et ont essayé d'intégrer les spécificités de ces derniers en termes de déplacement et de positionnement sur la chaussée. [Lee *et al.*, 2009] s'appuient sur une modélisation mathématique des règles d'interaction. Ils ont utilisé le modèle de poursuite de [Gipps, 1981] pour décrire aussi bien le déplacement des voitures que celui des deux-roues motorisés (2RM) avec quelques ajustements pour prendre en compte les paramètres cinématiques des 2RM et permettre un positionnement latéral plus adéquat. La modélisation proposée par [Lee *et al.*, 2009] reste tout de même une solution non générique développée uniquement pour un type particulier d'usager et par conséquent ne peut pas s'appliquer dans d'autres situations notamment des situations de blocage liées à un évènement particulier, pour les gares de péages, etc. Les travaux de [Bonte *et al.*, 2006] ont été développés dans le cadre de la simulation de trafic ArchiSim. Les auteurs ont proposé une modélisation pour le cas particulier des deux-roues motorisés afin de reproduire leurs comportements spécifiques tels que les faufilements entre les véhicules ou les remontées de files. Pour représenter les espaces libres sur la chaussée, les auteurs utilisent le concept des voies virtuelles. Elles sont désignées par le mot « virtuelles » car elles n'existent pas physiquement sur la route, elles sont propres à un individu dans une situation et elles émergent selon le contexte. Au niveau de la représentation que se construit l'agent de son environnement, les auteurs font une décomposition systématique et géométrique en voies libres et occupées de tout l'espace routier en fonction de la taille des véhicules et de leur position sur la chaussée. Cette décomposition amène à un nombre variable et parfois très élevé de voies virtuelles, plus particulièrement dans le cas de routes à plusieurs voies.

Plus généralement, une grande partie des outils de simulation existants supposent que le positionnement des véhicules sur la chaussée est régi par les voies physiques. Cette modélisation ne permet pas de simuler les phénomènes observés en termes d'occupation de l'espace roulant. Très peu de travaux en simulation multi-agent de trafic se sont intéressés à ces pratiques. Ils ont essentiellement modélisé le comportement des deux-roues motorisés pour qui ces pratiques sont fréquentes [Bonte *et al.*, 2006, Lee *et al.*, 2009]. Les deux solutions proposées ont été développées pour le cas particulier des deux-roues motorisés et ne peuvent pas s'appliquer à d'autres types de véhicules. Pour remédier à ces limites, nous nous sommes intéressés à la manière avec laquelle un conducteur se représente l'environnement autour de lui.

### 3 Contributions

Afin de proposer une solution générique qui prenne en compte les pratiques des conducteurs en termes d'occupation de l'espace, nous nous sommes intéressés à la manière avec laquelle un conducteur se représente l'environnement autour de lui avant de prendre sa décision. En termes de représentation de l'environnement, les travaux existants sont fondés sur deux théories : les représentations allo-centrées et ego-centrées.

Dans la réalité, le conducteur « découvre » les situations au fur et à mesure qu'il se déplace. Il a donc besoin de percevoir son environnement pour prendre une décision. Il a ainsi tendance à se représenter les autres conducteurs par rapport à sa position (devant-moi, à ma gauche, à ma droite, la distance qui me sépare de celui qui est juste devant, etc.). De ce point de vue, une représentation ego-centrée est plus intuitive dans le contexte de la simulation de trafic, pour laquelle chaque conducteur a besoin d'avoir une représentation contextuelle et dynamique de son propre environnement. La représentation ego-centrée est bien adaptée aux contextes dynamiques car le nombre de relations à mettre à jour est moins élevé que dans le cas de la représentation allo-centrée.

Nous proposons de doter les agents d'une représentation ego-centrée de l'environnement leur permettant de prendre des décisions en termes d'occupation de l'espace. Afin de construire sa représentation ego-centrée de l'environnement, l'agent identifie les actions possibles offertes par ce dernier en termes d'occupation de l'espace. Nous proposons d'utiliser le concept d'affordance [Gibson, 1979] pour déterminer ces possibilités. Ce concept s'adapte bien à la problématique de l'occupation de l'espace et nous proposons de l'adapter à la simulation de trafic routier. Dans le cadre de notre application, les agents suivent des voies pour se déplacer. Nous avons conservé cette notion de voie de déplacement dans notre modélisation de l'environnement et nous considérons que les affordances correspondent aux voies possibles qui émergent à partir des interactions entre les usagers et l'environnement. Les affordances identifiées permettent à l'agent de se construire une représentation ego-centrée de l'environnement orientée vers les actions possibles.

Notre contribution s'articule autour de deux aspects : nous présentons tout d'abord un modèle d'interaction avec l'environnement fondé sur le concept d'affordance. Ce modèle permet d'avoir une vision globale de notre approche. Nous utilisons une version étendue du concept d'affordance en introduisant l'aspect cognition dans le processus d'identification de ces dernières. Dans nos travaux, les affordances dépendent à la fois des propriétés des objets et/ou de l'environnement proposant les différentes possibilités d'action, mais aussi des caractéristiques individuelles des agents. Nous présentons ensuite notre modèle d'agent permettant à ce dernier de se construire une représentation ego-centrée de l'environnement fondée sur les affordances identifiées.

## 4 Organisation de la thèse

Ce document est organisé en 4 chapitres. Le premier chapitre présente une introduction à la problématique de la simulation du trafic routier. Il décrit le contexte général des travaux menés dans le cadre de cette thèse. La seconde partie du chapitre introduit les principaux concepts des systèmes multi-agents. La dernière partie du chapitre est dédiée à l'application des systèmes multi-agents à la simulation, et plus particulièrement, à leur application au trafic routier.

Le second chapitre approfondit l'état de l'art en se focalisant sur la problématique de l'occupation de l'espace au sol. Il vise à étudier les différents travaux existants et à introduire notre problématique. Nous présentons en premier lieu la problématique de simulation des pratiques des conducteurs en termes d'occupation de l'espace. La deuxième partie est consacrée à la représentation de l'environnement par l'agent conducteur. La dernière partie du chapitre résume et analyse les travaux exposés dans [Bonte *et al.*, 2006, Bonte *et al.*, 2008] visant à simuler les phénomènes de l'occupation de l'espace pour les deux-roues motorisés dans ArchiSim.

Le troisième chapitre vise à présenter notre contribution qui s'articule autour de deux apports. Une vue d'ensemble de notre modèle d'interaction avec l'environnement est d'abord proposée. Elle a pour but d'exposer l'idée générale de notre approche. Ensuite, nous proposons une formalisation de notre modèle d'agent ainsi que les différents algorithmes décrivant le comportement. La première section du chapitre présente le concept d'affordance et les différents travaux qui ont utilisé ce concept dans leurs modélisations. La seconde section présente un modèle d'interaction avec l'environnement fondé sur ce concept. Nous définissons le lien entre ce concept et la notion de voies virtuelles. La troisième partie vise à proposer une formalisation de notre modèle d'agent. Nous clôturons le chapitre par une instantiation de notre modèle dans le cas de deux situations routières.

Enfin, le quatrième chapitre s'intéresse à l'évaluation et la validation de notre modèle. L'outil de simulation ArchiSim est présenté dans la première partie du chapitre et l'évaluation de notre proposition fait l'objet de la deuxième partie du chapitre. Cette évaluation est menée à deux niveaux : à un niveau individuel en utilisant différents scénarii permettant d'évaluer les comportements individuels des agents et à un niveau collectif en simulant le trafic sur un réseau réel et en comparant les données de trafic réelles et celles obtenues par simulation.

Nous terminons notre manuscrit par une conclusion et la présentation de quelques perspectives à nos travaux de recherche.



# Chapitre 1

## Les approches de modélisation et simulation de trafic

### Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Simulation de trafic routier</b>	<b>8</b>
1.1.1	Définition du trafic routier	8
1.1.2	Simulation du trafic routier : critères de classification	9
1.1.3	Les modèles de trafic	11
1.1.4	Modélisation de la tâche de conduite	14
<b>1.2</b>	<b>Approche multi-agent</b>	<b>15</b>
1.2.1	Les systèmes multi-agents	16
1.2.2	Agent	17
1.2.3	Environnement	19
1.2.4	Interaction	22
1.2.5	Organisation	22
<b>1.3</b>	<b>Approche multi-agent et simulation</b>	<b>23</b>
1.3.1	Principes	23
1.3.2	Applications multi-agents	24
1.3.3	Simulation multi-agent de trafic	25

---

Ce premier chapitre présente le contexte général des travaux menés dans le cadre de notre thèse. Nous commençons par introduire le cadre de notre application, la simulation de trafic routier. Les modèles de simulation de trafic sont utilisés dans le but de représenter le trafic, de prévoir son évolution et de permettre de le contrôler ou d'effectuer des choix sur les politiques de transport. Le besoin de la simulation dans le domaine du trafic s'est fait sentir vu l'insuffisance des méthodes analytiques et le besoin de tester et d'évaluer des actions proposées avant leur application. En effet, de nouvelles possibilités de régulation de trafic sont souvent introduites afin de rendre la circulation automobile aussi

sûre et confortable que possible. L'expérimentation de ces nouvelles techniques en grandeur nature est coûteuse et difficile à réaliser. Les modèles de simulation sont devenus des outils incontournables pour répondre à ce type d'attentes.

Dans ce premier chapitre, nous commençons par définir le trafic routier et présentons les différentes approches utilisées en simulation de trafic. La deuxième partie présente l'approche multi-agent et ses concepts généraux. Enfin, la dernière partie du chapitre est dédiée à l'application des systèmes multi-agents à la simulation, et plus particulièrement, à leur application au trafic routier.

### 1.1 Simulation de trafic routier

Dans cette section, nous présentons le contexte général de la simulation de trafic routier. Nous commençons par décrire brièvement la notion de trafic routier, nous présentons ensuite les approches de simulation utilisées.

#### 1.1.1 Définition du trafic routier

Le réseau routier a été développé pour répondre aux demandes de déplacement des individus. Les routes ont été conçues pour répondre notamment à une demande commerciale mais aussi pour répondre aux déplacements domicile-travail, aux migrations de population notamment lors des congés de fin de semaines et les vacances, etc.

La montée des préoccupations environnementales et la volonté d'orienter les systèmes de transport vers une croissance plus durable (y compris du point de vue des coûts de financement et d'exploitation des infrastructures) limitent les constructions de nouvelles routes et les élargissements des routes existantes. De plus, les aspects de sécurité lors des déplacements sont jugés de plus en plus importants [Espié *et al.*, 2002]. Malgré leur relative diminution, les accidents corporels et les tués sur les routes françaises ont, outre leur aspect dramatique au niveau humain, un coût économique élevé. Avec de tels constats, une volonté de réduire les coûts humains, environnementaux, énergétiques et économiques induits par le trafic routier s'impose. Cela passe par l'optimisation de l'utilisation des infrastructures existantes, tant en termes de capacité qu'en termes de sécurité. Cette optimisation n'est possible que par une meilleure compréhension des mécanismes qui régissent les phénomènes de trafic.

Les études sur le trafic tentent d'identifier et de comprendre l'ensemble des situations impliquant le couple usager/infrastructure routière. Ces études ne se focalisent pas toutes sur les mêmes aspects. Nous pouvons citer, par exemple, l'ingénierie du trafic, la psychologie de la conduite, etc.

Depuis de nombreuses années, des études sont menées afin de permettre la prévision et le contrôle du système routier [Greenshields, 1935, Rothrock et Keefer, 1957]. Ces travaux s'appuient sur le recueil d'un certain nombre de données résultantes du déplacement du couple conducteur/véhicule dans la configuration routière à étudier. Les mesures sont réalisées par le biais d'équipements et de capteurs

placés sur l'infrastructure ou embarqués dans le véhicule. L'agrégation des données collectées permet d'obtenir des indicateurs sur le comportement du conducteur tant au niveau individuel que collectif.

Ces études se font le plus souvent en conditions réelles (sur circuits) et sont difficiles à mettre en place (installation d'équipements et aménagement de l'infrastructure, instrumentation de véhicules, etc.). Depuis quelques années, il est possible d'étudier le trafic routier avec d'autres méthodes moins contraignantes. Il s'agit de mener ces études en laboratoire sur un simulateur de conduite. Le couplage d'un simulateur de conduite et d'une simulation de trafic peut répondre à plusieurs types de besoins. La simulation peut être par exemple utilisée comme un outil d'aide à la décision pour évaluer de nouvelles solutions de régulation de trafic [Saunier, 2005] ou étudier l'impact de l'aménagement de nouvelles infrastructures routières [Espié *et al.*, 2002]. Elle peut être également utilisée pour développer et évaluer la mise au point de nouveaux équipements pour les véhicules et de systèmes d'aide à la conduite [Hegeman *et al.*, 2009, Tapani, 2011]. Enfin, elle est de plus en plus utilisée dans le domaine de la formation, où la simulation couplée à un simulateur offre un environnement virtuel de conduite permettant de s'entraîner à la conduite [Flipo, 2000].

Face à la multitude d'approches et d'outils de simulation existants, nous présentons quelques critères de classification facilitant la comparaison des différentes approches.

### 1.1.2 Simulation du trafic routier : critères de classification

Les modèles de simulation présentent certaines caractéristiques similaires quant aux données à fournir en entrée et celles fournies en sortie. Ils prennent en entrée un réseau routier et une demande de trafic et fournissent en sortie des résultats statistiques et éventuellement une visualisation graphique (2D et/ou 3D). Les résultats numériques décrivent de manière quantitative et qualitative les flots de véhicules durant la simulation. Malgré ces similarités, les modèles de simulation de trafic se présentent sous diverses formes qu'il est possible de classer suivant différents critères [Doniec, 2006]. Nous présentons quatre critères de classification : la granularité, le temps, la part de l'aléatoire dans le modèle et le type d'approche utilisée.

#### 1.1.2.1 Niveau de granularité

Il est courant de distinguer trois niveaux de granularité : microscopique, mésoscopique et macroscopique [Cohen, 1993]. Ces niveaux de granularité définissent le niveau de détail auquel est représenté le système à étudier. Une simulation microscopique, par exemple, offre un niveau de détail plus important qu'une simulation macroscopique.

Les modèles macroscopiques correspondent à une vision continue de l'écoulement. Ils sont fondés sur une analogie avec la mécanique des fluides : on représente l'écoulement des véhicules sous la forme d'un flux. L'objectif n'est pas de décrire le comportement individuel des vé-

hicules mais de donner une description du comportement global, à travers des variables agrégées [Cayford *et al.*, 1997, Haj-Salem *et al.*, 1998].

A l'inverse, les modèles de simulation microscopiques approchent le trafic de manière plus fine. On cherche à reproduire le comportement de chaque couple véhicule-conducteur. Ce type de modèle a pour ambition de s'approcher le plus possible du comportement réel des conducteurs (véhicule-conducteur). Pour ce faire, ces modèles tentent de reproduire la façon avec laquelle réagit un véhicule en fonction de son environnement, c'est-à-dire l'infrastructure sur laquelle il circule et les véhicules qui l'entourent. Ces modèles décrivent aussi bien le comportement de chaque entité du système (c'est-à-dire le couple véhicule/conducteur) que les interactions entre ces entités. Le flux de trafic qu'ils reproduisent résulte de l'interaction des comportements modélisés. Il existe de nombreux outils de simulation de trafic microscopique, tels que VISSIM [Fellendorf et Vortisch, 2001, PTV, 2008, Fellendorf et Vortisch, 2010], Paramics [Paramics, 2007, Sykes, 2010], NGSIM [Alexiadis *et al.*, 2004], AIMSUN [Barceló *et al.*, 2004, Casas *et al.*, 2010], ou encore MITSIMLab [Yang et Koutsopoulos, 1996, Ben-Akiva *et al.*, 2010]. Ces outils diffèrent par le modèle de simulation de trafic qu'ils utilisent : la modélisation peut être mathématique ou comportementale.

Les modèles mésoscopiques se situent entre le niveau macroscopique et microscopique. Les véhicules sont dans ce cas regroupés selon des caractéristiques de trafic proches et homogènes. Par exemple, les véhicules peuvent être regroupés par pelotons et seront considérés comme une seule entité.

### 1.1.2.2 Représentation du temps

La majorité des modèles de simulation de trafic décrivent des systèmes dynamiques, la gestion du temps constitue donc une composante importante du système de simulation et il s'agit aussi d'un critère de classification pour les outils de simulation de trafic. Il existe plusieurs types de simulation selon la représentation du temps de simulation et de l'état du modèle (discret/continu) [Guessoum, 2000, Zeigler *et al.*, 2000, Michel, 2004]. Dans les modèles continus, les éléments du système changent continuellement d'état au cours du temps en réponse à des stimuli discrets ou continus. Ce type de modélisation est difficilement envisageable sur ordinateur. Les modèles discrets considèrent que les états des systèmes ne changent qu'à certaines dates. Il existe deux types de modèles discrets :

- les simulations à événements discrets changent suite à l'occurrence d'un événement qui provoque un changement d'état du système (par exemple, le feu passe au vert) ;
- les simulations à temps discret segmentent le temps en une succession d'intervalles égaux, appelés « pas de temps » ou encore « pas de simulation ». A chaque pas de temps, le modèle recalcule les différents états et variables du système.

Les modèles à temps discret permettent une représentation fine de l'évolution du système mais cette dernière peut être coûteuse en temps de calcul notamment quand l'environnement évolue très lentement d'un pas de simulation à l'autre.

### 1.1.2.3 Simulation déterministe ou stochastique

Les modèles déterministes n'utilisent aucune variable aléatoire ni fonction probabiliste. Les interactions sont définies à travers des relations logiques ou mathématiques exactes. A l'inverse, les modèles stochastiques utilisent des fonctions de probabilité ou des variables pouvant être aléatoirement définies [Lieberman et Rathi, 1997], ce qui permet d'introduire une certaine dispersion autour des phénomènes simulés.

Le déterminisme présente l'avantage de la reproductibilité des situations à simuler. Il est dans ce cas plus facile de mener les expérimentations et d'attester de la validité des calculs effectués. Cependant, dans certains cas, il est préférable d'avoir un certain degré de stochasticité dans la simulation. Généralement, nous trouvons les deux composantes dans un modèle de simulation. Certaines parties du modèle requièrent l'utilisation de variables aléatoires comme par exemple la répartition de la population de conducteurs autour d'une valeur moyenne dans une distribution donnée. D'autres parties sont plus facilement modélisées à l'aide de modèles déterministes. Il est nécessaire de trouver un compromis entre le déterminisme requis facilitant l'expérimentation et le stochastique qui permet d'introduire plus de réalisme dans la simulation.

### 1.1.2.4 Approches mathématiques ou comportementales

Les outils de simulation de trafic couramment utilisés reposent sur des modèles mathématiques faisant intervenir différentes lois mathématiques. La simulation du trafic routier a vu apparaître depuis une vingtaine d'années, une nouvelle approche du trafic, dite approche comportementale. Cette approche privilégie l'étude des interactions des entités composant le trafic plutôt que l'étude mathématique du trafic proprement dite ; on parle aussi d'approche « centrée-individu ». L'approche comportementale n'est pas exclusive à la simulation de trafic. Elle a été adoptée dans plusieurs domaines de recherche comme l'écologie, la vie artificielle, la robotique, l'intelligence artificielle distribuée. Ces deux méthodes de conception des modèles de simulation sont détaillées dans la section suivante.

## 1.1.3 Les modèles de trafic

### 1.1.3.1 Modélisation mathématique

Il existe une littérature abondante concernant les modèles de simulation mathématiques. Les premières études du trafic routier sont fondées sur une analogie avec la mécanique des fluides : l'écoule-

## Chapitre 1. Les approches de modélisation et simulation de trafic

---

ment des véhicules était assimilable à celui d'un fluide et le réseau routier à un ensemble de canalisations [Lighthill et Whitham, 1955, Richards, 1956, Payne, 1971].

Les premières approches en simulation étaient donc fondées sur des modèles mathématiques. La démarche consiste à mesurer un certain nombre de variables (densité, débit, vitesse moyenne, etc.) à l'aide de capteurs (caméras, boucles magnétiques, etc.) décrivant la situation observée. Les données collectées permettent ensuite d'obtenir une description analytique de la situation par le biais d'équations mathématiques. Dans l'histoire des modèles d'écoulement, il est rapidement apparu deux grandes catégories de modèles, chaque catégorie étant fondée sur une vision différente du trafic. Il s'agit des modèles microscopiques et les macroscopiques. Pour les modèles macroscopiques, les équations mathématiques correspondent à des lois de circulation de flux tandis que, pour les modèles microscopiques, les équations utilisées sont des lois régissant le déplacement des véhicules telles que des lois de poursuite et des lois de changement de voie [Chandler et Montroll, 1958, Gazis *et al.*, 1961, Gipps, 1981, Lieberman et Rathi, 1997]. [Brackstone et McDonald, 1999] proposent une revue très complète de ces modèles.

Il faut garder à l'esprit que les véhicules sont conduits par des êtres humains, et que le comportement humain est impossible à modéliser de façon parfaite. Les modèles de poursuite sont fondés sur des hypothèses simplificatrices : les conducteurs sont supposés être homogènes, ne tenir compte que des véhicules qui les précèdent, optimiser en permanence leurs situations, percevoir les paramètres tels que la distance ou le différentiel de vitesse de façon parfaite et rester attentif en permanence à la tâche de contrôle de l'accélération. Ces hypothèses ont été critiquées dans la littérature car elles ignorent la nature flexible, adaptative et non-rationnelle de l'être humain. Par exemple, des études comportementales ont montré que le conducteur n'optimise pas en permanence sa situation (pour avoir la vitesse la plus élevée possible par exemple). Afin de diminuer l'attention qu'il doit porter à la tâche de conduite, il satisfait des conditions qu'il juge acceptables. Ainsi, face à une légère augmentation de la vitesse du véhicule le précédant, un conducteur ne va pas nécessairement modifier sa vitesse. [Hancock, 1999] souligne le fait que les équations ne sont sûrement pas suffisantes pour appréhender toute la complexité du trafic, et qu'il serait nécessaire d'introduire des éléments issus de la psychologie du conducteur afin d'améliorer ces modèles.

Les modèles microscopiques de trafic n'ont donc pas la même exactitude de description qu'en mécanique des fluides. Il ne s'agit pas de modèles « universels » mais de modèles empiriques fondés sur des considérations de bon sens. Une fois certaines hypothèses posées, ces modèles sont calibrés en utilisant des données expérimentales.

### 1.1.3.2 Modèles fondés sur les automates cellulaires

Il est apparu, dans les années 90, une nouvelle approche fondée sur les automates cellulaires [Nagel et Schreckenberg, 1992, Ruskin et Wang, 2002]. Cette approche peut être vue comme intermédiaire entre les approches microscopiques et macroscopiques. L'espace et le temps y sont discrét-

tisés, ainsi que la vitesse des véhicules. Ceux-ci sont décrits comme des entités bien séparées, mais leur dynamique est définie de façon à rester très simple, ne retenant que quelques traits essentiels en vue d'un bon comportement macroscopique. La simplicité des règles permet de traiter de grands systèmes et donc de faire le lien entre les échelles microscopiques et macroscopiques. Les automates cellulaires présentent un intérêt majeur en tant qu'outil de modélisation et de simulation, car ils sont extrêmement rapides et présentent un comportement dynamique et complexe suffisant pour reproduire des phénomènes comme les comportements oscillants ou chaotiques.

Dans le cadre de ces modèles, l'espace routier est discrétisé en un ensemble de sites ou de cellules ayant une taille identique. Chaque cellule est soit occupée par un véhicule, soit vide. L'application des automates cellulaires à la dynamique du trafic routier a provoqué, de part les promesses de simulations rapides et fiables qu'ils proposent, une intense activité de recherche. Cependant, la vérification de ces modèles, par rapport aux autoroutes et aux réseaux urbains, a montré des résultats peu réalistes au niveau macroscopique [Nagel *et al.*, 1999, Esser *et al.*, 1999].

### 1.1.3.3 Modélisation comportementale

#### 1.1.3.3.1 Concepts

Contrairement aux modèles mathématiques qui considèrent le trafic à modéliser comme étant un flux, les modèles fondés sur l'approche comportementale s'intéressent plutôt aux différents acteurs de la situation de trafic et à leurs interactions. Ces modèles simulent des entités individuelles du trafic et peuvent de ce fait être qualifiés de microscopiques. A l'inverse des modèles microscopiques mathématiques, dans le cadre de ces modèles, le trafic n'est pas reproduit : il se produit.

Ainsi, dans un modèle de simulation comportementale, une entité simulée prend en compte son environnement et s'adapte en permanence à son contexte routier. Les phénomènes de trafic (congestion, occupation des voies de circulation, etc.) émergent car ils sont le résultat, d'une part, des pratiques individuelles et des interactions et, d'autre part, de la variété (hétérogénéité) des comportements (véhicules hétérogènes et comportements de conducteurs hétérogènes). La complexité des situations observées n'est donc pas issue de la complexité de l'algorithme mis en oeuvre mais résulte des multiples interactions qui s'opèrent entre l'entité simulée et son environnement.

#### 1.1.3.3.2 Origine de l'approche comportementale

L'approche comportementale n'est pas exclusive à la simulation de trafic. En effet, elle a été adoptée dans plusieurs domaines de recherche comme l'écologie, la vie artificielle, la robotique, l'intelligence artificielle distribuée, etc.

A la fin des années quatre-vingt, l'un des travaux pionniers [Huston *et al.*, 1988] dans le domaine de l'écologie s'est intéressé à la modélisation de l'individu et à l'intérêt qu'apporte la variabilité

individuelle dans la modélisation. L'approche comportementale a permis dans ce cadre d'explorer certaines questions difficiles à prendre en compte avec les modèles à variables d'état. Peu de temps après les travaux de Huston, [Hogeweg et Hesper, 1990] établissent les bases de la vie artificielle avec une modélisation centrée sur les individus. Aujourd'hui la simulation multi-agent est largement utilisée dans ce domaine [Bousquet *et al.*, 1998, Ramat *et al.*, 1998].

La robotique, une thématique plus proche de notre problématique, s'intéresse entre autre à introduire des véhicules automatisés (i.e. sans conducteur) dans des conditions réelles. Ces entités automatisées ont pour vocation de se déplacer de manière autonome. Ces travaux ont recours à la simulation afin de mettre au point des algorithmes de déplacement et les valider avant de faire rouler un véhicule automatisé dans un environnement réel sur route. Dans ce cadre, l'approche mathématique ne pouvait pas répondre aux attentes des roboticiens quant à ces problématiques. Ces derniers ont ainsi développé des outils de simulation permettant d'immerger une version logicielle de véhicule automatisé dans un trafic simulé [Reece et Shafer, 1993, Sukthankar *et al.*, 1996].

Concernant la simulation de trafic, les travaux de robotique de routes automatisées et de véhicules intelligents ont permis de repenser la manière de concevoir les outils de simulation de trafic. La mise au point et la validation d'algorithmes de déplacement passent nécessairement par la simulation pour des raisons de sécurité et de coût. Ces outils de simulation doivent permettre à une entité simulée de se déplacer de manière autonome et d'interagir avec l'environnement dans lequel elle évolue. Pour avoir des situations qui se rapprochent de la réalité, le trafic simulé doit aussi interagir avec le véhicule automatisé afin d'avoir des comportements crédibles, ce que ne pouvaient offrir les modèles mathématiques. L'approche centrée-individu a tout son intérêt avec l'apparition des simulateurs de conduite dont le but est d'immerger un être humain dans des situations de conduite simulées, ces situations doivent être le plus réalistes possibles afin d'être plausibles et ne pas choquer le conducteur immergé [Bonakdarian *et al.*, 1998]. Afin d'avoir un comportement réaliste, nous avons besoin de bien comprendre la tâche de conduite pour mieux la modéliser.

### 1.1.4 Modélisation de la tâche de conduite

L'approche comportementale appliquée à la simulation de trafic revient à essayer de reproduire la tâche de conduite de chaque conducteur simulé d'une manière réaliste. L'approche comportementale a donc tout son intérêt dans la modélisation de la tâche de conduite. Plus l'activité de conduite simulée est fidèle à la réalité et plus les interactions entre entités simulées sont cohérentes et le trafic émergent est plausible.

L'activité de conduite est un ensemble de tâches, qui peuvent être séquentielles ou parallèles, discrètes ou continues, réalisées par une personne aux commandes d'un véhicule pour se déplacer d'un endroit à un autre. Le conducteur observe l'environnement dans lequel il évolue, l'interprète et essaie d'agir en conséquence. La situation qui se présente à lui est caractérisée par une relative incertitude à la fois dans l'espace et dans le temps.

C'est dans les années 70 que les premières études et tentatives de modélisation de la tâche de conduite ont débuté. Le système routier « véhicule-conducteur-réseau » a ainsi pu être modélisé de manière générale. A l'heure actuelle, la prise en compte des facteurs humains (influence du risque, etc.) fait partie intégrante des études sur la théorie du trafic [Koppa, 1997]. Une modélisation hiérarchique fondée sur l'identification de trois niveaux de prise de décision est généralement évoquée dans la littérature [Michon, 1985] :

- le niveau stratégique concerne la planification du déplacement de l'individu, c'est-à-dire l'itinéraire, la durée du déplacement, etc.
- le niveau tactique concerne la prise de décision relative aux changements de trajectoire, aux traversées d'intersection, etc.
- le niveau opérationnel est celui des tâches de bas niveau de la conduite. Il correspond à l'application effective des décisions prises dans les niveaux supérieurs, par exemple comme l'utilisation du volant et des pédales.

Par la suite, plusieurs modèles de trafic fondés sur l'approche comportementale ont été développés, ces modèles sont détaillés dans la section 1.3.

Nous avons vu que l'approche comportementale privilégie la prise en compte de l'individu dans la modélisation. De ce fait, l'approche comportementale se rapproche d'une discipline qui dérive de l'intelligence artificielle distribuée : les systèmes multi-agents. Dans ce cadre, les modèles de simulation fondés sur les systèmes multi-agents offrent la possibilité de simuler les acteurs du système de trafic par des agents autonomes et leurs interactions, et ce de manière plus réaliste car prenant en compte les contextes de prise de décisions.

## 1.2 Approche multi-agent

Au contraire des approches de modélisation fondées sur la définition d'équations mathématiques, où la dynamique du système est définie dès le début par des relations fonctionnelles entre entités, la simulation multi-agent se propose de modéliser explicitement les comportements des entités et considère que la dynamique globale d'un système, au niveau macroscopique, résulte directement de l'interaction des comportements, au niveau microscopique [Parunak *et al.*, 1998]. En effet, l'approche multi-agent permet de modéliser chaque individu, son comportement et les interactions qui découlent de la mise en commun de ces individus. La dynamique globale du système est alors issue de l'ensemble de ces individus et de leurs interactions. Les concepts d'agents et de systèmes multi-agents peuvent varier avec le contexte d'application, plusieurs définitions existent dans la littérature présentant chacune une vision propre de l'auteur. La définition la plus générale qu'il est possible de donner d'un agent est la suivante : « entité autonome, physique ou virtuelle, capable d'agir, située dans un environnement avec une certaine persistance temporelle, pour satisfaire ses buts ou objectifs en fonction de ses ressources et compétences ».

## Chapitre 1. Les approches de modélisation et simulation de trafic

---

Dans cette partie, nous commençons par introduire les éléments théoriques liés aux systèmes multi-agents et nous présentons ensuite les différentes applications fondées sur cette approche.

### 1.2.1 Les systèmes multi-agents

#### 1.2.1.1 Motivations et concepts

Le terme Intelligence Artificielle (IA) est apparu en 1956, il a été utilisé pour désigner un projet de recherche consistant à concevoir une machine intelligente, c'est-à-dire capable de réussir aussi bien qu'un être humain dans des tâches jugées complexes et qui s'appuie sur une centralisation et une concentration de l'intelligence au sein d'un système unique [Ferber, 1995]. Mais l'IA a vite rencontré un certain nombre de difficultés, dues pour la plupart à la nécessité d'intégrer, au sein d'une même base de connaissances, l'expertise, les compétences et les connaissances d'individus différents qui, dans la réalité, communiquent et collaborent afin de réaliser un but commun.

L'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) [Bond et Gasser, 1988, Erceau et Ferber, 1991, Ferber, 1995] est née, au début des années 80, de la volonté de remédier aux insuffisances et d'enrichir l'approche classique de l'IA en proposant la distribution de l'expertise sur un groupe d'agents, non soumis à un contrôle centralisé, devant être capables de travailler et d'agir dans un environnement commun et de résoudre les éventuels conflits. Pour résumer, l'IAD s'intéresse entre autre à la modélisation de comportements intelligents qui constituent le produit de la coopération entre plusieurs agents, l'étude des systèmes multi-agents est alors née.

#### 1.2.1.2 Définitions et propriétés

De nombreuses définitions des systèmes multi-agents ont été introduites dans la littérature présentant chacune une vision propre de l'auteur. Ferber [Ferber, 1995] définit un SMA comme étant un système  $\langle E, O, A \rangle$  où O est un ensemble d'objets, A est un ensemble d'agents et E l'environnement dans lequel les agents évoluent et là où sont situés les objets. Demazeau [Demazeau, 1995] met l'accent sur deux autres axes caractérisant les SMA : Interactions et Organisation. Il présente une approche nommée VOYELLES qui modélise un SMA autour de quatre dimensions : l'Agent, l'Environnement, l'Interaction, l'Organisation (et récemment des Utilisateurs).

Ainsi, les systèmes multi-agents permettent de modéliser le comportement d'un ensemble d'entités plus ou moins expertes, plus ou moins organisées selon des lois de type social. Ces entités ou agents disposent d'une certaine autonomie, et sont situés dans un environnement dans lequel et avec lequel elles interagissent. Dans la littérature nous pouvons trouver d'autres caractéristiques en plus qui sont associées aux SMA. [Ferber, 1995] précise qu'un agent dispose en général d'un ensemble de buts à atteindre, de compétences et de ressources qui lui sont propres. L'absence de contrôle global

fait également partie des propriétés d'un SMA : la prise de décision est dans ce cas décentralisée au niveau de l'agent.

Une propriété importante des systèmes multi-agents concerne la notion d'émergence. Marvin Minsky [Minsky, 1988], un des pionniers de l'Intelligence Artificielle, définit le concept d'émergence de la façon suivante : une apparition inattendue, à partir d'un système complexe, d'un phénomène qui n'avait pas semblé inhérent aux différentes parties de ce système. Les interactions entre les différentes entités d'un système complexe adaptatif jouent un rôle déterminant dans les dynamiques complexes et l'émergence. L'un des éléments intéressants du processus d'émergence concerne la formation d'un ordre collectif (structures ou modèles cohérents à un niveau macroscopique) en tant que résultat des interactions des agents au sein de la dynamique du système [Dessalles *et al.*, 2007].

Le modèle de Schelling de la ségrégation spatiale [Schelling, 1978] constitue un exemple pionnier du phénomène d'émergence résultant d'interactions sociales locales. L'objectif de ces travaux était d'expliquer comment des structures résidentielles ségrégationnistes pouvaient émerger spontanément, même quand les gens ne sont pas ségrégationnistes. L'absence d'une notion globale des structures ségrégationnistes (comme la notion de ghettos) dans les attributs de l'agent (les préférences) est une caractéristique essentielle de ce modèle. Les agents ne choisissent pas entre habiter ou ne pas habiter dans une structure ségrégationniste mais ont seulement des préférences locales concernant leur quartier préféré. Par ailleurs, même avec un comportement individuel ségrégationniste faible, le jeu des interactions génère une ségrégation plus globale.

Après avoir défini les principes de base d'un système multi-agent, nous détaillons dans la suite les différents éléments composant un SMA selon l'approche VOYELLES : les agents, l'environnement, les interactions et l'organisation.

### 1.2.2 Agent

La notion d'agent a été définie par plusieurs auteurs [Minsky, 1988, Demazeau et Müller, 1990, Ferber, 1995, Briot et Demazeau, 2001]. Pour Demazeau, un agent est une entité intelligente qui agit d'une manière rationnelle et intentionnelle en fonction de ses propres buts et l'état actuel de sa connaissance. D'autres auteurs [Cohen et Levesque, 1990, Wooldridge et Jennings, 1995] définissent un agent en termes d'état mental, qui fait référence aux notions de croyances, de connaissances, d'engagements vis-à-vis de lui-même et des autres agents, etc.

Il existe donc dans la littérature une multitude de définitions. Parmi les définitions existantes, celles de Ferber et de Wooldridge sont généralement utilisées.

**Définition 1.1** *Un agent [Ferber, 1995]*

*On appelle agent une entité physique ou virtuelle*

*a qui est capable d'agir dans un environnement,*

- b qui peut communiquer directement avec d'autres agents,*
- c qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),*
- d qui possède des ressources propres,*
- e qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,*
- f qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),*
- g qui possède des compétences et offre des services,*
- h qui peut éventuellement se reproduire,*
- i dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit.*

La définition d'un agent proposée par Wooldridge [Wooldridge, 2002] est la suivante :

**Définition 1.2** *Un agent [Wooldridge, 2002]*

*Un agent est un système informatique, situé dans un environnement, et qui est capable d'agir de façon autonome dans cet environnement pour atteindre les objectifs (buts) pour lesquels il a été conçu*<sup>1</sup>.

La prise de décision de chaque agent est individuelle et se décompose suivant un cycle de trois phases : perception, décision et action. La phase de perception permet à l'agent d'acquérir un certain nombre d'informations à partir de l'environnement dans lequel il évolue. Dans certains cas, l'agent se construit une représentation symbolique de son environnement à partir des informations perçues ou la met à jour. La décision correspond à une phase de raisonnement qui permet à l'agent de prendre sa décision et de planifier les actions à réaliser pour atteindre son objectif. La phase d'action correspond quant à elle, à la réalisation effective des décisions prises lors de l'étape précédente.

Les travaux en systèmes multi-agents font généralement la distinction entre agents cognitifs et agents réactifs. Les agents réactifs n'ont pas une représentation explicite de l'environnement dans lequel ils évoluent. Leur comportement est de type stimulus réponse. La phase de cognition est très réduite voire inexistante. Les travaux de Brooks [Brooks, 1986, Brooks, 1991] sont une parfaite illustration du concept d'agents réactifs. Selon lui, le comportement d'un agent est illustré par des règles comportementales simples qui associent une action spécifique à un stimulus particulier. Le comportement du système multi-agent résulte de la multitude d'interactions simples entre les agents (principe d'émergence).

A l'inverse, les agents cognitifs disposent d'une représentation explicite et symbolique de l'environnement et des autres agents, peuvent tenir compte de leur passé et disposent d'un but explicite. Ils

---

1. An agent is a computer system that is situated in some environment, and that is capable of autonomous action in this environment in order to meet its design objectives

disposent aussi d'un mode « social » d'organisation. Les relations entre agents s'établissent en fonction des collaborations nécessaires à la résolution du problème. En outre, des travaux récents prennent en compte les aspects émotionnels dans le comportement des agents et notamment leur impact sur les interactions entre individus [Lhomme *et al.*, 2012].

La frontière entre agents réactifs et cognitifs n'est pas aussi claire et certaines architectures d'agents combinent les deux approches ; on parle alors d'agents hybrides [Wooldridge, 2002]. Les propriétés et caractéristiques des agents sont fortement liées à la représentation de l'environnement. Ainsi, plus un agent possède une représentation élaborée de son environnement, plus il lui est possible d'avoir une activité cognitive (figure 1.1).

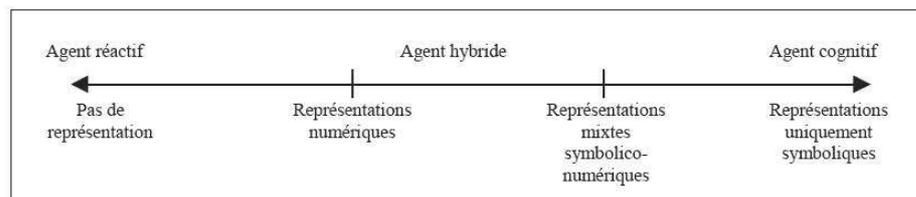


FIGURE 1.1: Axe pratique d'évaluation de la capacité d'un agent à accomplir individuellement des tâches complexes et à planifier ses actions (d'après [Ferber, 1995]).

### 1.2.3 Environnement

L'environnement joue un rôle primordial dans la modélisation d'un système multi-agent [Weyns *et al.*, 2005]. Il décrit le contexte dans lequel les agents évoluent. La composition de l'environnement dépend fortement de la nature de l'application considérée. Dans les applications de type simulation, l'environnement peut correspondre soit à l'environnement de simulation soit à l'environnement simulé. L'environnement de simulation fournit l'infrastructure permettant d'exécuter la simulation. L'environnement simulé quant à lui, constitue une partie du modèle et correspond à l'espace dans lequel est placé un ensemble d'objets pouvant être perçus, manipulés, modifiés par les agents du système [Klügl *et al.*, 2005].

Dans le cadre de nos travaux de recherche, l'environnement simulé joue un rôle important dans les interactions entre agents situés. Les recherches sur les systèmes multi-agents n'ont pas accordé beaucoup d'importance à l'environnement dans lequel les agents sont situés contrairement à la modélisation des agents. « *The fact that functionalities of the environment are often treated implicitly, or in an ad-hoc manner, indicates that in general, the MAS research community fails to treat the environment as a first-class entity* » [Weyns *et al.*, 2005].

Toutefois, de récents efforts tentent de montrer l'importance de l'environnement dans les systèmes multi-agents à travers un certain nombre de travaux dans différents domaines. Cela inclut le

traitement de l'environnement comme une abstraction de première classe dans les systèmes multi-agents [Gouaich et Michel, 2005, Weyns *et al.*, 2007], en discutant le rôle que joue l'environnement dans les systèmes multi-agents [Klügl *et al.*, 2005, Weyns *et al.*, 2006] la modélisation et la conception d'environnements virtuels spécialement et plus particulièrement pour la simulation multi-agent [Okuyama *et al.*, 2005, Lees *et al.*, 2005, Steiner *et al.*, 2006, Bandini et Vizzari, 2007] et la modélisation de l'environnement physique et social [Báez-Barranco *et al.*, 2007]. [Weyns *et al.*, 2005] soulignent l'importance de considérer l'environnement comme une abstraction du premier ordre dans le processus d'ingénierie du développement des SMA.

[Odell *et al.*, 2002] définissent l'environnement comme étant le support qui fournit les conditions dans lesquelles une entité (agent) peut exister. La définition ajoute un aspect important au rôle de l'environnement en intégrant la gestion des autres entités et non seulement les agents aux responsabilités de l'environnement. Dans un souci de présenter une vue plus détaillée de l'environnement dans les SMA, [Odell *et al.*, 2002] font la distinction entre trois environnements différents : physique, de communication et social. L'environnement physique fournit les lois, les règles et les contraintes qui régissent et soutiennent l'existence des agents et des objets qui composent le système, tout comme l'environnement, nous les Humains, sommes contraints, par exemple, par les lois de la physique. Même si l'idée est modélisée pour un environnement physique et naturel, cela n'exclut pas les agents logiciels et les environnements virtuels. L'environnement de communication fournit 1) des principes et des processus qui régissent et favorisent l'échange d'idées, de connaissances, d'information et de données, et 2) des fonctions et des structures qui sont utilisées pour améliorer la communication. L'environnement social est un sous-ensemble de l'environnement de communication dans lequel les agents interagissent de manière coordonnée. L'environnement social comprend 1) les groupes dans lesquels l'agent participe, 2) les rôles de l'agent, et 3) tous les membres qui jouent un rôle dans ces groupes sociaux. [Tummolini *et al.*, 2005] introduisent la communication comportementale implicite, dans laquelle la communication se produit clairement au niveau physique (par la perception), s'écartant ainsi de la définition présentée par [Odell *et al.*, 2002].

Les deux points de vue peuvent être unifiés en étendant la communication à l'environnement physique. [Briot et Demazeau, 2001, Ferreira *et al.*, 2009] classifient la communication en deux modes principaux : la communication implicite, qui se produit dans l'environnement physique et la communication explicite, qui se produit dans l'environnement de communication et est régie par des protocoles de haut niveau (hors de la portée de ce chapitre). Ils ont en outre classé la communication implicite en deux formes distinctes : la communication physique (liée à l'observabilité des objets et des agents) et la communication comportementale (liée à l'observabilité des actions de l'agent). La communication physique se produit quand un agent exerce des influences sur son environnement externe, ces influences produisent un changement d'état dans cet environnement, ce changement d'état est perçu et interprété par un autre agent (peut-être plus d'un), et cet agent peut éventuellement changer son propre comportement suite à l'interprétation des faits perçus. La communication comportementale fonctionne de la même manière, avec la différence que cela se produit quand un agent exerce des in-

fluences sur son environnement interne. Dans le cadre de nos travaux, nous nous situons au niveau de la communication implicite (physique et comportementale), dans la mesure où nos agents ne communiquent pas directement entre eux. Nous considérons que la communication est indirecte et se fait à travers l'environnement. Par exemple, quand un agent conducteur allume son clignotant pour tourner, nous pouvons considérer qu'il communique indirectement avec les autres agents présents autour de lui.

Par ailleurs, l'environnement possède un certain nombre de propriétés [Russell et Norvig, 2002] :

- Il peut être discret ou continu : s'il y a un nombre limité de percepts et d'actions possibles distincts et clairement définis, l'environnement est considéré comme discret. Dans le cas contraire, il s'agit d'environnement continu. Par exemple, un jeu d'échec est un environnement discret : le nombre de déplacements possibles est fini. Par contre, la conduite de véhicule est continue, la vitesse et la position du véhicule et des autres véhicules varient dans un ensemble de valeurs continues.
- il peut être déterministe ou non déterministe : un environnement est déterministe si son état futur est déterminé d'une manière unique à partir de son état courant et des effets résultants des actions des agents. Si le résultat est incertain et que les actions ne sont pas reproductibles, l'environnement est qualifié de non déterministe,
- il peut être statique ou dynamique : si l'environnement ne peut pas changer d'état sans l'intervention de l'agent, on est dans le cas statique. L'environnement est dynamique si son état peut se modifier sans l'action de l'agent dans l'intervalle de temps entre deux perceptions,
- il peut être accessible ou inaccessible : un environnement est accessible à l'agent s'il peut percevoir entièrement l'état de l'environnement. En d'autres termes, s'il peut obtenir des informations complètes, précises et à jour sur l'état de son environnement. Sinon, l'environnement est inaccessible.

Notons que dans la plupart des applications multi-agents, l'environnement est inaccessible, non déterministe, dynamique et continu.

Par ailleurs, pour les environnements géographiquement situés, nous trouvons deux types de représentations : les représentations discrètes et continues de l'espace. Dans le cas d'une représentation discrète de l'espace, l'environnement est le plus souvent discrétisé sous forme de grille. Les cases de la grille sont représentées par des coordonnées de valeur entière et chaque agent est situé dans une grille. Pour les représentations continues de l'espace, l'environnement est représenté avec des coordonnées continues. La position de chaque agent est donnée par des coordonnées réelles  $(x, y)$  dans une représentation à 2D et  $(x, y, z)$  dans une représentation 3D.

Les deux approches présentent des avantages et des inconvénients. Pour les représentations discrètes, la complexité des situations est moins importante mais la représentation de l'environnement est limitée, ce qui limite la variété des comportements et la finesse de la représentation. Pour les représentations continues, les calculs sont certes plus complexes, mais la description de la position et des déplacements des agents est plus riche permettant ainsi des comportements plus réalistes.

### 1.2.4 Interaction

Une interaction est une relation dynamique entre deux ou plusieurs agents à travers leurs actions réciproques. L'ensemble des interactions constitue la source de l'émergence d'un comportement global. Ainsi, les interactions sont constituées d'une série d'actions s'appliquant à des agents et soumises à des conditions d'activation. De ce fait, elles ont une influence sur le comportement futur des agents [Ferber, 1995].

Ferber *et al.* [Ferber *et al.*, 2009] évoquent deux catégories des systèmes à Interactions, « *agent-centered interaction* » et « *environment-based interaction* ». La communauté des chercheurs semble aussi se répartir en deux domaines d'études [Guessoum *et al.*, 2012].

Dans la première catégorie, les interactions sont utilisées comme moyen de communication entre les agents. Ce type d'interaction est généralement qualifié de communication directe qui se fait à travers des échanges de messages entre les agents. Des protocoles dédiés, comme FIPA-ACL<sup>2</sup>, ont été développés afin de proposer des standards de communication pour les systèmes multi-agents.

La deuxième catégorie considère que les interactions sont elles-mêmes des actions mettant en jeu plusieurs agents [Guessoum *et al.*, 2012]. Les auteurs évoquent deux principales approches : les approches liées à la théorie des affordances [Gibson, 1977, Cornwell *et al.*, 2003] et celles cherchant à qualifier les actions réalisées entre les agents. Ces interactions peuvent aussi être qualifiées d'indirectes ou de communication indirecte à travers l'environnement.

### 1.2.5 Organisation

Enfin, la dernière facette du système multi-agent est l'organisation. Elle permet de mettre en place un cadre global de fonctionnement pour le système. Elle peut être définie comme un agencement de relations entre les agents produisant une unité du système [Ferber, 1995]. L'organisation constitue un schéma de prise de décision et de communication appliqué à un ensemble d'agents réalisant un ensemble de tâches afin de satisfaire des buts tout en assurant un état global cohérent [Malone, 1987, Grislin-Le Strugeon, 1995].

Dans un système multi-agent, l'organisation est une notion à dimensions multiples, elle est implicite ou explicite, statique ou dynamique, prédéfinie ou émergente, ascendante ou descendante [Mandiau, 2000, Mandiau *et al.*, 2002].

Les structures organisationnelles proposées peuvent être statiques, c'est-à-dire les liens d'autorité et de communication entre les agents sont conçus *a priori* pendant la phase de conception du système. Par exemple, l'utilisation de rôles par les agents permet de fournir une structure organisationnelle définie à la conception [Ferber *et al.*, 2004]. L'utilisation de normes permet de définir des

---

2. Foundation for Intelligent Physical Agents - Agents Communication Language. <http://www.fipa.org> (accessible en 2013).

obligations et des interdictions permettant de faciliter le bon fonctionnement de la société d'agents [Hübner *et al.*, 2002].

L'organisation d'un SMA peut aussi être définie suivant une approche dynamique, les liens sont alors créés de façon dynamique lorsque les agents cherchent à atteindre leurs propres buts. Ce type d'organisation peut être parfois associé à la notion d'émergence. Dans ce cadre, nous pouvons citer les travaux de [Hassas, 2003, Gleizes, 2004, Serugendo *et al.*, 2006] sur les notions d'organisation dynamique, d'auto-organisation et d'adaptation. Récemment, les concepts d'émergence et d'auto-organisation ont été différenciés par [Serugendo *et al.*, 2006]. L'émergence est un comportement global d'un système surgissant de l'interaction locale ; tandis que l'auto-organisation est vue comme une structure dynamique qui peut se maintenir sans intervention externe [Guessoum *et al.*, 2012].

### 1.3 Approche multi-agent et simulation

Après avoir présenté les principes généraux des systèmes multi-agents, nous nous intéressons dans cette section, à l'un des axes de recherche dans les systèmes multi-agents le plus actif : la simulation multi-agent. Nous présentons ensuite quelques applications de simulation fondées sur l'approche multi-agent.

#### 1.3.1 Principes

Au contraire des approches de modélisation fondées sur la définition d'équations mathématiques, où la dynamique du système est définie dès le début par des relations fonctionnelles entre entités, la simulation multi-agent se propose de modéliser explicitement les comportements des entités et considère que la dynamique globale d'un système, au niveau macroscopique, résulte directement de l'interaction des comportements, au niveau microscopique [Parunak *et al.*, 1998]. En effet, l'approche multi-agent permet de modéliser chaque individu, son comportement et les interactions qui découlent de la mise en commun de ces individus. La dynamique globale du système est alors issue de l'ensemble de ces individus. Cette approche ascendante est la caractéristique la plus importante de la simulation à base d'agent [Epstein, 2007].

La simulation multi-agent préserve l'hétérogénéité du système à simuler. Elle se caractérise par la possibilité de représenter plusieurs niveaux de granularité dans les systèmes hétérogènes [Ferber, 1995]. La simulation multi-agent est particulièrement adaptée à la reproduction de phénomènes naturellement localisés et distribués [Parunak *et al.*, 1998]. Le phénomène réel à simuler est décomposé en un ensemble d'éléments discrets autonomes dont les interactions reproduisent le phénomène. Chacun des éléments est modélisé par un agent (généralement en faisant quelques hypothèses simplificatrices du fait de la complexité des phénomènes à simuler) pour lequel il faut définir les connaissances, les capacités, les comportements et les modes d'interaction qu'il adoptera à l'en-

contre des autres agents. La modélisation des entités et de leurs relations peut être améliorée et enrichie par des évaluations successives et des comparaisons avec les observations du phénomène réel [Drogoul, 1993, Espié *et al.*, 2002] (figure 1.2).

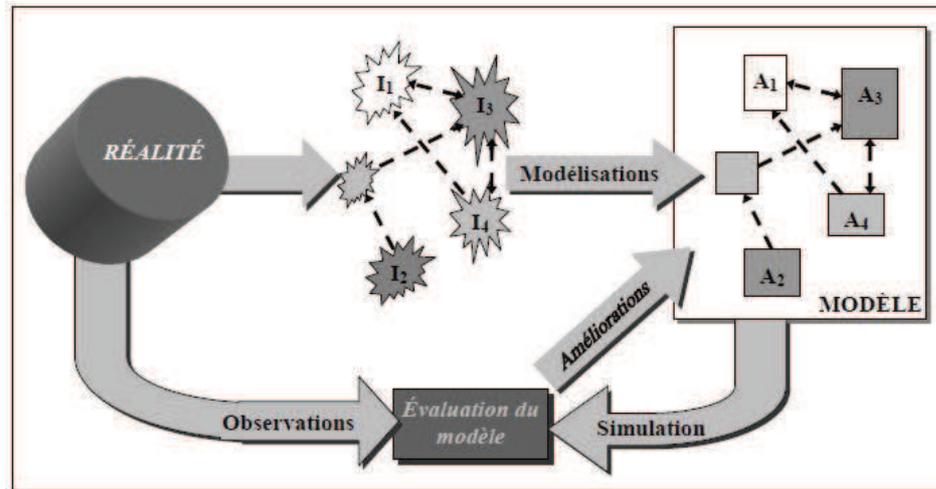


FIGURE 1.2: Principes de la simulation multi-agent (d'après [Drogoul, 1993])

La simulation multi-agent est donc une technique qui permet de reproduire des phénomènes complexes difficilement appréhendables de manière analytique. Actuellement, les concepts de la simulation multi-agent sont appliqués dans pratiquement tous les domaines [Briot et Demazeau, 2001]. En raison de la multitude des domaines d'application, il est impossible de donner une vue d'ensemble de toutes les applications existantes. Dans la section suivante, nous donnons quelques exemples d'applications et nous nous focalisons sur la simulation multi-agent de trafic.

### 1.3.2 Applications multi-agents

La simulation multi-agent est actuellement utilisée dans des domaines très variés. Ceci est dû, en grande partie, au fait que ce type de simulation a la capacité de répondre à différentes attentes de modèles allant de simples entités (généralement appelées agents « réactifs ») aux plus complexes (agents « cognitifs »). La simulation multi-agent présente aussi l'avantage de pouvoir gérer différents niveaux de représentation (par exemple, les individus et les groupes) au sein d'un cadre conceptuel unifié [Drogoul *et al.*, 2002]. Ces éléments font que le choix se porte assez facilement vers les systèmes multi-agents pour la simulation de systèmes complexes. En se référant aux différents travaux de ces dernières années, nous pouvons constater que la simulation multi-agent est utilisée dans plusieurs domaines et pour différentes applications. Cette approche a été largement utilisée pour la simulation des êtres vivants ainsi que leurs interactions avec leur environne-

ment : éthologie, sociétés animales ou le fonctionnement d'écosystèmes, et ce depuis les années 90 [Drogoul, 1993, Ramat *et al.*, 1998, Bousquet *et al.*, 1998, Bousquet et Le Page, 2004].

Les applications se sont étendues par la suite à plusieurs autres domaines : l'optimisation de la logistique [Weyns *et al.*, 2006], les systèmes biologiques [Bandini *et al.*, 2006], les sciences sociales [Prietula *et al.*, 1998, Goldspink, 2002, Epstein, 2007], les systèmes de transport [Burmeister *et al.*, 1997, Bazzan *et al.*, 1999, Wahle et Schreckenberg, 2001, Bazzan, 2005, Balmer et Nagel, 2006, Balmer *et al.*, 2009], la planification urbaine [Arentze et Timmermans, 2003], etc.

Nous pouvons aussi évoquer une autre application possible : la simulation virtuelle des comportements humains. De nos jours, le cinéma et les jeux vidéos sont de plus en plus demandeurs d'outils permettant de reproduire l'animation comportementale d'avatars dans une quête de situations de jeux ou de scènes de films de plus en plus réalistes. Nous pouvons citer l'exemple du logiciel MASSIVE<sup>3</sup> qui a été développé à l'occasion de la trilogie cinématographique du Seigneur des Anneaux et permettant de simuler des foules<sup>4</sup>.

Nous nous focalisons, pour la suite, sur la simulation de trafic, l'une des applications à laquelle les chercheurs se sont intéressés ces dernières années. Dans le cadre de la simulation du trafic routier, le but est de simuler finement le système de trafic en s'attachant à reproduire le comportement des conducteurs réels. La difficulté consiste à conserver dans le temps un comportement cohérent du point de vue de l'humain immergé, de plus, le trafic global doit être valide d'un point de vue statistique. Les systèmes multi-agents se prêtent bien pour simuler les acteurs du système de trafic et leurs interactions.

### 1.3.3 Simulation multi-agent de trafic

Les possibilités qu'offrent les SMA s'adaptent aux problèmes posés par la simulation du trafic routier [Burmeister *et al.*, 1997, Bazzan, 2005, Doniec *et al.*, 2007]. Nous pouvons considérer chaque conducteur comme un agent du système doté d'un comportement qui lui est propre. Le trafic simulé va résulter de la simulation du comportement de chaque agent du système de trafic considéré et des interactions qu'il entretient avec son environnement. Chaque agent dispose d'objectifs et de caractéristiques propres, et fait preuve d'autonomie lors de son déplacement (cas des usagers) sur le réseau routier simulé. La prise de décision de chaque agent est individuelle et se fonde sur une perception locale de son environnement.

#### 1.3.3.1 Simulation fondée sur la demande de trafic

La détermination de la demande de trafic est la phase initiale dans toutes les simulations de trafic. Dans le passé, les approches étaient plutôt orientées vers la détermination de trajet (appelées « *trip-*

---

3. <http://massivesoftware.com/> (accessible en 2013)

4. Massive : la vraie magie du « Seigneur des anneaux », sur Allociné

*based approaches* »), actuellement on parle plus d'approches orientées vers les activités (« *activity-based approaches* »). Pour ces dernières, un programme journalier d'un individu représentatif appartenant à une classe de comportement particulier est reproduit. Cette approche est plutôt orientée vers les activités qu'un individu peut effectuer pendant une journée plutôt que vers un trajet « origine-destination » quelconque. De ce fait, l'origine et la destination d'un trajet sont donc liées aux activités que l'individu voudrait effectuer [Bhat et Koppelman, 2003, Timmermans, 2005].

La simulation multi-agent s'adapte bien aux approches fondées sur les activités. Simuler des activités planifiées et exécutées par des agents permet d'analyser les systèmes de trafic à un niveau plus détaillé en intégrant d'autres sources d'hétérogénéité entre les agents. Un état de l'art plus détaillé concernant ces travaux se trouve dans [Bazzan et Klügl, 2013].

### 1.3.3.2 Simulation à base d'agent des choix liés au trafic

Ce type de modèle s'intéresse aux différents choix qui peuvent être effectués à différents niveaux de granularité : le choix de l'heure de départ et d'arrivée, le mode et le choix d'itinéraire, le choix de changement de voies, etc. Dans ces modèles, les agents sont amenés à choisir une option parmi un ensemble d'alternatives. Le résultat de ce processus de décision est généralement des gains ou des utilités calculés par le décideur.

Nous présentons quelques travaux sur le choix d'itinéraire parce que c'est une dimension importante concernant les choix effectués par les agents. Il existe aussi d'autres types de choix qui sont proches de la problématique que nous traitons dans le cadre de cette thèse, il s'agit des choix concernant les changements de voies. Cet aspect est abordé dans la section suivante.

Concernant les modèles de choix d'itinéraire, plusieurs types de modélisation existent dans la littérature. Dans ce cadre, nous pouvons citer les travaux dont le but est d'étudier l'impact de fournir des informations aux conducteurs (par diffusion, les systèmes embarqués, ou Internet) sur leurs comportements. Par exemple, [Klügl et Bazzan, 2004, Chmura et Pitz, 2007] utilisent des scénarios abstraits inspirés à partir de métaphores de la théorie des jeux. Dans ces deux travaux, un modèle d'apprentissage par renforcement est utilisé pour reproduire la prise de décision chez l'être humain.

Dans d'autres modèles des scénarios avec des alternatives différentes de routes, souvent en utilisant des réseaux routiers réels sont explicitement représentés et des modèles de prise de décision plus complexes sont utilisés. [Wahle *et al.*, 2002] utilisent une simulation microscopique de trafic sur la base des règles de Nagel-Schreckenberg [Nagel et Schreckenberg, 1992]. Les informations concernant l'état du trafic sont communiquées aux conducteurs afin d'appuyer leur choix d'itinéraire.

D'autres travaux se sont intéressés à des problématiques de communication et de partage d'information concernant le trafic [Yamashita *et al.*, 2005]. L'objectif de ces travaux est d'étudier l'impact du partage d'information sur les comportements des agents. Les auteurs montrent qu'une augmentation du nombre de conducteurs qui se partagent les informations entraîne une diminution du temps

de parcours non seulement pour les conducteurs équipés du dispositif de partage d'information mais pour les autres agents aussi. Dans [Klühl et Rindsfuser, 2011], les conducteurs simulés apprennent à plusieurs reprises pour des temps de parcours réels sur des segments de réseau utilisés pour la production d'une répartition équilibrée de la charge dans un réseau réel. Ensuite, un lien est bloqué et les agents à proximité sont informés de ce blocage. Les agents sont alors amenés à changer d'itinéraire. Les auteurs montrent que la répartition du trafic dans cette situation est différente de la situation dans laquelle le lien bloqué est connu depuis le début. [Tlig *et al.*, 2012] s'intéressent à la résolution de problèmes de partage d'espace commun pour des véhicules autonomes dans des situations de blocage survenant lors du déplacement des véhicules. Dans leurs travaux, les agents utilisent des règles de coordination réactives et communiquent afin de se coordonner et minimiser le temps de blocage de chacun.

D'autres modèles présentent des architectures d'agent plus complexes pour modéliser les mécanismes de décision des conducteurs. Une architecture BDI est utilisée pour modéliser le mécanisme de prise de décision dans [Rossetti *et al.*, 2002] pour une extension du simulateur de trafic DRACULA. Une architecture d'agent multi-niveaux (« *layered agent architectures* ») pour des conducteurs simulés a été proposée dans [Bazzan *et al.*, 1999]. L'architecture combine un modèle BDI pour le raisonnement de haut niveau concernant le choix d'itinéraire (niveau stratégique) et un modèle réactif pour la tâche de conduite (niveau tactique).

#### 1.3.3.3 Simulation de flux de trafic

Tout dépend des objectifs de l'étude effectuée, la simulation du choix d'itinéraire et du mode de déplacement peut ne pas être suffisante dans certains cas. Les modèles présentés précédemment traitent une granularité de temps de l'ordre d'une journée et sont donc pertinents pour calculer les temps de déplacement, par exemple. Par ailleurs, les simulations de trafic que nous présentons dans cette section s'intéressent à une granularité plus fine. Le but étant de reproduire les comportements individuels d'une manière fine et d'aboutir à des simulations valides au niveau collectif. De plus, reproduire des comportements valides permet d'utiliser ces simulations pour des simulateurs de conduite afin de permettre l'immersion de conducteurs réels.

ArchiSim est probablement un des premiers outils de simulation qui a eu pour ambition de simuler un trafic complexe et réaliste. Il est fondé sur les résultats des travaux en psychologie de la conduite et permet de coupler un simulateur de conduite avec une simulation de trafic [Espié, 1995]. La motivation d'une telle approche est de pouvoir étudier le comportement d'un être humain plongé dans un trafic visuellement et statistiquement réaliste. Archisim repose donc sur une approche comportementale [Espié et Saad, 2000] : le modèle de trafic doit être générique afin de pouvoir adapter le comportement des conducteurs simulés aux différents types de situations de conduite. Le modèle de trafic sous-jacent a fait l'objet de développements pour le cas de la conduite en file [El Hadouaj, 2004], pour le cas des intersections à base de matrice de décision [Champion et Espié, 2002, Champion, 2003], avec une

## Chapitre 1. Les approches de modélisation et simulation de trafic

---

prise en compte de comportements non normatifs au niveau des carrefours [Doniec, 2006] et pour le comportement des deux-roues motorisés dans la simulation [Bonte *et al.*, 2006].

Par ailleurs, d'autres modèles se sont intéressés à la modélisation et la simulation des aspects du comportement individuel d'un conducteur. Des propositions de modèles d'agent reproduisant des styles de conduite différents (par rapport aux paramètres individuels tels que la vitesse préférée, l'écart acceptable pour le véhicule précédent, l'accélération, le temps de réaction) peuvent être trouvés dans [Ehlert et Rothkrantz, 2001]. Le but de ces travaux est de créer des scénarios de trafic plus réalistes en incluant une plus grande hétérogénéité dans le modèle des conducteurs. De même, [Paruchuri *et al.*, 2002] proposent un modèle multi-agent relativement complet possédant un grand nombre de paramètres avec différents types de conducteurs (agressif, prudent) et permettant de rendre compte de comportements de conducteurs relativement réalistes. Les aspects psychologiques de la conduite sont pris en compte au niveau des calculs cinématiques par le biais de caractéristiques individuelles propres à chaque agent. La prise de décision est individuelle mais reste supervisée par des processus centralisés destinés à prendre le contrôle dans certaines situations comme par exemple des embouteillages ou des interblocages en carrefour.

Dans ce même contexte, [Lacroix *et al.*, 2009] présentent un modèle de différenciation comportementale en introduisant des styles de conduite dans le simulateur de trafic SCANeR<sup>®</sup>. Ces styles de conduite reflètent le fait qu'un conducteur puisse être agressif, prudent, ou normal. Ils correspondent à un ensemble de traits de personnalités qui font apparaître une personnalité identifiable. En d'autres termes, les styles de conduite correspondent à des « classes » de conducteurs possédant des traits de personnalité similaires. Les auteurs introduisent ainsi des comportements qui peuvent violer la norme. Cependant la violation de la norme concerne le non respect des règles du code de la route. Ces travaux ne traitent pas des comportements non normatifs liés à l'occupation de l'espace.

Nous nous intéressons, dans nos travaux de recherche, à la reproduction de pratiques observées. L'idée est de modéliser des comportements hétérogènes reproduisant ceux que l'on peut observer dans la réalité. Il s'agit de pouvoir simuler des comportements liés à des phénomènes d'anticipation (anticipation de position sur les voies) mais aussi des phénomènes liés à l'occupation de l'espace au sol disponible, en particulier pour des contextes de trafic très dense en milieu urbain.

Nous pouvons citer des exemples de situations que nos travaux visent à rendre compte : les phénomènes de faufilement (2 roues, véhicules d'urgence, etc.), les phénomènes de réappropriation de l'espace roulant en approche et dans les carrefours, les phénomènes liés à des événements spécifiques (véhicule mal garé, véhicule en situation d'urgence, etc.), les phénomènes de distribution du trafic au niveau des barrières de péages.

Dans ce cadre, nous devons disposer de modèles permettant de reproduire le comportement des conducteurs réels en termes de changements de voies et d'occupation de l'espace au sol. Les phénomènes de changement de voie sont des situations difficiles à reproduire de manière satisfaisante (en prenant en compte le contexte routier et l'hétérogénéité des comportements). Plusieurs modèles de

simulation de trafic fondés sur les systèmes multi-agents ont modélisé les mécanismes de changement de voie [Hidas, 2002, El Hadouaj *et al.*, 2004, Dai et Li, 2010, Luo et Boloni, 2012]). Dans le cadre de ces travaux, les voies utilisées par les conducteurs correspondent aux voies physiques définies par le marquage au sol. Les agents occupent par conséquent l'espace en se référant à ces voies. Ces travaux ne permettent donc pas de simuler les phénomènes pré-cités et les simulations résultantes ne correspondent par forcément à ce que l'on peut observer dans la réalité. Dans un certain nombre de situations, la présence de marquages au sol n'empêche pas les conducteurs de s'approprier l'espace roulant en fonction de leurs buts et du contexte. On peut considérer que chaque conducteur surcharge, dans ces situations, la structure de la route proposée par le marquage au sol en se construisant une représentation ego-centrée qui lui est propre et qui répond à ses buts. Le fait que les usagers puissent se définir des représentations ego-centrées différentes pour une même configuration « physique » peut être source de conflit.

Très peu de travaux se sont intéressés à la problématique de l'occupation de l'espace telle que nous pouvons l'observer dans certaines situations ou pour un certain type d'usager. [Bonte *et al.*, 2006, Lee *et al.*, 2009] ont proposé des solutions pour le cas particulier des deux-roues motorisés. [Lee *et al.*, 2009] s'appuient sur une modélisation mathématique, tandis que [Bonte *et al.*, 2006] sur une modélisation multi-agent. [Bonte *et al.*, 2006] utilisent le concept des voies virtuelles afin de prendre en compte le comportement de déplacement des deux-roues motorisés. Ces travaux sont détaillés au chapitre suivant de la thèse.

Notre objectif est de développer un modèle du conducteur qui soit le plus réaliste possible en prenant en compte les pratiques des conducteurs et ce, pour les situations les plus variées possibles. Nous abordons dans le cadre de notre thèse, la simulation du trafic routier en considérant une approche comportementale fondée sur les systèmes multi-agents. Cette approche est développée depuis une vingtaine d'années à l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS devenu IFSTTAR en 2011) dans le cadre de la simulation de trafic ArchiSim [Espíe, 1995].

## Conclusion

Ce premier chapitre constitue un chapitre introductif dans lequel nous avons présenté le contexte applicatif de nos travaux de recherche : la simulation de trafic routier. Dans un premier temps, nous avons présenté les méthodes mathématiques de simulation et leurs limites pour reproduire des situations réalistes au niveau des comportements individuels. Par la suite, nous avons présenté l'approche comportementale qui est issue de recherches dans différents domaines comme la robotique, la biologie et les systèmes multi-agents. Cette approche constitue une alternative intéressante aux approches classiques fondées sur les lois de poursuite. Les systèmes multi-agents fournissent un cadre théorique à cette nouvelle approche de simulation. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art succinct des travaux en simulation multi-agent de trafic.

## **Chapitre 1. Les approches de modélisation et simulation de trafic**

---

Nous étudions les pratiques observées dans la réalité et nous nous intéressons à la façon avec laquelle un conducteur se représente l'environnement autour de lui. Nous accordons une grande importance au contexte et aux différentes interactions qu'un agent conducteur peut avoir avec son environnement et les autres entités autour de lui afin de modéliser au mieux le comportement que peut avoir un conducteur dans une situation réelle. Le chapitre suivant est consacré à présenter notre problématique et à dresser l'état de l'art des différents éléments permettant d'y répondre.

## Chapitre 2

# Simulation de trafic : occupation de l'espace et représentation de l'environnement

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Occupation de l'espace et simulation de trafic routier</b>	<b>32</b>
2.1.1	Pratiques réelles des conducteurs	32
2.1.2	Approches existantes pour étudier l'occupation de l'espace	36
2.1.3	Synthèse	42
<b>2.2</b>	<b>Représentation de l'environnement par l'agent conducteur</b>	<b>42</b>
2.2.1	Perception en psychologie cognitive	43
2.2.2	Perception en SMA	44
2.2.3	Représentation mentale de l'environnement	46
<b>2.3</b>	<b>Analyse et positionnement par rapport aux travaux précédents</b>	<b>52</b>
2.3.1	Hétérogénéité des comportements	52
2.3.2	Nombre de véhicules	53
2.3.3	Représentation de l'environnement	54
2.3.4	Évaluation et choix de la voie	55

---

Dans le premier chapitre, nous nous sommes focalisés essentiellement sur l'approche multi-agent en présentant les concepts généraux des systèmes multi-agents et leurs applications en simulation et plus particulièrement leur application à la simulation de trafic routier.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux phénomènes d'occupation de l'espace au sol et à la problématique de la représentation de l'environnement de l'agent. La première partie est consacrée à étudier les pratiques que l'on peut observer dans la réalité en termes d'occupation de l'espace au sol. Nous présentons ensuite un état de l'art des approches proposées dans la littérature et utilisées dans

## **CHAPITRE 2. SIMULATION DE TRAFIC : OCCUPATION DE L'ESPACE ET REPRÉSENTATION DE L'ENVIRONNEMENT**

---

divers outils de simulation pour étudier l'occupation de l'espace dans la simulation de trafic routier. La seconde partie est dédiée aux travaux qui se sont intéressés au processus utilisé par l'agent pour se représenter son environnement. Nous finissons le chapitre par une analyse des travaux présentés et une introduction de notre problématique.

### **2.1 Occupation de l'espace et simulation de trafic routier**

Afin de mieux simuler les comportements des conducteurs en termes d'occupation de l'espace, nous nous sommes intéressés, dans un premier temps, aux pratiques que nous pouvons observer dans la réalité. Nous dressons un état de l'art des modèles de simulation existants traitant de cette problématique.

#### **2.1.1 Pratiques réelles des conducteurs**

L'observation des pratiques réelles montre que dans un certain nombre de situations, les conducteurs ne respectent pas les normes ou les règles du code de la route pour être par exemple plus rapide au niveau collectif et le plus souvent pour un gain individuel. Les conducteurs ont parfois tendance à se réapproprier l'espace roulant en construisant leur propre représentation de l'environnement qui peut ne pas être conforme à la réglementation [Minh *et al.*, 2005a, Minh *et al.*, 2005b]. Nous parlons dans ce cas de « comportements non normatifs » en termes d'occupation de l'espace. Dans la plupart des cas, ces manoeuvres permettent aux conducteurs de s'assurer un gain en optimisant leur temps de déplacement par exemple. Nous pouvons, dans ce sens, donner l'exemple des deux-roues motorisés qui peuvent avoir des mouvements longitudinaux et latéraux de déplacement différents des autres usagers de la route [Cho et Wu, 2004]. De plus, les motocyclistes ont tendance à accepter de prendre plus de risque que les autres conducteurs dans leurs déplacements [Banet, 2006, Aupetit et Espié, 2012]. Pour ce type d'usager, nous pouvons observer des pratiques d'occupation de l'espace très différentes de celles observées chez les automobilistes.

Dans cette section, nous présentons quatre situations typiques où l'on peut observer des pratiques précitées, à savoir une situation avec un véhicule mal garé, la présence d'un véhicule d'urgence, le cas d'une intersection et le comportement des deux-roues motorisés

##### **2.1.1.1 Situation de blocage de longue durée**

Dans certains cas, les conducteurs se retrouvent bloqués dans une situation routière. Ce blocage peut être de courte durée, mais dans le cas où le blocage est de longue durée ou de durée indéterminée, le conducteur doit trouver une solution afin de se sortir de cette situation. Parfois la solution trouvée consiste à ne pas respecter les règles du code de la route.

## 2.1. OCCUPATION DE L'ESPACE ET SIMULATION DE TRAFIC ROUTIER

Pour illustrer un exemple de cette situation, nous présentons la situation routière décrite par la figure 2.1 : un véhicule  $x$  est gêné par un véhicule  $y$  qui est mal garé. Deux cas de figures sont alors possibles. Dans la première alternative, le conducteur a plutôt un « comportement normatif » et choisit de dépasser le véhicule gênant en effectuant un changement de voie, si le contexte le permet. Dans ce cas, il sera gêné par les véhicules qui circulent sur la deuxième voie et notamment par le véhicule  $z$  qui se déplace avec une vitesse plus lente. Par conséquent, en laissant passer le véhicule  $z$  pour effectuer ensuite son changement de voie, il sera bloqué derrière un véhicule plus lent. Dans la deuxième solution, le conducteur constate après observation de son environnement, qu'il existe un espace disponible sur la chaussée entre les véhicules  $y$  et  $z$ . Il emprunte alors l'espace qu'il a identifié. Si de plus, le conducteur  $z$  a un comportement coopératif, il se décalera vers la gauche afin de faciliter le passage du conducteur  $x$ . Nous pouvons observer dans la réalité ce type de comportement bien qu'il soit contraire aux règles du code de la route. Ce type de comportement est qualifié de « comportement non normatif ».

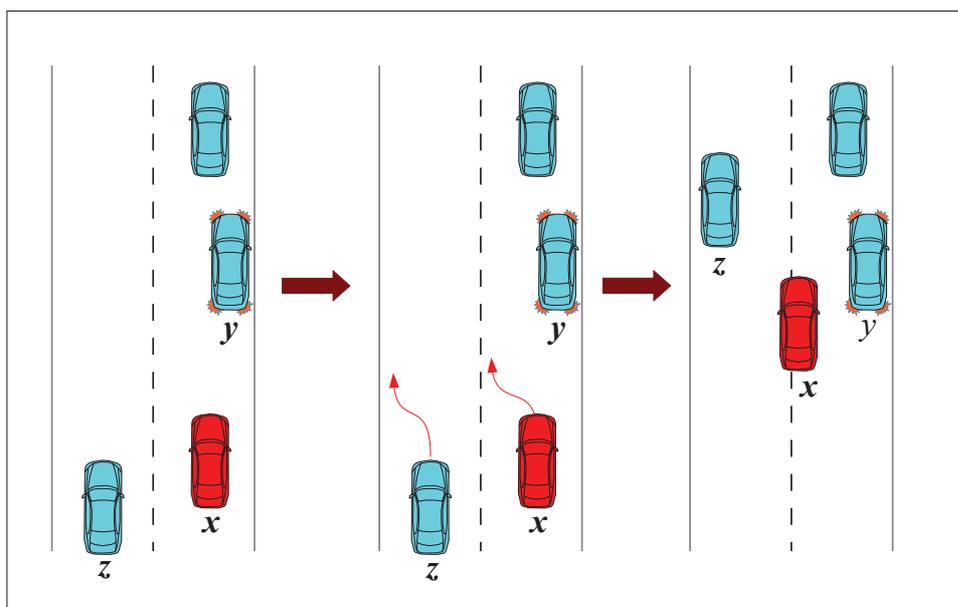


FIGURE 2.1: Positionnement des véhicules sur la chaussée : cas d'un véhicule mal garé sur la chaussée

### 2.1.1.2 Situation d'urgence

Dans ces situations, les conducteurs ne respectent pas les voies définies par le marquage au sol et occupent l'espace différemment. Il s'agit de situations comprenant un (ou des) véhicule(s) d'urgence (pompiers, police, ambulance, etc.). Contrairement au cas précédent, cette pratique est obligatoire et nous assistons à une coopération de la part des autres conducteurs qui se décalent. On peut considérer qu'une voie virtuelle émerge permettant ainsi le passage du véhicule prioritaire (figure 2.2).

## CHAPITRE 2. SIMULATION DE TRAFIC : OCCUPATION DE L'ESPACE ET REPRÉSENTATION DE L'ENVIRONNEMENT

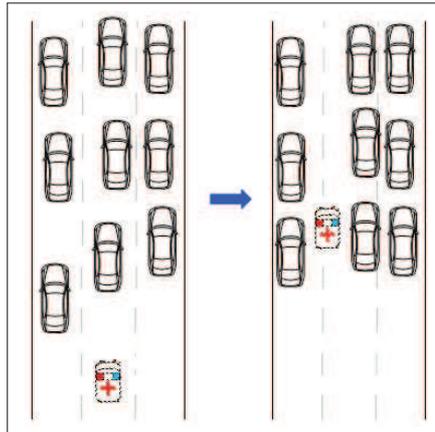


FIGURE 2.2: Cas d'un véhicule d'urgence

### 2.1.1.3 Cas des intersections

Nous observons aussi le même type de comportement au niveau des carrefours : soit juste avant l'intersection avec des mouvements de tourner à gauche et tourner à droite, soit à l'intérieur des carrefours dû notamment à l'absence de marquage à ces endroits. La situation illustrée par la figure 2.3 décrit la première situation. Nous avons un véhicule  $x$  lent qui va tourner à droite et un véhicule  $y$  lent qui va tourner à gauche. Par conséquent, le véhicule  $z$  se dirigeant tout droit se trouve gêné par les deux autres véhicules. Nous constatons, que pour ce type de configuration, le conducteur n'a pas forcément un comportement normatif. Il va plutôt chercher à débloquent sa situation en empruntant une voie « virtuelle » définie par l'espace disponible entre les deux véhicules d'autant plus que généralement le véhicule  $y$  aura tendance à se serrer vers la gauche et le véhicule  $x$  vers la droite.

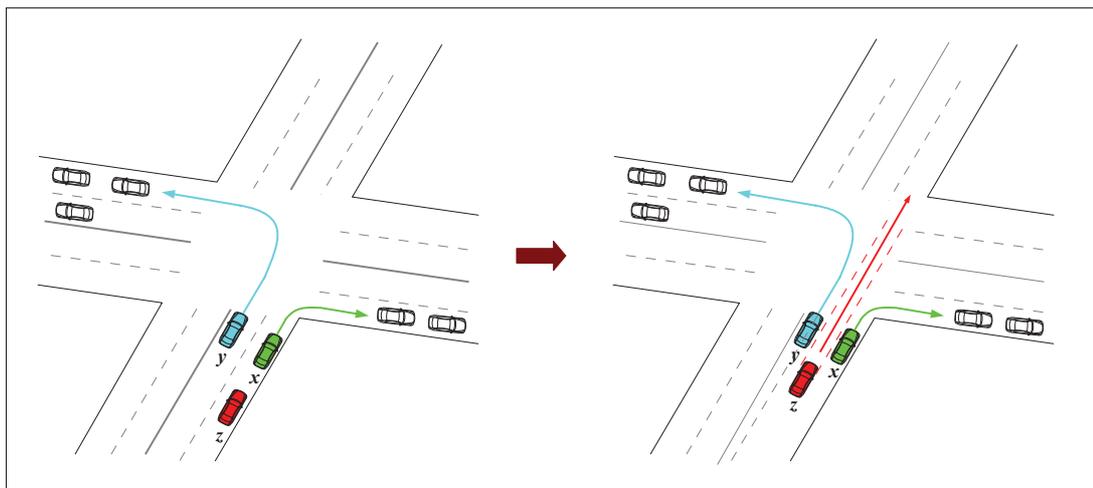


FIGURE 2.3: Positionnement des véhicules sur la chaussée : cas d'un carrefour

### 2.1.1.4 Comportement des deux-roues motorisés

En observant le cas particulier des deux-roues motorisés, nous pouvons constater que leur déplacement est différent des autres usagers de la route [Aupetit et Espié, 2012]. De part leur taille, les motos occupent l'espace routier différemment.

Les conducteurs des deux-roues motorisés ont des comportements non-normatifs car ils ne respectent pas strictement le Code de la Route. Ces comportements (faufilements et remontées de files) sont interdits par le Code de la Route (notamment par les articles R414-6 et R412-24). Les véhicules doivent rouler sur les files de circulation délimitées par le marquage au sol ou sur des voies spécialement dédiées à ce type de véhicule. Ces pratiques sont pourtant tolérées, notamment sur le périphérique parisien où le trafic est très important. Une charte<sup>5</sup> a d'ailleurs été signée pour informer les autres usagers sur les spécificités des deux-roues motorisés et pour donner des conseils sur les rapports piétons/deux-roues motorisés, cyclistes/deux-roues motorisés et voitures/deux-roues motorisés. Cette charte, signée par le maire de Paris et des associations de deux-roues motorisés le 19 mars 2007, décrit les règles de sécurité pour la circulation entre les files. Paris n'est pas la seule ville concernée par ce phénomène, dès que l'allure se réduit sur une route, on voit les deux-roues motorisés remonter les files de voitures. Il est à noter que la Belgique a choisi d'autoriser ce genre de pratiques pour les deux-roues motorisés.

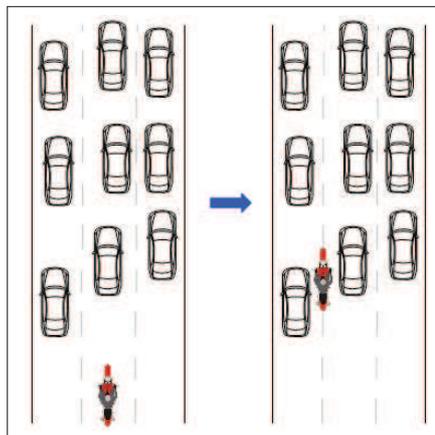


FIGURE 2.4: Positionnement des motos sur la chaussée

### 2.1.1.5 Enjeux et difficultés pour la simulation de ces pratiques

Les situations typiques précédentes mettent en évidence le fait que dans certains contextes, le conducteur opte pour des pratiques qui ne sont pas forcément conformes à la réglementation. Les

5. Charte des 2 roues motorisés à Paris qui peut être consultée à l'URL suivante : <http://www.paris.fr> (accessible en 2013)

## **CHAPITRE 2. SIMULATION DE TRAFIC : OCCUPATION DE L'ESPACE ET REPRÉSENTATION DE L'ENVIRONNEMENT**

---

pratiques pré-citées sont relatives à une réappropriation temporaire de l'espace routier. Il est à noter que cette réappropriation est parfois le résultat de coopération entre individus, les véhicules sur les voies adjacentes se serrant pour dégager de l'espace. C'est par exemple le cas lors de remontées de file par des véhicules d'urgence ou par des motos.

Simuler de manière correcte et réaliste les phénomènes d'occupation de l'espace est un problème difficile puisqu'il s'agit de reproduire les comportements individuels et hétérogènes des conducteurs humains permettant l'émergence d'une coordination entre les différents flux de trafic.

Cette problématique resituée dans un contexte multi-agent est extrêmement intéressante puisqu'elle fait ressortir différents types de difficultés :

- la prise en compte de l'hétérogénéité des comportements et la difficulté d'identifier l'ensemble des comportements possibles. Il s'agit notamment de permettre de rendre compte du possible non respect de certaines règles du code de la route et des normes sociales sous-jacentes,
- la prise en compte des particularités du contexte dans lequel se déroule le déplacement (géométrie des routes, équipements routiers dont signalisation horizontale et verticale),
- la prise en compte de l'hétérogénéité des véhicules utilisés par les usagers avec leurs capacités spécifiques (taille, accélération, etc.),
- la coordination des flux de trafic conflictuels et antagonistes dans un environnement fortement dynamique.

A notre sens, il est indispensable de pouvoir simuler les pratiques décrites dans les sections précédentes afin d'aboutir à des simulations qui s'approchent le plus possible de la réalité. Pour ce faire, nous devons disposer d'un modèle d'agent capable de générer des comportements qui s'adaptent à un contexte dynamique et qui soient cohérents avec les caractéristiques individuelles de l'agent : comportements normatif et non normatif. Il est de même indispensable d'envisager une représentation différente et propre à chaque conducteur pour une même configuration physique.

Nous établissons, dans la section suivante, un état de l'art des approches existantes qui se sont intéressées à la problématique de l'occupation de l'espace dans le cadre de la simulation du trafic routier. Nous verrons comment ces travaux ont intégré l'hétérogénéité des comportements au niveau de la modélisation.

### **2.1.2 Approches existantes pour étudier l'occupation de l'espace**

Nous commençons cette section par présenter les outils de simulation et voir comment ils ont traité la problématique de l'occupation de l'espace. Nous présentons ensuite les différentes approches existantes pour simuler le comportement de positionnement latéral du conducteur.

### 2.1.2.1 Outils de simulation de trafic

Il existe peu de travaux traitant de la problématique de l'occupation de l'espace telle que nous pouvons l'observer dans la réalité. La majorité des outils de simulation supposent que le positionnement des véhicules sur la chaussée est régi par les voies physiques définies par le marquage au sol et ce, quelle que soit la situation étudiée (PARAMICS [Paramics, 2007, Fellendorf et Vortisch, 2010, Sykes, 2010], AIMSUN [Barceló *et al.*, 2004, Casas *et al.*, 2010], SCANeR<sup>©</sup> II [Champion *et al.*, 1999, Lacroix *et al.*, 2009], SUMO<sup>6</sup> [Krajzewicz, 2010]).

Quelques outils ont intégré le comportement des deux-roues motorisés dans leur simulation. Nous sous-entendons, un comportement qui diffère des autres usagers de la route, en termes d'utilisation de l'espace. Par exemple, VISSIM [Fellendorf et Vortisch, 2010] intègre le comportement des deux-roues dans la modélisation en décrivant un mouvement latéral continu. Le deux-roues choisit la position latérale qui lui assure le temps maximal à une collision longitudinale. Afin de trouver cette position, le 2RM décompose la largeur de la route en voies virtuelles. Ces dernières sont construites à partir des bords droits et gauches des véhicules qui précèdent le véhicule en question sur la route en rajoutant une distance de sécurité latérale. Le choix de la position latérale cible est uniquement fondé sur une évaluation instantanée et n'intègre aucune anticipation de la situation routière. DynaTAIWAN [Hu *et al.*, 2007] prend également en compte les deux-roues motorisés qui se déplacent selon des relations macroscopiques de flux. Ce modèle [Hu *et al.*, 2007] utilise une métrique donnant un ratio d'équivalence entre une voiture et les autres moyens de transport (PCE ou « *Passenger Car Equivalent* »). Cette métrique mesure l'impact que peut avoir un mode de transport sur les variables de trafic telles que la densité, la vitesse, etc. Par exemple, les valeurs typiques de PCE sont de 1 pour une voiture et de 0,5 pour une moto. L'une des limites de cette approche consiste dans une définition uniforme de ce ratio d'équivalence alors qu'il devrait dépendre de la composition du trafic, de l'emplacement (intersection ou section courante), du degré de congestion, etc.

D'une manière générale, une grande partie des simulateurs commerciaux microscopiques de trafic est fondée sur des approches mathématiques prenant en compte un nombre restreint de paramètres. Ces approches sont donc limitées quand il s'agit de modéliser un comportement individuel. Elles prennent difficilement en compte l'hétérogénéité du trafic routier et la problématique de l'occupation dynamique de l'espace roulant. Les lois obtenues sont liées aux caractéristiques physiques du tronçon sur lequel ont été effectuées les mesures (longueur, nombre de voies, type de marquage au sol, réglementation).

Par ailleurs, dans le cadre de ces travaux, l'environnement est composé de routes, décomposées en voies physiques définies par le marquage au sol, d'éléments routiers (panneaux, feux), etc. L'environnement routier peut être décrit plus ou moins finement selon que la simulation ne s'intéresse qu'aux flux ou permet de s'intéresser à un véhicule. Cependant, les véhicules circulent sur des rails,

---

6. SUMO (Simulation of Urban MObility), Open source traffic simulator.

## CHAPITRE 2. SIMULATION DE TRAFIC : OCCUPATION DE L'ESPACE ET REPRÉSENTATION DE L'ENVIRONNEMENT

---

avec un rail par voie de circulation rendant les mouvements des véhicules très *rectilignes*, surtout lors de changement de voies où les véhicules se *téléportent* d'une voie à une autre.

D'autres simulations préconisent la variété des comportements en intégrant des comportements normatifs mais aussi des comportements qui violent la norme afin d'avoir des simulations plus réalistes. Cependant, la violation de la norme concerne le non respect des règles du code de la route. Ces travaux ne traitent pas des comportements non normatifs liés à l'occupation de l'espace [Lacroix *et al.*, 2009]. De tels environnements ne permettent pas de reproduire les phénomènes d'occupation de l'espace tels que nous pouvons les observer dans la réalité et plus particulièrement pour les deux-roues motorisés.

### 2.1.2.2 Approche par automates cellulaires

Des modèles utilisant des automates cellulaires ont été introduits pour répondre à la problématique de l'occupation de l'espace pour le cas particulier des deux-roues motorisés. A mi-chemin entre une approche mathématique et une approche comportementale, ces modèles consistent en une discrétisation de l'espace roulant sous forme d'une grille dont la taille des cellules peut varier suivant le niveau de détail désiré. Classiquement, le modèle d'automate cellulaire est appliqué à la simulation de flux homogène. Chaque cellule représente habituellement l'espace strictement nécessaire au véhicule. Afin de tenir compte de plusieurs types de véhicules dans un même modèle d'automate cellulaire, des tailles de parcelles non identiques sont désignées pour représenter différents modes de transport.

[Ahuja, 2001] a utilisé un automate cellulaire pour simuler un flux de trafic hétérogène. Les écarts avant, arrière et latéraux acceptés par chaque type de véhicule ont été mesurés et ajoutés à la taille du véhicule pour représenter l'espace routier effectivement occupé par ce dernier. La taille d'une cellule a été définie en fonction de la largeur de l'espace routier nécessaire pour les véhicules les plus petits, qui est de 0,606 m pour une bicyclette par exemple. A chaque type de véhicule a été attribué un certain nombre d'unités de cellules afin de refléter l'espace routier nécessaire. Ensuite, des règles de mouvement, de dépassement et d'arrêt ont été mises en place afin de définir les différents déplacements des véhicules. D'autres travaux [Lan et Chang, 2005, Lan et Hsu, 2006] ont utilisé les automates cellulaires pour décrire un trafic mixte contenant des deux-roues motorisés. Afin de traiter des situations avec plus d'un moyen de transport, ces modèles ont utilisé des tailles de cellules non identiques pour représenter différents moyens de transport,  $6 \times 2$  unités cellulaires pour une voiture et  $2 \times 1$  pour une moto. Chaque unité cellule représente  $1,25 \times 1,25 m^2$ . De plus, deux règles de déplacement ont été mises en place : la règle de mouvement vers l'avant décrivant l'accélération et la décélération des véhicules et la règle de changement de voie décrivant leur comportement de déplacement latéral. Enfin, ce modèle a été utilisé pour évaluer les effets de la largeur des voies et l'hétérogénéité du trafic sur le flux.

Bien que ces travaux [Lan et Chang, 2005, Lan et Hsu, 2006] tentent d'améliorer la finesse et le réalisme des simulations, l'approche par automates cellulaires est beaucoup trop simpliste surtout

## 2.1. OCCUPATION DE L'ESPACE ET SIMULATION DE TRAFIC ROUTIER

---

lorsqu'il s'agit de simulation de trafic hétérogène. Pour la simulation de trafic homogène, nous pouvons facilement établir un ensemble de règles de comportement intuitivement compréhensibles pour simuler le déplacement des véhicules. Cet outil de simulation est, dans ce cas, capable de produire des résultats étonnamment réalistes [Nagel *et al.*, 1996]. Cependant, lorsque nous appliquons les automates cellulaires à un trafic hétérogène, il est difficile d'avoir des résultats aussi pertinents que dans le cas précédent.

Dans ces modèles, la distance latérale entre les véhicules n'est pas prise en compte. Une telle modélisation présente des limites dans la mesure où la position latérale et l'écart latéral sont des facteurs cruciaux pour les manoeuvres de faufilement pour les deux-roues par exemple. Par conséquent, ces paramètres doivent être considérés dans la modélisation si nous voulons prendre en compte les phénomènes d'occupation de l'espace observés dans la réalité. Ces facteurs ont une influence sur la prise de décision des conducteurs pour une telle problématique. Une grille composée de cellules ne peut pas représenter correctement ces facteurs. Dans le monde réel, la trajectoire d'un deux-roues qui se faufile entre les files de véhicules se forme d'une manière dynamique à travers l'espace qui émerge entre les files. Un modèle fondé sur les automates cellulaires ne peut pas reproduire la différence subtile des largeurs des véhicules. Il est de ce fait tout à fait possible d'aboutir à une simulation non réaliste du comportement de faufilement des deux-roues.

En conclusion, les automates cellulaires présentent plusieurs avantages tels que la simplicité des règles permettant ainsi de traiter de grands systèmes. Cependant, [Spicher *et al.*, 2009] montrent que leur expressivité est limitée et souvent mal adaptée à tous les types de situations, en particulier lorsque des entités indépendantes se déplacent dans un espace dynamique.

### 2.1.2.3 Approche comportementale multi-agent et positionnement latéral

Les modèles de simulation fondés sur l'approche comportementale s'appuient sur les travaux en psychologie de la conduite. Ces derniers analysent le comportement individuel des conducteurs et leurs pratiques et cherchent à mieux comprendre les motifs sous-jacents à leurs prises de décision [Saad, 1992]. L'hétérogénéité des comportements, pour les différents contextes étudiés, permet de faire émerger le comportement des flots de trafic et ce pour des situations pouvant être complexes [Espié, 2004]. Dans ce cadre, les modèles de simulation fondés sur les SMA offrent la possibilité de simuler les acteurs du système de trafic par des agents autonomes et leurs interactions, et ce de manière plus réaliste car prenant en compte les contextes des prises de décision [Espié, 1995, Burmeister *et al.*, 1997, Bazzan *et al.*, 1999, Bazzan, 2005, Doniec *et al.*, 2007].

Dans la simulation du trafic routier, en plus du déplacement longitudinal, nous retrouvons le déplacement latéral qui s'effectue en général au travers des mécanismes de changement de voies. Un tel comportement se produit en deux étapes : le processus de sélection de la voie et le processus de mise en oeuvre effective du changement de voie. Ces deux processus sont modélisés à l'aide des modèles de sélection de voie et les modèles d'insertion ou recherche de créneau.

## CHAPITRE 2. SIMULATION DE TRAFIC : OCCUPATION DE L'ESPACE ET REPRÉSENTATION DE L'ENVIRONNEMENT

---

Le mécanisme de choix de la voie est modélisé en fonction de la motivation des conducteurs à vouloir changer de voie. Les différents motifs conduisant un conducteur à vouloir changer de voie peuvent aboutir à des spécifications différentes des modèles de sélection. Par exemple, les conditions de circulation sur la voie courante ne sont pas satisfaisantes, la voie cible offre de meilleures conditions ou la voie cible est proche d'une sortie imminente. Ces variables qui influent sur la raison du changement de voie peuvent être divisées en quatre catégories : le type du véhicule en question, les conditions de conduite sur la voie cible, les conditions de conduite sur la voie courante, la destination du conducteur.

Outres les motifs qui amènent les conducteurs à vouloir changer de voie, nous nous intéressons aussi aux différents types de modèles qui permettent d'effectuer le choix entre les voies possibles. Les modèles de sélection de voie peuvent être divisés en deux groupes en fonction de la technique utilisée pour effectuer le choix : les modèles à base de règles et les modèles fondés sur les fonctions d'utilité.

Le premier type de modèles utilise un ensemble de règles pour décrire le mécanisme de choix de la voie [Hidas, 2002, Dai et Li, 2010]. [Hidas, 2002] présente un modèle de changement de voie et d'insertion qui intègre des procédures de changement de voie « forcé » et « coopératif ». L'algorithme de changement de voie forcé est fondé sur le concept de « courtoisie » du conducteur. [Dai et Li, 2010] proposent un modèle de changement de voie en définissant des règles de sécurité et d'incitation. Ainsi, les règles tentent de déterminer si la situation est meilleure sur la voie cible et si des critères de sécurité tels que par exemple la distance de sécurité sont satisfaits.

Le deuxième type de modèles utilise des fonctions d'utilité afin d'évaluer le choix d'une voie. [Kesting *et al.*, 2009] modélisent le mécanisme de changement de voies à travers une fonction d'utilité qui évalue l'utilité espérée sur la voie cible. Le critère de l'utilité est donné par la différence des accélérations avant et après le changement de voies. C'est l'idée de base de l'algorithme MOBIL [Kesting *et al.*, 2007] qui est fondé sur l'avantage et le désavantage espérés sur la nouvelle voie en termes de différence dans l'accélération qui est calculée avec un modèle longitudinal sous-jacent de trafic microscopique. Pour la décision de changer de voie, les auteurs prennent en compte deux critères : un critère de sécurité et un critère d'incitation. Ils prennent aussi en compte un « facteur de politesse » afin de modéliser les comportements d'égoïsme et de courtoisie des conducteurs.

Les travaux de [El Hadouaj, 2004] s'inscrivent dans le cadre d'une simulation de trafic utilisant l'outil ArchiSim. Ces travaux sont présentés en détail dans la suite du chapitre. Les modèles sous-jacents sont fondés sur les résultats d'études en psychologie de la conduite. Ces études s'appuient sur une analyse approfondie du comportement du conducteur en situations réelles de conduite. Leurs objectifs est d'identifier les connaissances et les motifs qui sous tendent le mécanisme de décision chez le conducteur. Le résultat de ces analyses est formalisé sous forme de règles générales qui expliquent le mécanisme de décision chez le conducteur. Une simulation de trafic dans ArchiSim est fondée sur les règles de comportement individuel des conducteurs telles qu'elles sont mises en évidence par les travaux de psychologues. Les règles de décision utilisées sont simples. Pour décider du changement

## 2.1. OCCUPATION DE L'ESPACE ET SIMULATION DE TRAFIC ROUTIER

---

de voie, l'agent conducteur commence par estimer la durée de l'interaction qu'il subit. Si la durée est courte (par exemple le véhicule gênant met son clignotant), l'agent conducteur décide de s'adapter et de rester sur sa voie. Dans le cas contraire, il associe à chacune des voies (tout droit, gauche, droite) un gain qu'il calcule par le biais d'une fonction d'évaluation. Cette fonction a pour paramètres les caractéristiques (vitesse et stabilité) des zones proches, très proches et lointaines. La voie sur laquelle le conducteur décidera d'aller est celle qui a obtenu la valeur de gain la plus élevée. Le calcul de gain revient à un calcul d'utilité. Le choix de la voie qui a la valeur de gain la plus élevée, signifie que l'agent conducteur choisit la voie qui lui convient le mieux en termes de vitesse et de stabilité. Ce modèle utilise des règles pour décider du changement de voies et une fonction d'utilité pour le choix de la voie. Dans la suite de ce chapitre, nous détaillons les travaux de [El Hadouaj, 2004] en termes de représentation de l'environnement de l'agent.

Dans les travaux pré-cités, les voies considérées correspondent aux voies physiques définies par le marquage au sol. Les conducteurs occupent l'espace en se référant uniquement à ces voies et se positionnent toujours au milieu de celles-ci. Dans ce cadre, la représentation que se fait le conducteur de son environnement correspond à cette configuration physique et elle est la même pour tous les usagers quelles que soit leurs caractéristiques physiques, individuelles ou leur type. Cette modélisation de l'environnement ne permet pas de reproduire les phénomènes d'occupation de l'espace auxquels nous nous intéressons et produit de ce fait des simulations qui ne correspondent pas forcément à ce que l'on peut observer dans la réalité.

Il y a eu très peu de travaux qui se sont intéressés à la problématique de l'occupation de l'espace telle que nous pouvons l'observer dans certaines situations ou pour un certain type d'usagers. [Lee *et al.*, 2009] et [Bonte *et al.*, 2006] ont proposé des modélisations pour le cas particulier des deux-roues motorisés et ont essayé d'intégrer les spécificités de ces derniers en termes de déplacement et de positionnement sur la chaussée. Les travaux de [Bonte *et al.*, 2006] ont été développés dans le cadre de la simulation de trafic ArchiSim et seront détaillés dans la section suivante. [Lee *et al.*, 2009] s'appuient sur une modélisation mathématique des règles d'interaction. Ils ont utilisé le modèle de poursuite (« *car-following* ») de Gipps [Gipps, 1981] pour décrire aussi bien le déplacement des voitures que celui des deux-roues motorisés (2RM) avec quelques ajustements pour prendre en compte les paramètres cinématiques des 2RM et permettre un positionnement latéral plus adéquat. Ces modèles ont par la suite été intégrés dans un modèle de simulation à base d'agents. Les auteurs évoquent le concept des voies virtuelles sans les modéliser explicitement. La modélisation proposée par [Lee *et al.*, 2009] reste tout de même une solution non générique développée uniquement pour un type particulier d'utilisateur et par conséquent ne peut pas s'appliquer dans d'autres situations notamment des situations de blocage liées à un événement particulier, pour les gares de péages, etc. De plus, leur modèle est fondé sur le modèle de déplacement de [Gipps, 1981] qui correspond à une modélisation mathématique du comportement et qui ne permet pas de prendre en compte un nombre élevé de paramètres des conducteurs et permettre ainsi une modélisation fine et contextuelle du comportement individuel des agents.

## CHAPITRE 2. SIMULATION DE TRAFIC : OCCUPATION DE L'ESPACE ET REPRÉSENTATION DE L'ENVIRONNEMENT

---

### 2.1.3 Synthèse

Dans cette section, nous avons tout d'abord illustré quelques pratiques d'occupation de l'espace observées dans la réalité. Nous avons ensuite dressé un état de l'art des modèles de simulation existants afin d'identifier comment ils traitent cette problématique.

La grande majorité de ces travaux considère que les conducteurs simulés se déplacent en suivant les voies physiques définies par le marquage au sol. Par conséquent, ces modèles ne permettent pas de reproduire des situations telles que celles que nous avons présentées au début de cette section. Pourtant ces situations correspondent bel et bien à des pratiques que nous pouvons observer tous les jours sur les routes, encore plus dans certains pays.

Très peu de travaux se sont intéressés à cette problématique. [Bonte *et al.*, 2006, Lee *et al.*, 2009] ont proposé des modélisations pour prendre en compte le comportement des deux-roues motorisés dans la simulation. Ces travaux s'adressent à un type particulier de conducteurs et ne peuvent donc pas être appliqués à d'autres situations.

Afin de proposer une solution générique qui prend en compte les pratiques des conducteurs en termes d'occupation de l'espace, nous nous sommes intéressés à la manière avec laquelle un conducteur se représente l'environnement autour de lui avant de prendre sa décision. Nous avons présenté brièvement les travaux de [El Hadouaj, 2004] et de [Bonte *et al.*, 2006] en termes de l'occupation de l'espace, nous détaillons dans la section suivante ces deux modèles du point de vue de la représentation de l'environnement par l'agent.

Nous soutenons que la problématique d'occupation de l'espace au sol est avant tout une problématique liée à la représentation de l'environnement. La section suivante est consacrée à cet aspect. Avant de se représenter l'environnement un conducteur humain perçoit ce dernier. Nous commençons par présenter brièvement la perception du point de vue de la psychologie, nous nous intéressons ensuite à la représentation que se construit un conducteur de son environnement.

## 2.2 Représentation de l'environnement par l'agent conducteur

Avant de pouvoir prendre une décision et agir, un agent perçoit les différentes entités présentes dans son environnement. Avant de s'intéresser à la représentation que se construit l'agent de son environnement, nous présentons brièvement la notion de perception du point de vue de la psychologie. Nous présentons ensuite brièvement les travaux en SMA qui se sont intéressés à la perception des agents autonomes.

## 2.2. REPRÉSENTATION DE L'ENVIRONNEMENT PAR L'AGENT CONDUCTEUR

---

### 2.2.1 Perception en psychologie cognitive

Nous trouvons plusieurs définitions de la perception dans la littérature, nous pouvons citer celle de [Gimenez, 1997] : « la perception est un mode de représentation de l'environnement, ainsi qu'un mode de connaissance ; elle se déroule dans l'instant en utilisant des capteurs sensoriels ; c'est finalement une connaissance immédiate d'origine sensorielle ».

Nous pouvons aussi donner la définition suivante de la perception qui revient souvent dans les travaux de la perception en psychologie : « Ensemble des mécanismes de traitement des informations sensorielles extéroceptives et proprioceptives qui permet à un organisme vivant d'agir de manière adaptée dans son environnement (survie et adaptation) et d'acquérir des connaissances sur cet environnement. »

Plusieurs approches de la perception existent dans la littérature mais nous n'allons pas détailler toutes ces approches dans cette thèse (le béhaviorisme, la théorie de la Gestalt, le constructivisme, la théorie écologique, l'approche cognitive, etc.). Nous pouvons dire que deux fonctions aux mécanismes séparés ressortent des différentes définitions et travaux sur la perception : la perception pour l'action et la perception pour la connaissance.

Ces deux types de perception s'inscrivent dans le cadre de deux grandes approches. La perception pour la connaissance correspond à l'approche indirecte, appelée aussi l'approche constructiviste. Elle postule que la perception des objets dépend fortement des processus mentaux descendants (*top-down*), c'est-à-dire ayant pour finalité d'apporter une signification aux percepts en effectuant une comparaison avec les éléments contenus en mémoire à long terme [Bruner, 1957, Gregory, 1972].

Par ailleurs, la perception pour l'action s'inscrit dans le cadre de la perception directe. La théorie de l'approche directe a été largement mise en avant par les travaux de Gibson [Gibson, 1966, Gibson, 1979] et elle fait partie de la théorie écologique. Cette dernière considère la perception comme une « conduite » adaptative permettant au sujet de s'adapter à son environnement. L'action est dans ce sens une réponse cohérente à la modification du contexte, la perception n'a de sens qu'en relation avec une action. [Gibson, 1979] définit le concept d'affordance comme étant les possibilités d'action vis-à-vis des objets et des surfaces de l'environnement. Pour cette approche, la reconnaissance des objets dépend essentiellement des processus ascendants (*bottom-up*), c'est-à-dire ayant pour fonction d'intégrer directement les percepts en mémoire à long terme.

Bien que jouant un rôle fondamental dans la théorie de Gibson, il est à noter que le concept de perception directe n'a jamais fait l'objet d'une définition explicite de la part du chercheur. Ce n'est que dans l'interprétation des idées de Gibson par ses disciples que nous pouvons trouver sa définition. Alors que certains chercheurs restent fidèles à la vision de Gibson du concept et ne l'appliquent qu'aux caractéristiques visibles des objets [Greeno, 1994, Turvey *et al.*, 1999], d'autres n'ont pas hésité à soutenir que les affordances peuvent résulter de l'interprétation mentale des choses et peuvent donc être construites de manière inférentielle [Tucker et Ellis, 1998, Norman, 1999].

## CHAPITRE 2. SIMULATION DE TRAFIC : OCCUPATION DE L'ESPACE ET REPRÉSENTATION DE L'ENVIRONNEMENT

---

[Leonova, 2004] présente un certain nombre d'arguments en faveur de l'extension des affordances dans le domaine de la cognition. Le premier argument présenté est fourni par Gibson lui-même qui prône la continuité entre la perception et la cognition : « Percevoir l'environnement et le concevoir sont des processus différents en degrés mais non pas en nature. L'un est la continuation de l'autre. Le fait de connaître est l'extension du fait de percevoir » [Gibson, 1979]. Par la suite, d'autres chercheurs ont développé leurs visions de la cognition dans le cadre de l'approche écologique [Vera et Simon, 1993, Duchon *et al.*, 1998, Norman, 1999, MacDorman, 2000, Raubal, 2001]. Ces travaux considèrent que cette approche de l'acquisition de la connaissance permet d'envisager, d'une part, l'extraction directe des affordances au niveau perceptif, et, de l'autre, l'inférence des possibilités d'action quand il s'agit de la connaissance symbolique.

En bref, sans formuler les fondements théoriques de la transposition du concept d'affordance dans le domaine de la cognition, les chercheurs en sciences cognitives utilisent et opérationnalisent dans leurs travaux le concept des affordances inférées.

Par ailleurs, les notions d'attention et de mémoire sont aussi traitées en psychologie cognitive de la perception. Ces aspects ne seront pas détaillés dans ce chapitre, ils ne font pas partie des objectifs établis de la thèse.

Pour résumer, dans cette partie nous avons présenté les différentes approches traitant de la perception en psychologie. Nous nous sommes focalisés sur les deux grandes approches à savoir la théorie de la perception directe et celle de la perception indirecte. Nous avons présenté le point de vue qui soutient la nécessité d'extension du concept d'affordance sur le champ de la cognition. [Leonova, 2004] démontre, avec des références aux écrits de Gibson et aux travaux actuels en sciences cognitives, que théoriquement il n'y a pas d'incompatibilité entre le concept d'affordance et la cognition. De plus, les références au concept d'affordance dans les recherches en sciences cognitives sont de plus en plus fréquentes. Tous ces arguments nous conduisent à soutenir que cette notion reste résolument moderne et applicable en matière de la cognition.

### 2.2.2 Perception en SMA

De nombreux travaux traitent des mécanismes de perception et se focalisent sur les différentes fonctions d'attention et de mémoire. Ces aspects sont certes très importants notamment lorsqu'il s'agit de modéliser et de simuler les comportements des Humains. Cependant, les problématiques liées aux focus d'attention et à la mémoire limitée correspondent à des sujets de recherche à part entière et ne font pas partie des objectifs de notre thèse.

Dans le cadre de notre modèle, les agents peuvent percevoir les autres entités dans l'environnement à une distance de vision. Nous pouvons considérer qu'il existe un premier filtre correspondant à un filtre de proximité. Par ailleurs, afin de prendre en compte la complexité des traitements et la limitation de ressources, mais de manière implicite, nous considérons une perception orientée vers l'action.

## 2.2. REPRÉSENTATION DE L'ENVIRONNEMENT PAR L'AGENT CONDUCTEUR

Les travaux qui peuvent se rapprocher le plus de notre problématique, sur le plan de la perception et le traitement des informations perçues, sont les travaux sur la perception active. Cette dernière joue un rôle essentiel dans la prise de conscience de la situation (« *situation awareness* »). C'est un moyen important de diriger une attention limitée d'un agent vers les aspects pertinents de l'environnement d'une manière proactive.

Dans les SMA, [Weyns *et al.*, 2004] proposent un modèle générique pour la perception active. La perception est orientée par les objectifs de l'agent. Elle permet dans ce sens à l'agent de percevoir ce qui lui est nécessaire selon ses buts. Il s'agit de décomposer la perception en plusieurs niveaux sous forme de processus, de l'obtention des données jusqu'à leur représentation symbolique. Le processus est donc découpé en plusieurs étapes, illustrées par la figure 2.5.

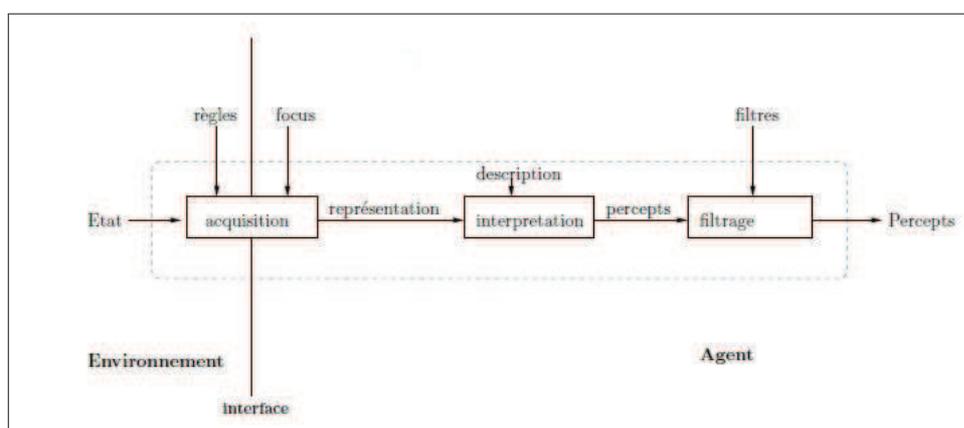


FIGURE 2.5: Modèle de perception active [Weyns *et al.*, 2004]

L'agent décide d'une action de perception par la mise en oeuvre d'un focus d'attention. Cette perception est contrainte au niveau de l'environnement par les capacités des capteurs et les règles de l'environnement. Le résultat de la perception correspond à un ensemble de données brutes. Ces données sont par la suite interprétées pour être utilisables dans le raisonnement de l'agent. Elles sont ainsi transformées en données symboliques de haut niveau. Enfin, l'agent filtre les informations de façon à sélectionner les données dont il a besoin.

L'étape de filtrage est ici internalisée au niveau de l'agent, ce qui lui permet d'effectuer tous les traitements et la sélection de façon autonome. Dans la même logique, dans l'architecture proposée par [Weyns *et al.*, 2004], un premier filtrage (par foci) est réalisé par l'environnement au moment de la demande de perception. Le filtrage détermine les données du contexte qui sont accessibles à l'agent, de façon à respecter les règles de l'environnement. L'avantage de ce processus de filtrage partagé entre l'agent et l'environnement est que le contrôle est assuré et l'autonomie de l'agent est garantie.

Dans le cadre de la simulation de trafic, l'agent ne peut pas traiter toutes les informations présentes dans son environnement. Ceci s'explique par plusieurs raisons, notamment la capacité limitée des

## CHAPITRE 2. SIMULATION DE TRAFIC : OCCUPATION DE L'ESPACE ET REPRÉSENTATION DE L'ENVIRONNEMENT

---

humains à traiter un nombre élevé d'informations mais aussi la sélection inconsciente que peut faire un conducteur pour des raisons de saillance ou d'attention [Ketenci, 2013]. Dans notre cadre applicatif, les agents passent aussi par une phase d'interprétation et de représentation de l'environnement tout en effectuant un filtrage sur les informations brutes acquises à partir de l'environnement.

Nous présentons dans la section suivante, la notion de représentation de l'environnement et les approches en simulation de trafic qui ont intégré une représentation mentale de l'environnement dans la modélisation de l'agent.

### 2.2.3 Représentation mentale de l'environnement

Après avoir perçu son environnement, un agent se construit une représentation mentale de son environnement afin de permettre la prise de décision.

#### 2.2.3.1 Représentation spatiale allo-centrée vs. ego-centrée

La notion de représentation de l'environnement a été beaucoup étudiée dans la robotique et dans des problématiques liées à la navigation d'agents autonomes. En termes de représentation de l'environnement, nous trouvons dans la littérature deux théories : les représentations allo-centrées et ego-centrées [Wang *et al.*, 2005, Cohn et Renz, 2008]. Dans les représentations ego-centrées, les relations spatiales sont généralement directement liées à l'agent qui se construit une représentation en utilisant un système de référence avec des termes tels que, par exemple, à gauche, à droite, en face, ou derrière. Quand le contexte change, toutes les relations spatiales doivent être mises à jour. Par ailleurs, une représentation allo-centrée positionne les points dans un cadre de référence externe à celui qui se construit la représentation et indépendamment de sa position courante. Les représentations allo-centrées sont plus stables, mais sont plus difficiles à acquérir. En plus, le nombre des relations spatiales considérées est beaucoup plus élevé puisqu'il faut prendre en compte toutes les relations entre les différents objets de l'environnement. Dans une représentation ego-centrée, le nombre de ces relations peut être nettement moins important. La figure 2.6 illustre les deux types de représentation, la partie gauche de la figure correspond à une représentation allo-centrée où toutes les relations entre les différentes entités de l'environnement sont identifiées. La partie droite de la figure correspond à une représentation ego-centrée, les entités sont plutôt représentées par rapport à l'agent qui se construit la représentation.

Nous présentons dans les sections suivantes, les différentes représentations de l'environnement utilisées dans la simulation de trafic.

## 2.2. REPRÉSENTATION DE L'ENVIRONNEMENT PAR L'AGENT CONDUCTEUR

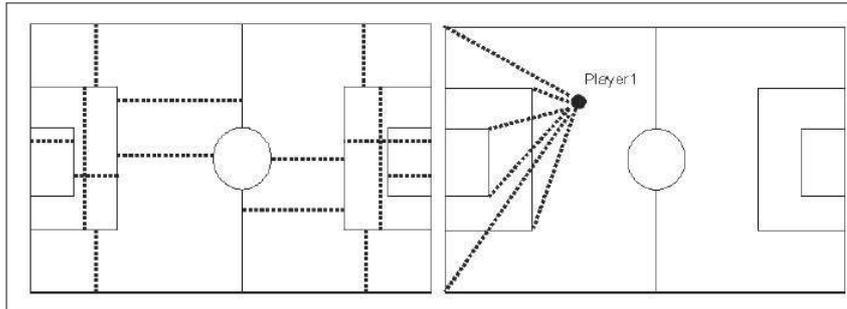


FIGURE 2.6: Relations spatiales allo-centrées vs. ego-centrées [Wagner et Hübner, 2005]

### 2.2.3.2 Approche de El Hadouaj

Dans le cadre de la simulation de trafic, les agents conducteurs se construisent généralement une représentation de l'environnement qui correspond, dans la plupart des cas, à la configuration physique de la route donnée par le marquage au sol. De ce fait, les agents se représentent l'environnement sous forme de routes composées de voies délimitées par le marquage.

Dans ce cadre applicatif, la représentation qui est généralement utilisée correspond à une représentation spatiale ego-centrée autour de l'agent. Certains travaux, représentent tout l'environnement autour de l'agent, d'autres se limitent uniquement aux voies adjacentes. Afin de mieux représenter l'environnement au niveau de l'agent, il est primordial de comprendre le comportement du conducteur réel et les motifs sous-jacents à sa prise de décision. Très peu de travaux en psychologie de la conduite ont effectué des études détaillées sur les comportements individuels et les motifs décisionnels des conducteurs. Nous pouvons citer toutefois les travaux de [Saad et Schnetzler, 1994] qui se sont focalisés, entre autres, sur la manière avec laquelle un conducteur réel se représente l'environnement autour de lui. Les auteurs considèrent que l'espace entourant le véhicule constitue le champ de contrôle du conducteur, et qu'il peut être décomposé en plusieurs secteurs, distingués selon leur localisation (avants, arrières, latéraux gauche, latéraux droite) et leur proximité (très proche, proche, lointain, très lointain). Dans le modèle proposé par [Saad et Schnetzler, 1994], seules les zones situées sur la voie courante du véhicule, celles situées sur la voie immédiatement à droite et celles qui couvrent la voie immédiatement à gauche ont été mentionnées.

[El Hadouaj, 2004] s'est appuyée sur les travaux de F. Saad et a extrapolé ce raisonnement en ajoutant des zones qui couvrent les voies non immédiatement adjacentes, à droite et à gauche, afin de prendre en compte l'état du trafic sur ces voies et permettre la levée de situations de blocage pour des autoroutes à plus de trois voies de circulation (figure 2.7). Pour résumer, la représentation que se construit l'agent de son environnement est composée d'au maximum 5 voies : la voie courante de l'agent, deux voies adjacentes à gauche et deux voies adjacentes à droite. Dans cette représentation, toutes les voies sont des voies physiques définies par le marquage au sol. Elle ne permet donc pas de reproduire les comportements en termes d'occupation de l'espace que nous pouvons observer dans la réalité, notamment pour le cas particulier des deux-roues motorisés.

## CHAPITRE 2. SIMULATION DE TRAFIC : OCCUPATION DE L'ESPACE ET REPRÉSENTATION DE L'ENVIRONNEMENT

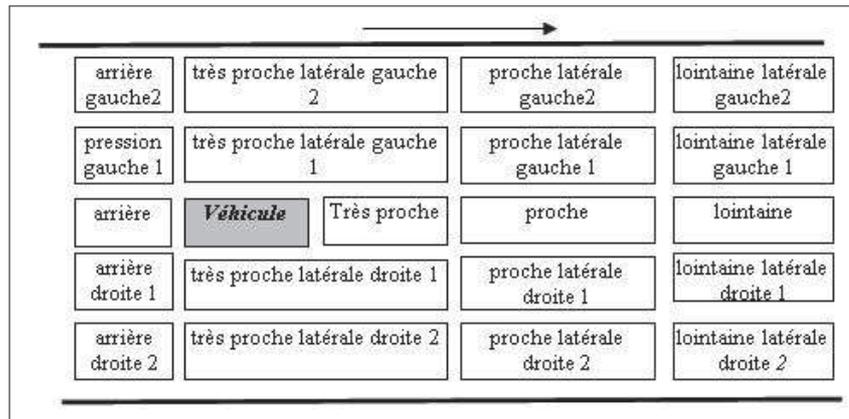


FIGURE 2.7: Zones de contrôle d'un conducteur simulé (d'après [El Hadouaj, 2004])

### 2.2.3.3 Déplacement spécifique des deux-roues

Les chercheurs commencent à s'intéresser de plus en plus aux comportements de déplacement des deux-roues motorisés, notamment du fait de l'importance croissante de ce mode. Malheureusement cet intérêt est assez récent et nous ne disposons donc pas d'assez d'études pour comprendre les comportements et pour avoir des données réelles exploitables pour la simulation. D'une manière générale, pour une même situation, pour se déplacer sur une route congestionnée par exemple, les automobilistes doivent prendre leur mal en patience ou essayer de changer de file pour aller à celle où ça avance le mieux, alors que les motocyclistes remontent les files.

Les travaux de [Minh *et al.*, 2005a, Minh *et al.*, 2005b] fournissent des informations concernant les dépassements et le comportement des deux-roues motorisés. Cependant aucune règle, dictant les déplacements ni comment ces usagers se représentent l'environnement routier, n'a été spécifiée. Les auteurs présentent une étude effectuée à Hanoï où les 2RM représentent 80% de la totalité des moyens de transport.

[Minh *et al.*, 2005a] utilisent une métrique donnant un ratio d'équivalence entre un 2RM et les autres moyens de transport (MCU ou « *motorcycle unit* ») afin de déterminer l'occupation de l'espace du véhicule en question. Les auteurs énoncent l'idée de découper la route en fonction de la largeur du véhicule. Cependant, les couloirs ne sont que des découpages fixes (donc de même largeur) des voies définies par le marquage de la route. Dans la suite de la réflexion faite dans [Minh *et al.*, 2005b], il est possible de considérer deux décompositions de la chaussée selon le point de vue des deux-roues motorisés. La figure 2.8 illustre ces décompositions. Le schéma de gauche de cette figure décrit une situation routière avec une route à trois voies. Les deux schémas de droite décrivent les deux décompositions possibles en suivant la même logique présentée dans [Minh *et al.*, 2005b]. Dans les deux cas, le découpage se fait selon la taille du deux-roues motorisés. La première possibilité correspond à un découpage de chaque voie physique de circulation en sous-voies virtuelles ayant la largeur du deux-roues (figure 2.8(b)). La deuxième possibilité correspond à un découpage de la route en sous-

## 2.2. REPRÉSENTATION DE L'ENVIRONNEMENT PAR L'AGENT CONDUCTEUR

voies virtuelles, de la taille du deux-roues, centrées sur ce dernier (figure 2.8(c)). La première solution (figure 2.8(b)) peut offrir une solution aux simulations utilisant un rail pour chaque voie de circulation. Cependant, ces possibilités de décomposition de l'environnement proposent des solutions rigides, statiques et qui sont construites *a priori*. Elles ne prennent pas en compte l'occupation de la chaussée par les autres véhicules. Les véhicules roulent, donc l'occupation change et l'espace libre également. La définition de l'espace libre doit être dynamique pour que ces changements soient pris en considération.

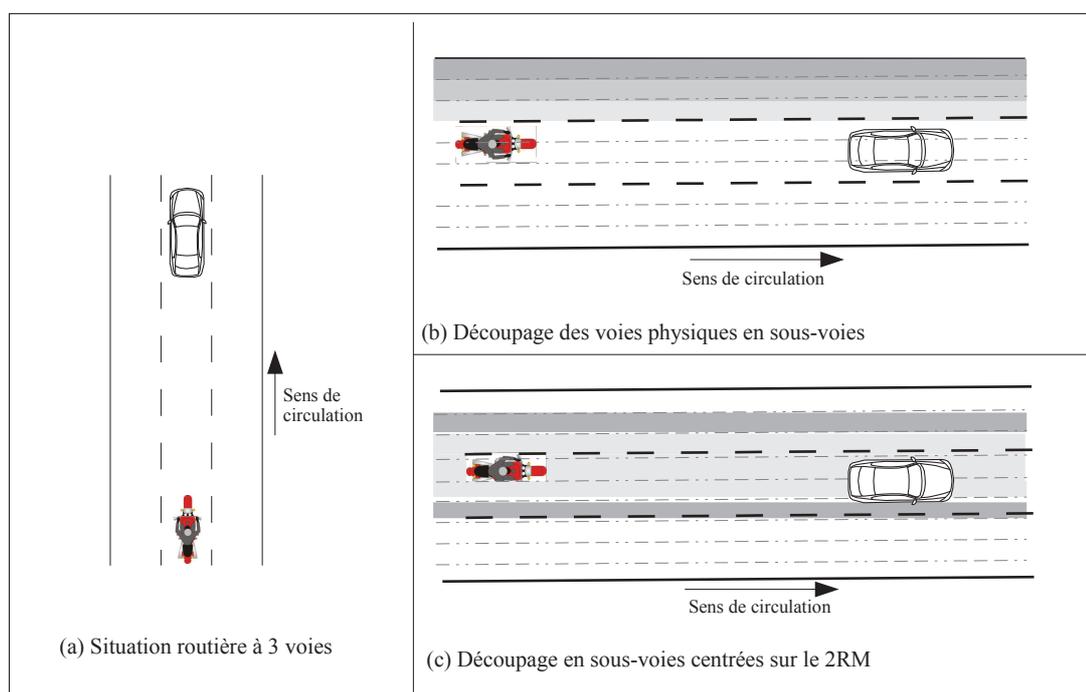


FIGURE 2.8: Possibilités de structuration de la route illustrée en (a) : (b) Route découpée en sous-voies pour les deux-roues : une voie de circulation correspond à trois voies pour les deux-roues. (c) Route structurée d'une manière centrée autour du deux-roues en voies de la largeur du deux-roues.

Les possibilités de décomposition de l'environnement vues dans la section précédente proposent des solutions statiques ne prenant pas le contexte routier en compte. Nous présentons dans la section suivante, une autre méthode de décomposer l'environnement prenant en compte le contexte routier [Bonte *et al.*, 2006].

### 2.2.3.4 Approche de Bonte et al.

Pour pallier une décomposition statique indépendante de la situation routière, [Bonte *et al.*, 2006] proposent une autre manière de considérer l'espace roulant. Ils proposent une approche permettant la simulation des deux-roues motorisés dans le cadre de la simulation de trafic ArchiSim. Des travaux

## CHAPITRE 2. SIMULATION DE TRAFIC : OCCUPATION DE L'ESPACE ET REPRÉSENTATION DE L'ENVIRONNEMENT

---

précédents [Müller, 2002], dans le cadre d'ArchiSim, avaient exploré la manière dont les véhicules occupaient l'espace au niveau des carrefours. Dans ces travaux, les mobiles ne respectaient pas la structuration de la chaussée en files délimitées mais créaient des files supplémentaires par exemple des files de tourne-à-gauche. Dans le cadre de ces travaux, les voies délimitées par le marquage sont appelées des « voies physiques » et les voies créées par les mobiles sont appelées « voies virtuelles ». Elles sont désignées par le mot « virtuelles » car elles n'existent pas physiquement sur la route, elles ne sont pas considérées par le Code de la Route en tant que voie de circulation. L'idée proposée par [Bonte *et al.*, 2006] est de décliner ce concept de voies virtuelles pour le déplacement des deux-roues motorisés. Les auteurs considèrent que les véhicules peuvent se déplacer sur la totalité de la route. En effet, les simulations où les véhicules ne se déplacent qu'au milieu de leur voie ne permettent pas aux deux-roues de se déplacer entre les véhicules. [Bonte *et al.*, 2006] donnent la définition suivante d'une voie virtuelle :

« Un couloir de circulation construit grâce aux bords de la route et/ou aux bords des véhicules présents dans le champ de vision de l'acteur. »

Le calcul des voies se fait en prenant en compte les véhicules se trouvant dans le champ de vision de l'agent. Les voies sont définies en mesurant les espaces libres sur la route en fonction des positions des véhicules et leur largeur. L'algorithme de découpage de l'espace roulant permet d'obtenir un découpage de la route en bandes libres et bandes occupées. Cela se traduit par deux types de voies virtuelles : des voies virtuelles interdites et des voies virtuelles autorisées. Elles ne sont pas interdites ou autorisées au sens du Code de la Route mais plutôt au sens des contraintes physiques pour le déplacement du deux-roues. Une voie interdite est une voie virtuelle qu'un deux-roues doit éviter d'emprunter. Ces voies sont définies grâce à la présence des véhicules. Au contraire, une voie autorisée est une voie virtuelle qu'un deux-roues peut emprunter. Ces voies sont définies grâce à l'espace libre sur la route.

Les auteurs définissent également  $D(x)$  et  $G(x)$  des fonctions qui donnent les positions des bords droit et gauche pour le véhicule  $x$ . Pour les bords de route,  $D(route)$  (resp.  $G(route)$ ) est utilisé pour le bord droit (resp. pour le bord gauche). Par exemple sur la figure 2.9, la voie  $[G(b); D(c)]$  est définie par rapport au bord gauche du véhicule  $b$  et au bord droit du véhicule  $c$ .

Après le calcul des voies virtuelles, ces dernières sont triées car il est possible qu'une voie virtuelle autorisée soit de largeur insuffisante (dans le cas d'une voiture proche d'un bord de route). Cette voie passera donc en voie interdite.

Par ailleurs, les auteurs adoptent aussi la décomposition de l'environnement en zones proposée par [El Hadouaj *et al.*, 2000]. Cette décomposition permet d'organiser les informations perçues de l'environnement selon leur localisation (avant, arrière, latéraux gauche, latéraux droite) et leur proximité (très proche, proche, lointain, très lointain). Cette décomposition se fait sur la base des voies virtuelles identifiées.

## 2.2. REPRÉSENTATION DE L'ENVIRONNEMENT PAR L'AGENT CONDUCTEUR

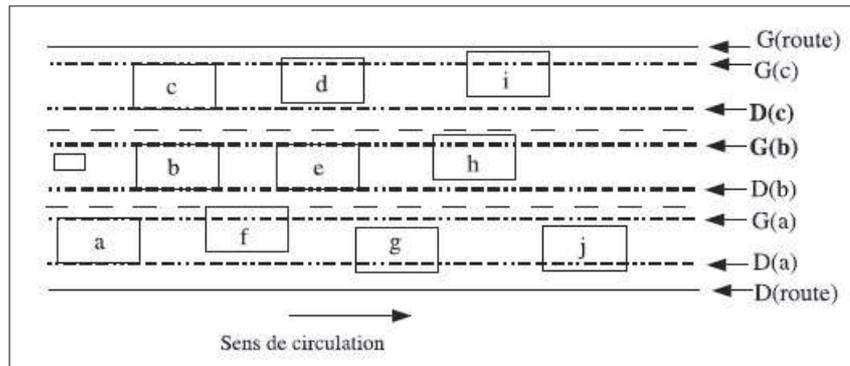


FIGURE 2.9: Exemple de voies virtuelles calculées à partir des autres usagers [Bonte *et al.*, 2006]

Les voies calculées permettent aux motocyclistes simulés de se représenter l'espace pour se déplacer. Il leur faut ensuite choisir une voie. Concernant les critères de choix de voie, les auteurs partent de quelques hypothèses de préférences fondées sur des observations en France :

- doubler sur la gauche si c'est possible,
- ne pas être proche du bord de la route pour minimiser les risques,
- rouler sur les voies larges pour minimiser les risques,
- avoir une vitesse proche de la vitesse désirée, pour maximiser le gain.

Les voies virtuelles calculées ont des caractéristiques telles qu'une largeur, un type (autorisées/interdites) et une vitesse. La vitesse d'une voie est calculée grâce aux vitesses des véhicules formant cette voie. Une voie interdite a une vitesse nulle, une voie autorisée a pour vitesse la moyenne des vitesses empruntées sur ses voies adjacentes, avec pour le bord de la route, une vitesse nulle. Avec ces vitesses, les auteurs calculent un coefficient vitesse-largeur qui est utilisé dans l'algorithme de sélection de voies. Ce coefficient répond au besoin d'éviter de grandes différences entre la vitesse du deux-roues de l'agent et les vitesses des véhicules.

L'agent-motocycliste choisit sa voie en suivant un algorithme qui repose sur une architecture de subsomption [Brooks, 1986]. L'algorithme repose sur un certain nombre de règles classées avec un ordre de priorité et qui caractérisent le comportement à adopter selon le contexte dans lequel se trouve le conducteur. Pour résumer, les auteurs ont identifié cinq cas possibles :

- la voie choisie est une voie physique,
- le deux-roues a commencé un mouvement,
- le véhicule en face du deux-roues change de voie,
- le choix se fait sur un coefficient vitesse-largeur,
- la voie la plus large est choisie.

Dans [Bonte *et al.*, 2006], le critère de choix entre les voies est fondé uniquement sur la largeur de la voie et la vitesse. La différenciation de comportement par rapport aux voies virtuelles est faite sur la base du type de véhicule (deux-roues motorisés et autre). Par conséquent, pour les 2RM par exemple, les conducteurs ont la même appréciation d'un espace libre. Par la suite, [Bonte *et al.*, 2008]

## CHAPITRE 2. SIMULATION DE TRAFIC : OCCUPATION DE L'ESPACE ET REPRÉSENTATION DE L'ENVIRONNEMENT

---

ont proposé une différenciation de comportement des deux-roues motorisés en introduisant 5 classes de comportements : les pragmatiques, les hédonistes, les fous du guidons, les désimpliqués et les motards du dimanche. Suite à cette différenciation, les auteurs rajoutent d'autres paramètres au comportement d'un deux-roues motorisés tels qu'un facteur de prise de risque ou la distance de prise en compte des véhicules. Cependant, ces paramètres ne sont pas pris en compte dans le calcul des voies et la manière de leur prise en compte dans le mécanisme de choix n'est pas explicitée.

Par ailleurs, une voie occupée par des véhicules est considérée comme une voie interdite quelque soit ses caractéristiques en termes de vitesse et même si elle peut offrir une possibilité plus intéressante que la voie courante de l'agent. De plus, l'agent mémorise toutes les voies identifiées dans sa représentation de l'environnement. Le nombre de voies identifiées peut être élevé. Enfin, ce modèle a été développé uniquement pour le cas particulier des deux-roues motorisés et ne peut donc pas être appliqué en l'état aux autres types de véhicules.

### 2.3 Analyse et positionnement par rapport aux travaux précédents

Comme nous l'avons souligné précédemment, il existe très peu de travaux qui ont modélisé les pratiques d'occupation de l'espace au sol telles que nous pouvons les observer dans la réalité. Les travaux de [Bonte *et al.*, 2006, Bonte *et al.*, 2008] apportent une solution à cette problématique pour le cas particulier des deux-roues motorisés dans la simulation de trafic ArchiSim. Ces travaux peuvent être considérés comme un point de départ pour traiter la problématique de l'occupation de l'espace de manière à ce que ça soit plus proche de la réalité. Notre objectif est de proposer un modèle plus générique qui ne soit pas développé pour un type particulier d'utilisateur mais qui s'adapte à chaque agent selon le contexte, ses objectifs et ses caractéristiques individuelles.

Nous terminons ce chapitre par une analyse du modèle de structuration de l'espace précédemment présenté [Bonte *et al.*, 2006, Bonte *et al.*, 2008]. Nous dressons un panorama de ses faiblesses qu'il nous semble important de souligner.

#### 2.3.1 Hétérogénéité des comportements

Bien que le modèle de [Bonte *et al.*, 2006] présente une modélisation du comportement des deux-roues motorisés différente des autres usagers de la route et prône par conséquent pour l'hétérogénéité des comportements dans une simulation de trafic, dans ce modèle, les auteurs ne prennent pas en compte les caractéristiques individuelles dans l'évaluation des voies. Leur évaluation est fondée sur des critères tels que la vitesse ou la largeur de la voie. Les auteurs supposent que tous les agents conducteurs des deux-roues motorisés ont le même comportement face aux espaces libres et considèrent que la représentation que se construit un agent de son environnement peut être la même, notamment pour deux agents qui se situeraient au même emplacement. Cependant les agents n'ont pas

## **2.3. ANALYSE ET POSITIONNEMENT PAR RAPPORT AUX TRAVAUX PRÉCÉDENTS**

la même distance par rapport à la réglementation. Pour remédier à cette limite, les auteurs proposent dans [Bonte *et al.*, 2008] une différenciation comportementale pour les deux-roues motorisés en rajoutant des paramètres tels qu'un facteur de prise de risque ou la distance de prise en compte des véhicules. Cependant, ces paramètres ne sont pas pris en compte dans le calcul des voies. Leur impact sur la prise de décision et le choix de voies n'est pas explicité. De plus, l'idée de la différenciation comportementale peut se généraliser aux autres types de conducteur. Par exemple une voiture classique et une ambulance n'auront pas la même appréciation d'un espace disponible entre deux files de véhicules, de même une moto et une voiture n'opteront pas pour les mêmes voies pour des raisons de taille mais aussi pour des raisons de distance par rapport à la réglementation. Il serait donc intéressant de proposer une plus grande variabilité des comportements en prenant en compte les paramètres individuels des agents dans la construction de la représentation de l'environnement et dans l'évaluation des voies.

### **2.3.2 Nombre de véhicules**

Concernant la construction de la représentation de l'environnement, il est mentionné que l'agent prend en compte les véhicules vus à une certaine distance de vision pour construire les voies virtuelles. Dans [Bonte *et al.*, 2008], le nombre des véhicules pris en considération varie d'un individu à un autre selon des types de comportements identifiés. Cependant, ni les valeurs ni des intervalles de variation n'ont été définis. De plus, la prise en compte uniquement du nombre de véhicules dans le calcul des voies virtuelles peut conduire à des situations de blocage où des possibilités de faufilement ne sont pas considérées alors qu'elles peuvent être intéressantes pour l'agent. Le fait de considérer que toute voie occupée est interdite, peu importe la vitesse pratiquée sur cette voie, peut écarter aussi des solutions possibles. Prenons l'exemple de la situation illustrée par la figure 2.10. Selon le modèle de [Bonte *et al.*, 2006], pour calculer les voies virtuelles, l'agent conduisant les deux-roues considère les 5 véhicules devant lui. Selon cette configuration routière, nous pouvons identifier un espace libre entre deux files de véhicules qui sera fermé à une certaine distance à cause du véhicule de devant qui est à cheval entre les deux files. Selon le modèle de Bonte et al., l'agent ne trouve aucune voie virtuelle vide pour passer et reste bloqué derrière la file de véhicules.

Pour répondre à cette limite, il serait intéressant d'introduire la distance à l'obstacle, la distance à laquelle la voie devient fermée, dans le mécanisme d'évaluation des voies virtuelles. Ce paramètre, permet de considérer les voies occupées, afin de les évaluer par la suite. Si nous revenons à l'exemple précédent, la distance à l'obstacle permet d'indiquer que la voie virtuelle qui émerge au milieu est vide jusqu'à une certaine distance, ce qui permet une meilleure évaluation de la voie. Nous pouvons par exemple voir la moto se faufler jusqu'à l'obstacle pour se rabattre par la suite (figure 2.10 (b)). La distance à l'obstacle, combinée à d'autres paramètres, permet de mieux estimer la qualité d'une voie en termes de vitesse et d'avoir plus d'anticipation. Cette dernière se traduit par le fait que le

## CHAPITRE 2. SIMULATION DE TRAFIC : OCCUPATION DE L'ESPACE ET REPRÉSENTATION DE L'ENVIRONNEMENT

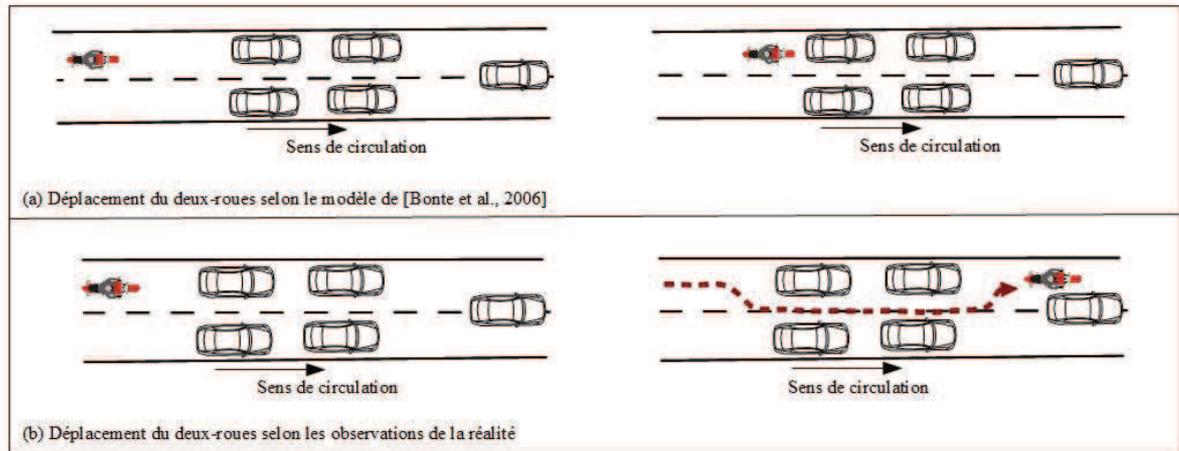


FIGURE 2.10: Déplacement des deux-roues : (a) Selon le modèle de [Bonte *et al.*, 2006], (b) Selon les observations de la réalité

conducteur aura une idée sur la vitesse moyenne de la voie en question et sur la distance à laquelle cette voie est libre.

### 2.3.3 Représentation de l'environnement

Au niveau de la représentation que se construit l'agent de son environnement, [Bonte *et al.*, 2006] font une décomposition systématique en voies libres et occupées de tout l'espace routier, toutes les voies virtuelles identifiées sont ensuite conservées comme étant la représentation mentale que se fait l'agent de son environnement. D'une part, le nombre de voies identifiées peut être élevé plus particulièrement dans le cas de routes à plusieurs voies ou au niveau des gares de péages. D'autres part, dans ce modèle, les auteurs utilisent les zones de contrôle décrites dans [El Hadouaj, 2004] qui présentent aussi des limites, notamment dans le cas de routes à plusieurs voies ou au niveau des gares de péages pour trouver des solutions potentielles qui ne sont pas forcément sur les voies directement adjacentes de l'agent.

L'idée de [El Hadouaj, 2004] de faire une pré-sélection sur l'ensemble des voies existantes pour en garder les plus pertinentes est intéressante dans la mesure où l'ensemble des solutions possibles est limité. Mais le choix des voies à retenir ne peut pas permettre de débloquer n'importe quelle situation. Prenons l'exemple d'une route à 4 voies, illustré par la figure 2.11, l'agent en question se trouve sur la première voie, il est bloqué sur sa voie et la situation routière est aussi bloquée sur les deux voies adjacentes à gauche. Par contre la voie la plus à gauche présente de bonnes caractéristiques. Avec la représentation de [El Hadouaj, 2004], l'agent reste bloqué sur sa voie alors qu'il aurait pu identifier plus tôt que la situation routière est meilleure sur la voie qui est la plus à gauche et anticiper la situation de blocage. Il serait plus judicieux d'explorer l'environnement qui n'est pas directement adjacent

## 2.3. ANALYSE ET POSITIONNEMENT PAR RAPPORT AUX TRAVAUX PRÉCÉDENTS

et d'identifier des zones qui peuvent être plus avantageuses, même si elles ne sont pas atteignables directement.

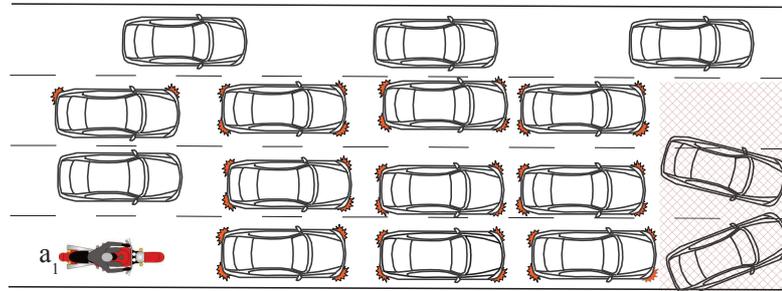


FIGURE 2.11: Situation de blocage suite à un accident

### 2.3.4 Évaluation et choix de la voie

Dans le mécanisme d'évaluation présenté dans le cadre des travaux de [Bonte *et al.*, 2006], l'estimation est faite à l'aide d'un coefficient pondérant la vitesse et la largeur. La vitesse de la voie est donnée par la moyenne des vitesses sur les voies adjacentes puisque les voies évaluées correspondent à des voies vides. Cette technique permet de prendre en compte les voies adjacentes et d'assurer des différentiels de vitesses moins élevés. Ce coefficient reste tout de même insuffisant, à notre sens, pour évaluer la qualité d'une voie. Comme nous l'avons évoqué précédemment, il serait intéressant de prendre en compte des caractéristiques individuelles des agents telle que la distance par rapport la norme afin d'avoir plus d'hétérogénéité au niveau des comportements se rapprochant ainsi plus de la réalité. La prise en compte du degré de violation de la norme permettra d'avoir de l'hétérogénéité quand aux distances de sécurité adoptées par les conducteurs, leurs accélérations et vitesses, etc.

Par ailleurs, nous pouvons enrichir le mécanisme d'évaluation en prenant en compte la distance à l'obstacle. L'évaluation peut ainsi porter sur les voies occupées. Ces dernières peuvent être intéressantes pour l'agent, si elles présentent de bonnes caractéristiques en termes de vitesse.

Enfin, la prise en compte des voies adjacentes pour l'évaluation des voies est primordiale dans la mesure où les voies considérées peuvent être plus étroites que les voies physiques et donc, l'impact de l'environnement adjacent est plus important. Il serait donc intéressant de l'estimer aussi bien pour les voies libres que pour les voies occupées. Nous appelons ce paramètre, d'une manière générale, l'*effet paroi*. Nous définissons ce concept au chapitre suivant.

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la problématique de l'occupation de l'espace au sol. Dans la première partie, nous avons présenté des exemples de situations routières illustrant des pratiques que l'on peut observer dans la réalité en matière d'occupation de l'espace. Nous avons ensuite établi un état de l'art des travaux qui se sont intéressés à cette problématique et avons pointé quelques unes de leurs lacunes.

Pour résumer, une grande partie des outils de simulation existants supposent que le positionnement des véhicules sur la chaussée est régi par les voies physiques définies par le marquage au sol. Cette modélisation ne permet pas de simuler les phénomènes observés en termes d'occupation de l'espace roulant.

Des modèles utilisant des automates cellulaires ont été introduits pour répondre à la problématique de l'occupation de l'espace pour le cas particulier des deux-roues motorisés. Bien que des travaux récents [Lan et Chang, 2005, Lan et Hsu, 2006] tentent d'améliorer la finesse et le réalisme des modèles, l'approche par automate cellulaire est beaucoup trop simpliste d'autant plus lorsqu'il s'agit de simulation de trafic hétérogène.

Très peu de travaux en simulation multi-agent de trafic se sont intéressés à ces pratiques. Ces travaux ont essentiellement modélisé le comportement des deux-roues motorisés pour qui ces pratiques sont fréquentes. Dans ce cadre, nous citons essentiellement les travaux de [Lee *et al.*, 2009] et [Bonte *et al.*, 2006]. Les deux solutions ne sont pas génériques dans le sens où les modèles s'appliquent à un type particulier d'usager. Le modèle de Lee repose sur une approche mathématique et ne permet pas une modélisation fine du comportement du conducteur du fait que le nombre de paramètres pris en compte est assez limité. La limite de l'approche proposée par Bonte *et al.* réside dans une décomposition systématique et géométrique en voies virtuelles de l'espace conduisant à un nombre variable et parfois très élevé de voies virtuelles.

Pour pallier ces limites, nous nous sommes intéressés à la manière avec laquelle un conducteur se représente son environnement. En termes de représentation de l'environnement nous avons évoqué les représentations allo-centrées et les représentations ego-centrées. Dans le cadre de la simulation de trafic, l'environnement est très dynamique et la prise de décision des conducteurs est intimement liée au contexte routier. De ce point de vue, nous pouvons dire que les représentations ego-centrées se prêtent bien aux contextes dynamiques, pour lesquels nous avons besoin d'avoir une représentation contextuelle et dynamique de ce qui se passe autour de l'agent. Dans la réalité, le conducteur « découvre » les situations au fur et à mesure qu'il se déplace. Une représentation ego-centrée est donc plus intuitive dans le cadre de la simulation de trafic. Nous privilégions la seconde représentation.

Dans ce sens, [El Hadouaj, 2004] a proposé une modélisation de l'environnement avec une représentation ego-centrée autour de l'agent (figure 2.7). Cette représentation permet de définir une description de la situation autour de l'agent en prenant en compte le contexte routier mais elle est

### **2.3. ANALYSE ET POSITIONNEMENT PAR RAPPORT AUX TRAVAUX PRÉCÉDENTS**

composée des voies physiques. De plus, comme cela a déjà été évoquée, elle ne permet pas de prendre en compte des possibilités se situant un peu plus loin de l'environnement adjacent.

Pour répondre aux limites des travaux présentés dans ce chapitre, nous nous intéressons à deux aspects : le premier correspond à une meilleure reconnaissance du contexte et par conséquent, une meilleure représentation de la situation routière et le deuxième concerne les caractéristiques individuelles à prendre en compte afin d'avoir un comportement réaliste.

Le chapitre 3 est consacré à la proposition d'un modèle d'agent permettant de rendre compte des comportements d'occupation de l'espace que nous pouvons observer dans la réalité en se fondant sur une représentation ego-centrée de l'environnement. Nous proposons d'utiliser le concept d'affordance pour identifier les différentes possibilités offertes par l'environnement en termes d'occupation de l'espace au sol. La représentation ego-centrée de l'environnement est fondée sur les affordances identifiées.

## **CHAPITRE 2. SIMULATION DE TRAFIC : OCCUPATION DE L'ESPACE ET REPRÉSENTATION DE L'ENVIRONNEMENT**

---

## Chapitre 3

# Représentation ego-centrée de l'agent fondée sur les affordances

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Les affordances</b> . . . . .	<b>60</b>
3.1.1	La théorie des affordances . . . . .	61
3.1.2	Modélisation à base d'affordances . . . . .	62
3.1.3	Discussion . . . . .	69
<b>3.2</b>	<b>Modèle d'interaction avec l'environnement</b> . . . . .	<b>72</b>
3.2.1	Représentation ego-centrée et raisonnement spatial qualitatif . . . . .	72
3.2.2	Les voies virtuelles . . . . .	73
3.2.3	Affordances et voies virtuelles . . . . .	78
<b>3.3</b>	<b>Un modèle d'agent fondé sur les affordances</b> . . . . .	<b>80</b>
3.3.1	Architecture de l'agent . . . . .	81
3.3.2	La perception . . . . .	82
3.3.3	Décision et Action . . . . .	90
3.3.4	Algorithmes de construction de la <i>REE</i> . . . . .	91
<b>3.4</b>	<b>Instanciation du modèle et exemples illustratifs</b> . . . . .	<b>95</b>
3.4.1	Exemple 1 : cas d'un deux-roues motorisé dans une situation de faufilement . . . . .	95
3.4.2	Exemple 2 : cas d'une voiture dans une réduction de voies . . . . .	98

---

Nous avons présenté dans le chapitre 2 la problématique de l'occupation de l'espace au sol et comment les modèles de simulation existants traitent cette problématique. Une grande partie de ces modèles supposent que le positionnement des véhicules sur la chaussée est régi par les voies physiques définies par le marquage au sol. Cette modélisation ne permet pas de simuler les phénomènes observés en termes d'occupation de l'espace roulant. Néanmoins, il existe quelques travaux qui traitent les phénomènes de l'occupation de l'espace autrement. Dans ce cadre nous avons présenté essentiellement les travaux de [Bonte *et al.*, 2006]. Leur modèle présente une représentation différente de

## CHAPITRE 3. REPRÉSENTATION EGO-CENTRÉE DE L'AGENT FONDÉE SUR LES AFFORDANCES

---

l'environnement en utilisant le concept des voies virtuelles. Cependant, l'approche proposée présente quelques limites qui résident dans une décomposition systématique et géométrique en voies virtuelles de l'espace ce qui amène à un nombre variable de voies virtuelles et qui peut être parfois élevé.

Dans ce chapitre, nous nous focalisons sur la manière avec laquelle un agent conducteur se représente l'environnement autour de lui. Pour cela, nous tentons de répondre à deux problématiques :

- Comment reconnaître et mieux représenter une situation de trafic afin que les agents aient un comportement réaliste en termes d'occupation de l'espace ?
- Comment mieux prendre en compte les caractéristiques individuelles des agents afin de prendre des décisions réalistes ?

Pour répondre à ces deux problématiques, nous proposons d'utiliser le concept d'affordance pour identifier les différentes possibilités offertes par l'environnement en termes d'occupation de l'espace au sol. Nous proposons ensuite d'utiliser une représentation ego-centrée de l'environnement fondée sur les affordances pour doter l'agent d'une représentation « mentale » de son contexte d'une manière ego-centrée. Cette représentation facilite la prise de décision pour l'agent.

Dans la première section du chapitre, nous introduisons le concept d'affordance et établissons un état de l'art succinct des travaux qui ont utilisé ce concept dans leurs modélisations. Dans la deuxième section, nous proposons un modèle d'interaction avec l'environnement fondé sur les affordances ainsi que le lien entre la notion des voies virtuelles et les affordances. La troisième section de ce chapitre est consacrée à la présentation de notre modèle de représentation ego-centrée de l'environnement en utilisant le concept d'affordance. Notre approche est ensuite illustrée à la dernière section du chapitre avec deux exemples de situations routières.

### 3.1 Les affordances

Nous proposons d'utiliser le concept d'affordance afin de déterminer les actions possibles offertes par l'environnement en termes d'occupation de l'espace. Notre représentation ego-centrée de l'environnement est composée par les affordances identifiées. Par exemple, si un conducteur n'a pas la possibilité de se déplacer sur sa propre voie (à cause d'une fermeture de voie), il ne va pas nécessairement ajouter cette voie à sa représentation de l'environnement étant donné que cette voie est devenue interdite. Nous pouvons aussi considérer le comportement de faufilement des deux-roues motorisés : s'il y a suffisamment d'espace entre deux files de voitures, la voie émergente devrait être rajoutée à la représentation ego-centrée que se construit le conducteur de son environnement étant donné qu'elle lui offre une possibilité d'action meilleure que celle fournie par les voies physiques définies par le marquage au sol.

Cette section est consacrée à la présentation du concept d'affordance et de ses origines. Nous présentons aussi quelques travaux qui ont utilisé ce concept dans leur modélisation. Cependant, il

faut noter que cette section est loin d'être une étude complète et exhaustive des diverses définitions et interprétations du concept d'affordance tel qu'il a été défini par [Gibson, 1977]. Nous avons plutôt mis l'accent sur une partie de ces travaux qui contribue à comprendre comment le terme affordance est utilisé dans cette thèse, pour lever l'ambiguïté de son utilisation et le clarifier.

#### 3.1.1 La théorie des affordances

Les affordances font partie d'une théorie à l'origine de la théorie écologique de la perception (en anglais « *ecological psychology* ») initialement développée par le psychologue Gibson [Gibson, 1977]. Il considère que l'environnement offre à l'entité en mouvement des significations directement utiles pour l'action, des « disponibilités physiques perceptibles », qu'il appelle les affordances. Il les décrit comme étant des possibilités d'actions ou des opportunités que les entités peuvent percevoir dans l'environnement.

Par cette formulation, Gibson décrit une relation réciproque entre les capacités d'une entité et les caractéristiques de son environnement. Gibson va même plus loin en affirmant que l'existence d'une affordance pourrait aussi bien être inconsciente à l'entité : « *The observer may or may not perceive or attend to the affordance, according to his needs, but the affordance, being invariant, is always there to be perceived.* » [Gibson, 1979] (p. 139)

Ainsi, Gibson stipule qu'une affordance est une relation innée, qui existe toujours, entre une entité et un objet si ce dernier existe. Elle ne dépend pas du fait que l'entité fait attention à cette relation ou pas. La formulation proposée par Gibson postulant que les affordances sont directement perceptibles, sans aucune délibération de haut niveau a entraîné quelques ambiguïtés sur l'interprétation et l'utilisation de ce concept. Ce dernier a fait l'objet de nombreuses recherches qui ont tenté de préciser sa définition [Turvey, 1992, Murphy, 1999, Chemero, 2003]. Par exemple, [Murphy, 1999] considère que le concept d'affordance correspond à une perception directe ne nécessitant aucune délibération ou représentation mentale des choses.

Cette description suggère fortement un ensemble d'exigences de conception spécifiques pour gérer les interactions entre l'agent et son environnement. Cela ne comprend pas seulement l'exigence de conception que les percepts et les actions des agents soient à la fois explicitement représentés mais englobent également la nécessité pour les agents de percevoir les possibilités d'action directement dans l'environnement.

De nombreux chercheurs ont souligné que la théorie de Gibson est insuffisante pour expliquer la perception parce qu'elle néglige les processus de cognition [Vera et Simon, 1993, Duchon *et al.*, 1998, Norman, 1999, MacDorman, 2000, Raubal, 2001]. Par exemple [Vera et Simon, 1993], qui ont plaidé en faveur de la similitude entre le concept d'affordance et le caractère situé, affirment que « pour acquérir une représentation interne d'une affordance, une personne doit effectuer un codage complexe des stimuli sensoriels [.. .] ». [Duchon *et al.*, 1998]

## CHAPITRE 3. REPRÉSENTATION EGO-CENTRÉE DE L'AGENT FONDÉE SUR LES AFFORDANCES

---

ont explicitement soutenu que l'agent ne se contente pas de répondre à un stimulus perçu directement par l'action qui est prévue dans cette situation. Il n'est pas contrôlé par l'environnement. Il peut plutôt utiliser les informations fournies par les affordances d'une situation et raisonner sur elles d'une manière orientée vers des buts en choisissant les actions offertes qui mèneront à son but. D'autres auteurs considèrent que les affordances sont les résultats de l'interprétation mentale des choses, fondées sur la connaissance des individus et leurs expériences passées, qui sont appliquées à la perception directe de ces dernières. [Norman, 1999] a repris et étendu le concept de Gibson dans le but de concevoir des interfaces hommes-machines. Il décrit les affordances perçues comme l'ensemble des actions qu'une entité a conscience de pouvoir faire. De même, [Raubal, 2001] utilise une théorie étendue des affordances dans un modèle d'agent fonctionnel fondé sur les affordances. Elle complète la théorie de la perception de Gibson avec des éléments de la cognition, des aspects situationnels et des contraintes sociales.

Compte-tenu de ces différents points de vue sur les affordances, nous soutenons l'idée de la prise en compte de la cognition pour modéliser les affordances. Nous ne pensons pas que la perception des affordances correspond uniquement à une perception directe, cela n'exclut pas qu'il puisse y avoir la nécessité d'un traitement perceptif.

### 3.1.2 Modélisation à base d'affordances

Cette section vise à établir un état de l'art succinct des travaux qui ont utilisé le concept d'affordance. Bien qu'il n'y ait pas encore beaucoup de travaux exploitant la théorie des affordances d'une manière assez approfondie, des exemples de ces travaux sont brièvement présentés dans cette section. Il est à noter que les travaux présentés ci-dessous ne visent pas à être exhaustifs ; mais à souligner l'intérêt pour ce concept.

Le concept d'affordance a été utilisé dans différents travaux, notamment dans le domaine de la robotique [Murphy, 1999, Stoytchev, 2005a, Zieba *et al.*, 2011], dans les systèmes multi-agents pour des problématiques liées à la navigation de piétons [Kapadia *et al.*, 2009], pour la simulation d'opérations militaires [Papasimeon *et al.*, 2007] ou pour la représentation de l'action située dans les systèmes agricoles [Afoutni *et al.*, 2012].

#### 3.1.2.1 Affordances et robotique

Un robot mobile est considéré comme étant un agent situé. Par conséquent, les problématiques liées à la robotique nécessitent des systèmes capables d'un niveau assez élevé d'autonomie, d'une perception adaptative robuste et d'une grande flexibilité et d'adaptabilité. Dans ce cadre, la théorie des affordances offre un certain nombre d'avantages notamment, la possibilité de réagir de manière fiable à tout changement de l'environnement.

Certains roboticiens ont explicitement utilisé des idées issues des affordances dans la conception du comportement des robots [Duchon *et al.*, 1998, Murphy, 1999]. Dans ces travaux, l'utilisation des affordances se limite principalement au contrôle fondé sur le comportement des robots, et son utilisation dans la délibération reste un domaine assez inexploré.

Par ailleurs, en sciences cognitives, certains modèles cognitifs relient les affordances uniquement aux processus de bas niveau [Norman, 2002], d'autres considèrent les affordances comme une partie d'un modèle cognitif complet [Neisser, 1994, Gibson, 2000, MacDorman, 2000]. Récemment, un certain nombre de travaux sur la robotique, se sont focalisés sur l'apprentissage des affordances dans les robots [Fitzpatrick *et al.*, 2003, Stoytchev, 2005a, Stoytchev, 2005b]. [Stoytchev, 2005a] a réalisé l'une des premières études exhaustives liées à la manipulation d'objets et l'utilisation d'outils fondés sur les affordances. Dans son travail, un robot, équipé d'un bras, apprend les résultats observés d'une variété de comportements simples, que Stoytchev catégorise dans des groupes de comportements exploratoires et de comportements contraignants. Stoytchev formalise les affordances apprises dans ce qu'il appelle une table d'affordances qui contient des informations sur les comportements appliqués, leurs paramètres, des observations corrélées, et le nombre d'essais et d'applications réussies des comportements. De ce fait, il souligne explicitement le fait que la représentation des affordances doit être fondée sur la perception et les comportements du robot. Cela signifie, qu'il interprète ainsi les affordances comme la relation entre les caractéristiques perceptibles et les capacités du robot, parce que si elles sont liées au robot, les relations d'affordance deviennent uniques pour ce dernier. De plus, [Stoytchev, 2005a] a montré que les robots gagnent sensiblement en souplesse et en adaptabilité concernant la sélection et l'utilisation d'objets ou d'outils lors de l'application d'une approche fondée sur les affordances parce qu'il est en mesure de substituer des outils inappropriés, ainsi de s'adapter de manière autonome à des insuffisances de l'outil.

[Zieba *et al.*, 2011] ont utilisé les affordances dans le cadre de l'étude de la résilience d'un système humain-robot avec une autonomie ajustable permettant ainsi une gestion plus efficace des événements imprévisibles et une optimisation de la répartition des tâches entre l'opérateur humain et le robot. Les affordances fournissent une métrique pour évaluer la capacité du robot à anticiper certaines situations potentiellement erronées. Cette métrique est calculée en fonction du nombre des affordances perceptibles actualisées avec succès, du nombre des affordances cachées détectées, du nombre des fausses affordances détectées et du nombre total des affordances. L'autonomie suit différents modes selon le niveau souhaité. La collaboration est assurée à travers une communication entre l'opérateur humain et le robot afin de permettre un partage dynamique des tâches entre les deux.

Dans le domaine de la robotique, les affordances apportent aux systèmes développés plus de souplesse et d'adaptabilité. Ceci est fort utile dans ce type d'application afin d'avoir des robots qui sont plus autonomes face à des environnements qui peuvent être très dynamiques et évolutifs.

## CHAPITRE 3. REPRÉSENTATION EGO-CENTRÉE DE L'AGENT FONDÉE SUR LES AFFORDANCES

---

### 3.1.2.2 Affordances et systèmes multi-agents

En partant du fait que les courants de pensées émanant de la théorie des affordances considèrent que chaque élément de l'environnement peut être le sujet d'actions lui étant intrinsèques, ces idées peuvent être transposées au cas des simulations informatiques, dans le but de représenter les éléments de la mémoire procédurale des agents, par exemple. Dans la mesure où la mémoire procédurale concerne la mémoire des actions et des aptitudes et que l'affordance résume tout ce que l'on peut se permettre avec un objet en termes d'action ou d'interaction. Ce constat a inspiré un certain nombre de travaux en simulation à base d'agents. Certains travaux considèrent que les affordances sont des propriétés ou des fonctionnalités des objets [Cornwell *et al.*, 2003, Joo *et al.*, 2013], d'autres considèrent plutôt que les affordances correspondent à des relations entre les objets de l'environnement ou l'environnement et les agents offrant ainsi une possibilité d'action [Kapadia *et al.*, 2009, Papisimeon, 2009, Afoutni *et al.*, 2012].

Dans [Joo *et al.*, 2013], les auteurs explorent la simulation du comportement humain en utilisant un automate à états finis fondé sur les affordances. Leur modèle est appliqué à une situation d'évacuation d'urgence afin de simuler les interactions des actions dynamiques humaines fondées sur la perception avec les changements émergeant de l'environnement, tel que les incendies. Dans ces travaux, les auteurs se sont inspirés du formalisme donné par [Turvey, 1992]. Ce dernier définit l'affordance comme un ensemble de propriétés « dispositionnelles » de l'environnement qui permettent potentiellement de rendre l'action possible. Par « dispositionnelles », Turvey entend que les objets de l'environnement manifestent certaines propriétés à un instant donné en fonction du contexte. L'affordance se réalise si un agent possède une « effectivité » (« *effectivity* ») qui complète la propriété de l'objet perçu.

Cette définition a été critiquée par plusieurs auteurs [Stoffregen, 2000, Chemero, 2003]. Ces derniers soutiennent qu'une affordance ne peut pas être une propriété de l'environnement car cette vision est en contradiction avec l'idée de [Gibson, 1979], qui considère qu'une affordance n'est une partie ni de l'environnement, ni de l'acteur, mais qui est plutôt une relation entre les deux. Dans ce sens, [Chemero, 2003] a proposé par la suite une définition plus proche de celle donnée par Gibson, une affordance est pour lui une relation entre les capacités d'un acteur et les caractéristiques de son environnement. [Afoutni *et al.*, 2012] se sont inspirés du formalisme présenté par [Chemero, 2003] afin de proposer un modèle de représentation de l'action située dans les systèmes agricoles.

Nous allons insister sur les trois approches suivantes afin de présenter la représentation concrète des affordances dans le modèle et leur exploitation pour définir le comportement des agents.

#### **L'approche de Cornwell *et al.* [Cornwell *et al.*, 2003]**

[Cornwell *et al.*, 2003] ont utilisé les affordances dans une architecture multi-agent. Un tel concept leur a offert, par l'encodage des fonctionnalités des objets, une meilleure extensibilité à différents agents. Un même objet peut offrir différentes actions à différents agents ce qui distingue cette

approche d'autres pour lesquelles il y a besoin de définir des actions explicites pour chaque agent et concernant chaque objet.

Selon l'approche de [Cornwell *et al.*, 2003], la définition des affordances repose sur les principes suivants :

- chaque objet dispose d'un ensemble de types perçus (« *perceptual types* »),
- chaque type perçu dispose de règles de perception indiquant quel type est actif pour un agent donné,
- chaque type perçu fournit différentes actions possibles et une anticipation de leurs effets,
- chaque agent perçoit les objets à l'aide d'un ou plusieurs types perçus.

Les affordances d'un agent pour un objet correspondent donc à l'ensemble des actions relatives aux types perçus de l'objet par l'agent. Les affordances sont utilisées dans le cadre d'une application nommée Performance Moderator Function Server (PMFserv). Cette application est considérée comme une boîte à outils polyvalente à partir de laquelle les développeurs de simulation pourront soit associer des esprits d'agents à des corps d'agents dans leurs simulations ou utiliser des composants PMF au besoin de modérer le comportement de leurs propres sous-systèmes cognitifs. Les auteurs fournissent un standard d'interface qui permet au PMFserv de conduire le comportement d'agents situés dans une variété d'environnements de simulation et de jeu. Cette approche permet de construire des bibliothèques réutilisables d'objets et de types perçus permettant ainsi une facilité de réutilisation et de conception de nouvelles simulations.

Pour les systèmes multi-agents qui simulent la connaissance et/ou les émotions des agents individuels, et qui aspirent à un niveau élevé ou à la réutilisation et la composabilité rapide, le concept d'affordance apparaît pratiquement comme une exigence.

#### **L'approche de Papasimeon [Papasimeon, 2009]**

Dans l'approche de [Papasimeon, 2009], le concept d'affordance est intégré à une architecture BDI (*Belief-Desire-Intention*). L'auteur considère que les affordances sont traitées de la même manière que les attitudes mentales classiques telles que les croyances, les désirs et les intentions. Les affordances associent à un objet de l'environnement une intention possible que l'agent peut exécuter sous certaines conditions. L'avantage de ce type d'approche est qu'il semble relativement facile de modéliser formellement le concept d'affordance comme une attitude mentale dans des modèles existants d'agent.

Le comportement de l'agent, dans le cadre de ce modèle, peut être décrit par les étapes suivantes :

- déterminer l'ensemble des entités (incluant les agents) que chaque agent dans la simulation peut percevoir,
- pour chaque couple agent-entité, déterminer les affordances qui résultent (surgissent) de cette interaction,
- chaque agent est ensuite présenté avec une liste d'affordances possibles à un instant donné,
- l'agent décide ensuite quelle affordance adopter en fonction de son état mental,

### CHAPITRE 3. REPRÉSENTATION EGO-CENTRÉE DE L'AGENT FONDÉE SUR LES AFFORDANCES

- une fois que la décision est prise à propos de quelle affordance (une action possible) adopter, l'action doit ensuite être réalisée.

Une affordance entre un agent et un objet est représentée sous la forme d'une relation, qui est perçue sous certaines conditions. Les conditions décrivent quelles propriétés l'agent et l'objet doivent vérifier pour que l'affordance soit perçue.

L'auteur présente ces relations sous forme d'un graphe. Les entités sont représentées par des noeuds et peuvent correspondre soit à des agents, soit à des entités non-agents. Les affordances sont représentées par les arcs entre les noeuds (3.1).

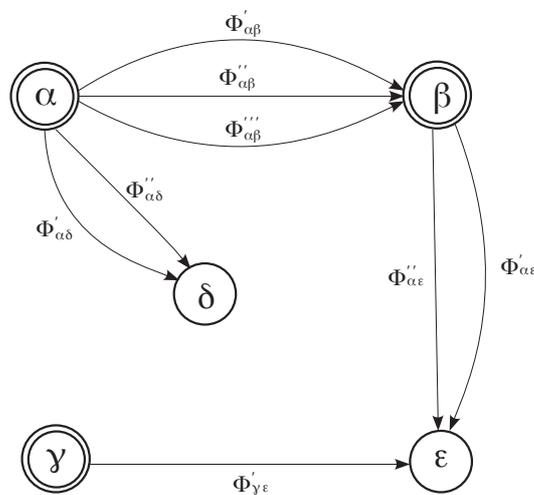


FIGURE 3.1: Un exemple d'un graphe représentant les relations d'affordances pour un SMA selon l'approche de [Papasimeon, 2009]. Certaines entités sont des agents et sont représentées par un double cercle. Dans ce système, les agents sont  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ . Les affordances sont représentées par des arcs. Chaque affordance  $k^{th}$  entre un agent  $i$  et une entité  $j$  est notée par  $\phi_{ij}^k$

Si nous nous référons à la définition des affordances, donnée par Gibson, ces dernières doivent être définies dans l'environnement et non pas dans la mémoire procédurale des agents. Pourtant un agent doit pouvoir raisonner sur les affordances pour prendre sa décision. Dans ce sens, Papasimeon propose deux approches différentes pour modéliser les affordances. La première s'appuie intégralement sur le concept d'affordance présenté par Gibson et stocke toutes les affordances dans l'environnement ; la deuxième considère une définition plus souple et considère que les affordances sont dans la mémoire de l'agent.

La première approche a un certain nombre d'avantages. Le plus important est qu'elle correspond à une représentation plus proche du concept d'affordance comme décrit en psychologie écologique. Un autre avantage consiste dans le fait que cette proposition accorde une place plus importante à l'en-

vironnement permettant ainsi de transférer une partie de l'intelligence au niveau de l'environnement. Cependant, dans le cadre de cette proposition, le modèle de l'environnement nécessite de pouvoir saisir toutes les relations nécessaires au calcul des affordances (incluant les informations concernant les agents individuels) ainsi que de déterminer les affordances pour chaque agent. Les agents de leur côté doivent être capables de percevoir les affordances, de les évaluer et décider laquelle adopter. De plus, l'architecture de simulation doit être en mesure de fournir les mécanismes d'interfaçage appropriés entre l'agent et l'environnement pour permettre à l'agent de percevoir les affordances pertinentes dans l'environnement. Le principal inconvénient de cette approche est que l'impact de la conception se traduit par un grand nombre de sous-systèmes au niveau de l'architecture de simulation. Par conséquent, l'introduction des affordances ne signifie pas seulement une reconsidération de la conception de l'agent et de l'environnement mais aussi l'interaction entre les deux. Ceci peut s'avérer difficile dans le cas où les affordances sont introduites dans une simulation déjà existante nécessitant ainsi de multiples modifications tant au niveau de l'agent qu'au niveau de l'environnement.

L'avantage de la deuxième modélisation des affordances réside dans le fait qu'il est plus facile d'introduire le concept d'affordance dans une simulation multi-agent existante, les affordances peuvent ainsi être introduites au niveau du processus de raisonnement de l'agent sans affecter le reste de l'architecture.

Un autre aspect important à prendre en compte concerne le nombre d'affordances à calculer. Dans le cas le plus général, les affordances de chaque agent sont considérées par rapport à chaque entité présente dans l'environnement. Cette approche a l'avantage d'être générale. Toutefois, avec un grand nombre d'agents et d'entités, ce type d'approche est problématique du point de vue de la lourdeur du calcul en raison du grand nombre des relations possibles à examiner et à évaluer. Ce qui relève de la résolution de problèmes combinatoires. En réduisant le nombre d'affordances à examiner et à évaluer, il est possible d'améliorer de manière significative les performances de calcul de la simulation. Dans le cadre des travaux de [Papasimeon, 2009], le nombre d'affordances à évaluer a été réduit en prenant en compte les informations spécifiques au domaine considéré. Cela a été fait en partitionnant les affordances possibles dans les groupes associés à des entités spécifiques. Ce type d'approche a un certain nombre d'inconvénients. Tout d'abord, cette approche introduit un certain nombre de cas particuliers qui doivent être manipulés par rapport au cas général. Deuxièmement, elle émet des hypothèses sur les affordances disponibles par rapport aux différentes entités et, par conséquent réduit la possibilité qu'un agent peut percevoir une affordance qui n'était pas explicitement prévue par le concepteur de la simulation.

#### **L'approche de Kapadia [Kapadia *et al.*, 2009]**

L'approche de [Kapadia *et al.*, 2009] propose un cadre général pour les problématiques de navigation et planification de trajet pour la simulation de piétons. Dans ce modèle, les affordances correspondent aux différentes possibilités d'interaction entre un agent et son environnement. Chaque agent perçoit son environnement à travers un ensemble de champs vectoriels et scalaires représentés

### CHAPITRE 3. REPRÉSENTATION EGO-CENTRÉE DE L'AGENT FONDÉE SUR LES AFFORDANCES

---

dans l'espace local de l'agent. Cette manière ego-centrée de représenter les choses permet de calculer un plan spatio-temporel local. Ces champs de perception sont ensuite utilisés pour calculer un score (« *fitness* ») de toutes les actions possibles. Ce score correspond à ce que les auteurs appellent un champs d'affordance (« *affordance field* »). L'action qui obtient le score optimal correspond à la décision sélectionnée par l'agent.

Le modèle est composé de trois phases :

- Une phase de perception qui aboutit à une construction ego-centrée de champs de perception. Ces champs de perception correspondent à un champ vectoriel ou scalaire et quantifient les propriétés relatives à l'environnement, par exemple, un paramètre de traversabilité qui quantifie la facilité à occuper un emplacement dans l'espace ou la vitesse des objets proches.
- Une phase d'affordance qui permet de calculer les champs d'affordances calculés en fonction des champs de perception préalablement identifiés. Un champ d'affordance quantifie la valeur pouvant être attribuée à une affordance en prenant en compte les buts de l'agent.
- Une phase de sélection : le résultat de ce système, est l'affordance (action) ayant la valeur optimale. Des exemples de décision correspondent à une vitesse cible ou une direction désirée de l'agent.

Nous pouvons considérer que le fait de déterminer les affordances possibles à partir des champs de perception identifiés d'une manière ego-centrée permet de réduire le nombre d'affordances qui peuvent être considérées étant donné que le choix se fait sur l'environnement accessible à l'agent. Ce critère de sélection est pertinent pour ce type de problématique où l'agent cherche à choisir une position à atteindre autour de lui. Cette modélisation permet d'avoir des déplacements des agents assez naturels avec et sans obstacles, ceci a été illustré à l'aide de différents scénarios illustrant des situations de croisement, de chemins avec des virages. De même, pour des situations avec virages serrés, le modèle permet d'avoir des comportements cohérents de l'effet surprise où les agents ne se découvrent qu'au moment de la collision imminente. Néanmoins, afin d'intégrer un mécanisme d'anticipation dans le modèle, il serait aussi intéressant de prendre en compte non seulement l'environnement proche mais aussi l'environnement plus éloigné (ou non directement adjacent) pour la prise de décision offrant ainsi la possibilité d'avoir des informations et une perception plus étendues. Dans certaines situations, l'état de l'environnement non adjacent peut avoir un impact sur la prise de décision de l'agent permettant de mieux anticiper le contexte et éviter par exemple des situations de blocage.

Pour résumer, nous proposons le tableau suivant pour synthétiser les différents travaux présentés (voir Tableau 3.1).

TABLE 3.1: Synthèse des approches présentées

Affordances : propriétés des objets	Affordances : relations entre objets (ou environnement) et agents
[Cornwell <i>et al.</i> , 2003, Joo <i>et al.</i> , 2013]	[Stoffregen, 2000, Chemero, 2003, Kapadia <i>et al.</i> , 2009, Papasimeon, 2009, Afoutni <i>et al.</i> , 2012]

#### 3.1.3 Discussion

Nous nous intéressons à la manière avec laquelle les agents interagissent avec l'environnement. Nous proposons d'utiliser le concept d'affordance afin d'identifier les interactions entre les agents et les entités présents dans l'environnement.

Il existe dans la littérature d'autres concepts pour modéliser les interactions entre agents. Ces concepts peuvent présenter des points de similitude ou au contraire de divergence avec la notion d'affordances. Nous établissons une comparaison rapide des différentes approches existantes traitant d'interaction entre entités et le concept d'affordance afin de se positionner par rapport aux travaux existants. Comme nous l'avons spécifié au chapitre 1, il existe deux types d'interaction : les interactions directes et indirectes.

Les travaux de [Balbo, 2012] se positionnent dans le premier cas. Dans le cas d'une interaction consciente, l'agent adapte son comportement selon ses connaissances. Le calcul du contexte est nécessairement limité par les connaissances utilisées, qui peuvent être incomplètes, non à jour, etc. Par souci d'efficacité et pour utiliser au mieux le contexte (notamment les contextes complexes), l'auteur a fait le choix, au niveau de la modélisation, de déléguer la tâche de mise à jour et de partage des connaissances à l'environnement. Il propose un modèle déclaratif de représentation des informations dans lequel un contexte est identifié comme un sous-ensemble de ces informations. Ce modèle déclaratif est manipulable par les agents afin d'assurer la mise à jour des informations ainsi que l'identification des contextes, conservant ainsi l'autonomie des agents. Dans la lignée de cette proposition, [Saunier, 2008] s'intéresse aux communications multi-parties et propose de considérer les communications d'un point de vue global, sans distinction *a priori* entre interactions directes et indirectes. Il introduit le principe de coordination fondée sur les propriétés, permettant aux agents ayant des besoins en interactions, de s'exprimer à l'aide de condition sur l'état du système. Dans le cadre de ces travaux, la modélisation de l'environnement est explicite et une infrastructure pour le support de l'interaction est proposée. Il présente ainsi une version étendue du modèle d'environnement EASI - Environnement

### CHAPITRE 3. REPRÉSENTATION EGO-CENTRÉE DE L'AGENT FONDÉE SUR LES AFFORDANCES

---

Actif Comme Support de l'Interaction - à l'aide du paradigme de l'analyse de données symboliques, afin d'unifier l'expression de l'état du système et des besoins des agents. Les différentes entités du système sont décrites par des propriétés. Les besoins en interaction des agents - ses interlocuteurs ou les informations qu'ils recherchent - sont décrits par des conditions sur ces propriétés. Ils sont gérés dynamiquement par l'environnement sous forme de filtres. Les filtres permettent de prendre en compte des informations sur les agents, sur les messages et toutes autres informations contextuelles. Le modèle EASI permet aux agents d'adresser leurs messages selon une description logique des récepteurs et d'identifier les messages qui peuvent les intéresser. Ainsi, l'environnement prend en compte tous les modes de communication et donc les communications multi-parties.

Dans nos travaux, les agents ne communiquent pas directement entre eux. La communication est plutôt médiatisée par l'environnement. L'interaction est donc considérée comme indirecte. Dans ce sens, l'utilisation du concept d'affordance permet de mieux identifier les interactions entre les agents et les entités. Dans notre cas de figure, l'environnement offre des possibilités d'action en termes d'occupation de l'espace au sol suite aux différents positionnements et interactions des autres entités présentes dans l'environnement. Il y a plusieurs approches possibles pour modéliser le concept d'affordance. Ces dernières peuvent être calculées et identifiées au niveau de l'agent, elles se situent dans ce cas au niveau de la représentation interne de l'agent. Elles peuvent aussi être définies d'une manière plus fidèle à la définition donnée par la psychologie cognitive et sont plutôt stockées dans l'environnement et perçues directement par l'agent. La deuxième modélisation des affordances s'approche dans un sens de la modélisation de la connaissance dans l'environnement présentée précédemment dans les travaux de [Saunier, 2008, Balbo, 2012]. Dans les deux cas, les informations sont stockées au niveau de l'environnement. Nous pouvons imaginer un processus similaire aux filtres proposés par [Saunier, 2008] permettant d'identifier les affordances qui sont possibles pour un agent à un instant donné selon ses capacités et ses objectifs.

D'une manière générale, l'état de l'art nous a permis d'identifier les avantages et les inconvénients de chaque approche. Dans le cadre de notre application, nous optons pour la solution consistant à considérer que les affordances sont contenues dans la mémoire de l'agent dans la mesure où l'agent a besoin de raisonner sur les affordances perçues afin d'identifier celles qui peuvent correspondre réellement à des possibilités d'action dans l'environnement. Présentées ainsi, les interactions sont dans notre cas, plutôt indirectes. L'évolution de l'environnement est perçue par les agents, influençant ainsi leur comportement et de fait, leurs actions sur l'environnement. Cet ensemble d'interactions entre les agents et l'environnement conduit à l'auto-organisation de l'ensemble du système.

Un paradigme utile pour conceptualiser la dynamique de cette activité induite par l'environnement est le concept de stigmergie [Hassas, 2003, Parunak, 2006, Heylighen, 2007, Simonin, 2010]. Une activité est stigmergique si l'action d'un agent laisse une marque (stigmatisation en grec) dans l'environnement qui stimule un agent (le même ou un autre) à effectuer d'autres travaux (Ergon en grec). Cette action subséquente laissera une autre marque qui à son tour stimulera encore une autre action. La stigmergie est une forme de communication indirecte qui rend possible la coordination et

la régulation des activités des acteurs naturels et des agents virtuels. La notion de stigmergie a été introduite par le biologiste français Grassé [Grassé, 1959], pour comprendre le comportement de coordination des constructions chez les insectes sociaux et surtout l'interaction avec leur environnement. Cette interaction aboutit à un changement dans l'environnement et ce changement affecte les actions futures des agents. Les fourmis, par exemple, dans une colonie, utilisent le mécanisme de stigmergie pour communiquer indirectement entre elles en déposant la phéromone pour aboutir aux sources de nourriture. Pour les systèmes multi-agents situés, l'environnement joue un rôle important pour la prise de décision des agents situés. Il est à la fois complexe et dynamique et a un impact sur la sélection d'actions des agents. Dans [Weyns *et al.*, 2007], l'environnement est défini comme étant une abstraction de première-classe qui fournit les conditions d'existence de l'agent et fournit une abstraction de conception exploitable pour la construction des systèmes multi-agents. Les systèmes multi-agents situés utilisent l'environnement pour la communication indirecte entre les différents agents à travers le mécanisme de stigmergie décrit précédemment. La stigmergie est une forme d'auto-organisation, dans la mesure où les agents communiquent indirectement à travers l'environnement engendrant une coordination et une régulation des activités. Les informations locales aux agents jouent un rôle important dans la définition de la structure globale du système. Les agents situés utilisent l'environnement comme moyen d'interaction et aussi comme support d'inscription des effets de leurs actions [Hassas, 2003].

Le terme stigmergie tel qu'il a été défini par [Grassé, 1959] exprime la notion que les actions d'un agent laissent des signes dans l'environnement, signes perçus par lui-même et les autres agents et qui déterminent leurs prochaines actions. Concernant la simulation de trafic en général, nous pouvons donner des exemples de situations où les agents donnent des signaux qui peuvent influencer le comportement des autres tel que par exemple, un clignotant allumé par un agent peut influencer le comportement des autres. En ce qui concerne les affordances, telles que nous les utilisons dans cette thèse, elles correspondent à des possibilités d'action résultant de l'interaction des autres agents. Elles peuvent être interprétées comme des propriétés de l'environnement qui lorsqu'elles sont perçues poussent les agents à agir d'une certaine manière. Plus précisément, un espace sur la chaussée, de part ses caractéristiques peut nous pousser à l'utiliser. Il ne s'agit pas d'un acte délibéré mais c'est intentionnel de la part de l'agent qui opte pour ce choix. De ce point de vue, le concept d'affordance peut présenter des points de similitude avec celui de la stigmergie. Cependant, il ne s'agit pas dans notre cas, d'interactions mutuelles entre agents. Les agents perçoivent les autres entités et identifient ce que l'environnement peut leur offrir comme possibilités d'action. Ces actions dépendent fortement de l'état de l'environnement et influence ce dernier en retour. De plus nous nous intéressons à la simulation des pratiques réelles des individus qui peuvent être non normatives. De ce fait, les agents s'organisent en fonction du contexte et de leurs objectifs. On assiste ainsi à une forme d'auto-organisation et nous pouvons avoir des phénomènes émergents tels que l'apparition de voies virtuelles empruntées par plusieurs agents. L'auto-organisation est, en général, associée à la notion d'émergence, c'est un mécanisme qui permet d'obtenir de l'émergence. Elle est donc définie comme un processus d'émer-

## CHAPITRE 3. REPRÉSENTATION EGO-CENTRÉE DE L'AGENT FONDÉE SUR LES AFFORDANCES

---

gence spontanée dans un système, dû à des relations internes au système et/ou à des relations avec son environnement et à la manifestation de ces relations dans l'écoulement du temps [Gleizes, 2004].

Dans le cadre de la simulation de trafic nous pouvons assister à des phénomènes émergents, dans la mesure où les agents s'auto-organisent en fonction du contexte routier et de leurs objectifs et ceci est d'autant plus vrai lorsqu'il s'agit d'agents ne respectant pas forcément les règles du code de la route. Nous pouvons assister même à l'émergence de situations telles que l'apparition de voies de circulation dans le cas de situations sans marquage au sol, par exemple au niveau des carrefours.

Nous proposons, un modèle d'agent pour la problématique de l'occupation de l'espace fondé sur le concept d'affordance. Les affordances identifiées permettent à l'agent de se construire une représentation ego-centrée de l'environnement qui prend en compte les possibilités d'occupation de l'espace facilitant ainsi la prise de décision de l'agent. Le fait de considérer les affordances du point de vue de l'agent (comme des constructions mentales internes) rend plus facile la mise en oeuvre et l'implémentation de ce concept dans une simulation multi-agent que dans le cas où les affordances sont représentées comme un concept directement perceptible dans l'environnement.

### 3.2 Modèle d'interaction avec l'environnement

#### 3.2.1 Représentation ego-centrée et raisonnement spatial qualitatif

Afin de proposer une solution générique qui prend en compte les pratiques des conducteurs en termes d'occupation de l'espace, nous nous sommes intéressés à la manière avec laquelle un conducteur se représente son environnement avant de prendre sa décision. Comme nous l'avons présenté au chapitre précédent, en termes de représentation de l'environnement, les travaux existants sont fondés sur les deux théories suivantes : les représentations allo-centrées et ego-centrées [Wang *et al.*, 2005, Cohn et Renz, 2008].

Dans la réalité, le conducteur « découvre » les situations au fur et à mesure qu'il se déplace. Il a besoin de savoir ce qui se passe autour de lui pour prendre une décision (aller tout droit, changer de voie à gauche ou à droite). Il se représente les autres conducteurs par rapport à sa position (devant, à ma gauche, à ma droite, la distance qui me sépare de celui qui est juste devant, etc.). De ce point de vue, une représentation ego-centrée est donc plus intuitive dans le contexte de la simulation de trafic, pour laquelle nous avons besoin d'avoir une représentation contextuelle et dynamique de ce qui se passe autour de l'agent. De plus, la représentation ego-centrée est adaptée aux contextes dynamiques car le nombre de relations entre l'agent et les entités perçues à mettre à jour est moins élevé que dans le cas de la représentation allo-centrée.

Ces relations spatiales qualitatives entre les entités fournissent ainsi une description spatiale de l'environnement [Condotta, 2000]. Elles peuvent être de plusieurs types. Nous pouvons citer les relations d'ordre directionnelles [Ligozat, 1998], comme par exemple « un objet est à gauche d'un autre

## 3.2. MODÈLE D'INTERACTION AVEC L'ENVIRONNEMENT

---

objet ». Ces relations ont été par la suite complétées par des relations d'orientation [Freksa, 1992], où l'espace est découpé en zones (zone avant, zone arrière, zone devant tout droit, zone devant à droite, etc.). Il existe aussi des relations d'ordre topologique comme « un objet touche un autre objet ». Nous pouvons citer, dans ce cadre, le calcul RCC (« *Region Connection Calculus* ») considéré comme l'un des formalismes spatiaux les plus étudiés des dernières années [Randell et Cohn, 1989]. Il existe aussi d'autres types de relations spatiales qualitatives telles que des relations concernant la distance [Hernández *et al.*, 1995]. Nous pouvons aussi citer la représentation 2D-PIR [Nabil *et al.*, 1995] (acronyme de « *2D Projection Interval Relationship* ») qui permet d'exprimer à la fois des relations directionnelles et topologiques. Dans cette représentation, les auteurs combinent des relations topologiques et les relations d'intervalles d'Allen afin de construire une représentation symbolique des relations spatiales. Appliquées au domaine du trafic routier, ces relations peuvent par exemple correspondre à l'énoncé : « le véhicule X est en travers sur ma voie », « le véhicule Y est sur la voie adjacente de gauche », etc.

[El Hadouaj *et al.*, 2000] ont utilisé une représentation ego-centrée de l'environnement dans le cadre de la simulation de trafic. Ces derniers définissent une représentation de l'environnement fondée sur les voies de circulation. Ces voies correspondent aux voies physiques données par le marquage au sol. Ce type de représentation ne permet pas d'identifier les espaces libres sur la chaussée (autre que les espaces vides sur les voies physiques) ni de reproduire les pratiques observées en termes d'occupation de l'espace dans la simulation comme, par exemple, le comportement des deux-roues motorisés. L'idée est d'avoir une représentation de l'environnement qui prend en compte les contraintes physiques de l'environnement, le contexte routier, les objectifs et les besoins du conducteur. Plus précisément, une représentation composée des possibilités offertes par l'environnement en termes d'occupation de l'espace, qui dépend des caractéristiques individuelles de la personne qui se construit la représentation et qui prend en compte les caractéristiques physiques du véhicule.

### 3.2.2 Les voies virtuelles

#### 3.2.2.1 Le concept des voies virtuelles

Le fait que l'infrastructure soit structurée « physiquement » par le biais du marquage au sol, n'empêche pas les conducteurs de surcharger la structure proposée en redéfinissant l'espace en fonction de leur but et du contexte routier. Nous considérons que chaque agent peut « plaquer » sur l'infrastructure existante une structure qui répond à ses besoins et qui correspond, de ce fait, à sa propre interprétation de la situation. C'est le concept des « voies virtuelles » utilisé par [Bonte *et al.*, 2006].

Nous proposons d'utiliser ce concept pour structurer l'environnement [Ksontini *et al.*, 2012c]. Ces voies virtuelles correspondent aux affordances qui s'offrent à l'agent en termes de possibilités d'occupation de l'espace au sol. Les affordances identifiées serviront à construire une représentation ego-

## CHAPITRE 3. REPRÉSENTATION EGO-CENTRÉE DE L'AGENT FONDÉE SUR LES AFFORDANCES

---

centrée dynamique et contextuelle de l'environnement fondée sur les différentes possibilités offertes par l'interaction entre les différents usagers de la route et l'environnement routier.

Les agents n'interprètent pas les possibilités offertes par l'environnement de la même manière. De ce fait, ils peuvent ne pas avoir la même représentation d'une même situation routière. Par exemple, pour une même situation, un automobiliste et un motocycliste ne vont pas interpréter de la même manière les espaces libres qui peuvent émerger sur la chaussée. Ceci est essentiellement dû à la différence de taille et de mobilité de chaque véhicule. Par conséquent, ces deux usagers ne vont pas avoir la même représentation de l'environnement. Une illustration de cet exemple a été présentée par [Bonte *et al.*, 2006] (figure 3.2). La figure (a) décrit une situation routière avec trois voies de circulation. La situation (b) présente la situation du point de vue d'une voiture et la situation (c) du point de vue d'un deux-roues motorisés. Nous pouvons constater à travers ces figures, que selon la situation routière, les représentations peuvent être différentes d'un agent à un autre. Pour la situation (b), vue la taille du véhicule, l'agent perçoit trois voies physiques occupées. Par contre, pour la situation (c), l'agent perçoit trois voies occupées par les autres véhicules perçus mais aussi deux voies libres en inter-files.

Pour représenter les espaces libres, [Bonte *et al.*, 2006] utilisent un autre type de voie : les voies virtuelles. Le choix du terme « virtuelle » vient du fait que ces voies n'existent pas physiquement sur la route à travers le marquage au sol. Elles sont propres à chaque individu et liées à une situation particulière et elles ne sont pas considérées par le Code de la Route en tant que voie de circulation. [Bonte *et al.*, 2006] donnent la définition suivante des voies virtuelles :

**Définition 3.1** *Voie Virtuelle : Couloir de circulation construit grâce aux bords de la route et/ou aux bords des véhicules présents dans le champ de vision de l'acteur et qui ne correspond pas au marquage au sol.*

Dans le cadre de notre modèle, nous avons utilisé cette notion de voie pour la modélisation de notre environnement. Nous postulons que les agents se déplacent dans l'environnement routier en suivant des voies. Comme pour [Bonte *et al.*, 2006], dans notre modèle aussi, les voies sont virtuelles. Étant donné que nous nous intéressons à la problématique de l'occupation de l'espace au sol, en prenant en compte les pratiques observées dans la réalité, la notion de voie virtuelle se prête bien à ce type de problématique. Ces voies virtuelles sont le résultat des interactions des différents usagers de la route avec l'environnement.

Nous présentons, dans la section suivante, la caractérisation des voies virtuelles telle que nous l'utilisons dans notre modèle et les différentes propriétés introduites dans la modélisation.

### 3.2.2.2 Caractérisation des voies virtuelles dans notre modèle

Nous reprenons le concept utilisé par [Bonte *et al.*, 2006] des voies virtuelles afin de restructurer l'espace routier. Dans cette section, nous présentons uniquement les différentes propriétés retenues

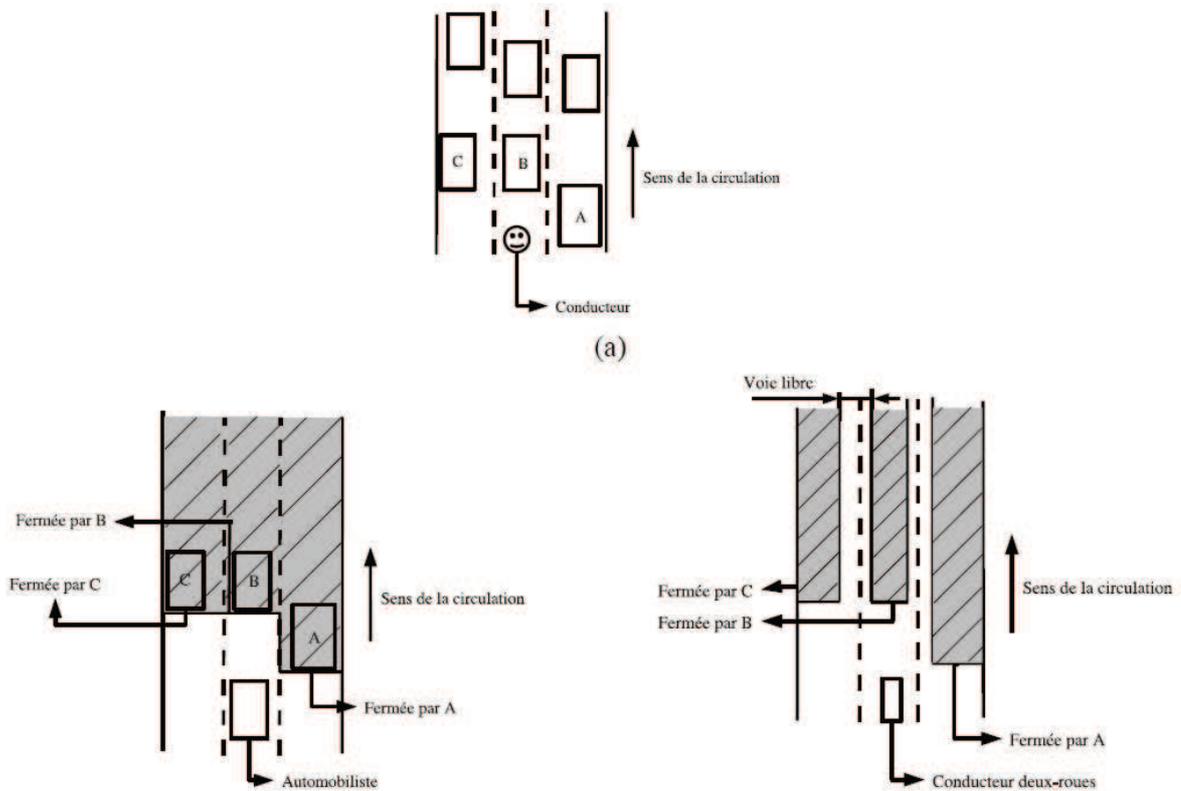


FIGURE 3.2: (a) Route congestionnée où un conducteur doit se représenter la situation. (b) Point de vue d'un automobiliste sur la route congestionnée. (c) Point de vue d'un conducteur deux-roues sur la route congestionnée [Bonte *et al.*, 2006]

des voies virtuelles. La démarche d'identification des voies virtuelles sera présentée dans la section 3 de ce chapitre. Les propriétés identifiées permettent de caractériser et d'évaluer les voies virtuelles émergentes.

Chaque voie virtuelle est désignée par le terme  $VV_i$ , où  $i$  désigne l'indice de la voie, et elle est caractérisée par un ensemble de propriétés donné par  $P_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iq}\}$ . Ces propriétés peuvent être classées en trois familles : des propriétés physiques, des propriétés liées aux flux et des propriétés de l'environnement adjacent à gauche et à droite, appelé l'effet paroi.

Dans ce qui suit, nous allons définir les différentes propriétés des voies retenues dans le cadre de notre modèle.

#### a) Les propriétés physiques

Les propriétés physiques d'une voie correspondent aux propriétés permettant de délimiter l'espace physique occupé par cette voie. Chaque voie est définie par :

- une position de début  $pd$ ,

### CHAPITRE 3. REPRÉSENTATION EGO-CENTRÉE DE L'AGENT FONDÉE SUR LES AFFORDANCES

- une position de fin  $pf$ ,
- une largeur  $larg$  donnée soit par la largeur entre deux véhicules ou le bord de la route et un véhicule soit par la largeur du véhicule qui occupe l'espace,

$$larg = pf - pd$$

- une longueur  $long$  ou une profondeur donnée par la distance à l'obstacle. En d'autres termes, la longueur d'une voie est donnée par la distance à laquelle elle reste accessible (avant de rencontrer un obstacle tel qu'un autre véhicule ou avant la fermeture de la voie).

Pour illustrer ces propriétés, nous considérons deux exemples. Dans le premier (figure 3.3), nous avons l'ensemble des voies virtuelles identifiées par l'agent  $a_1$ , conducteur d'un deux-roues motorisés et données par :  $VV_1, VV_2, VV_3, VV_4$  et  $VV_5$ . Prenons l'exemple de la voie virtuelle  $VV_3$ , sa largeur est donnée par l'espace disponible entre les deux véhicules formant cette voie et sa longueur est donnée par la distance qui sépare l'obstacle ( $a_4$ ) de l'agent qui calcule les voies virtuelles ( $a_1$ ).

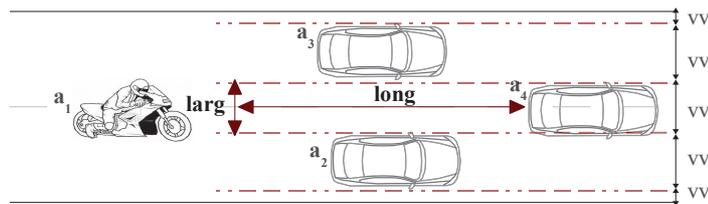


FIGURE 3.3: Illustration des propriétés d'une voie

Le deuxième exemple illustre une situation de fermeture de voie (figure 3.4). Les voies virtuelles sont calculées du point de vue de l'agent  $a_1$ . La largeur de la voie virtuelle sur laquelle se trouve l'agent est donnée par la largeur de la voie physique (pas de possibilité d'identifier des voies virtuelles en inter-files) et la longueur de la voie est donnée par la distance qui sépare le véhicule  $a_1$  et la fermeture de la voie.

#### b) Les propriétés liées au flux

Les propriétés liées au flux correspondent à une caractérisation du trafic parcourant la voie. Ces propriétés permettent de calculer les caractéristiques de flux d'une voie afin de pouvoir anticiper l'évolution de la situation du trafic routier. Elles sont données par :

- la densité du trafic  $d$  donnée par le nombre de véhicules circulant sur la voie en question,
- la vitesse moyenne pratiquée par les véhicules  $v_{moy}$ ,

### 3.2. MODÈLE D'INTERACTION AVEC L'ENVIRONNEMENT

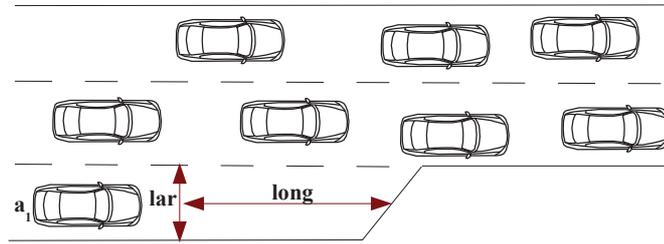


FIGURE 3.4: Illustration des propriétés d'une voie

- l'écart type de la vitesse pratiquée  $\sigma$  qui mesure la distribution de vitesse des véhicules qui roulent sur la voie et par conséquent la stabilité du trafic en termes de vitesse. Un écart type élevé signifie que le trafic est instable, donc non prévisible.

#### c) Les propriétés liées à l'effet paroi

En plus des caractéristiques physiques et celles liées au flux, nous avons aussi retenu d'autres propriétés, qui à notre sens sont importantes pour caractériser une voie d'autant plus qu'elles ont un impact sur le comportement de l'agent. Ces propriétés sont liées à ce que nous appelons « l'effet paroi ».

**Définition 3.2** *L'effet paroi d'une voie est défini par l'impact que peut avoir les voies adjacentes ou l'environnement adjacent, tel que le bord de la route ou la présence d'un poids-lourd sur la voie adjacente, sur le comportement d'un conducteur.*

Des travaux en psychologie de la conduite mettent en évidence l'impact de cet effet sur la vitesse pratiquée par le conducteur ainsi que son positionnement latéral sur les voies [Tornros, 1998, Lewis-Evans et Charlton, 2006]. L'effet paroi représente l'impact de l'environnement adjacent (voies adjacentes ou le bord de la route) sur le comportement du conducteur. Il peut être lié aux caractéristiques de l'infrastructure (largeur des voies, les murs d'un tunnel, etc.) ou au contexte routier (l'effet de l'existence de poids-lourd sur les voies adjacentes, la variabilité des vitesses sur les voies adjacentes, etc.). Par exemple, dans les deux situations illustrées par la figure 3.5, le conducteur  $a_1$  n'a pas le même comportement en termes de vitesse et de positionnement dans le cas (a) et dans le cas (b). Il est plus gêné par le poids-lourd à côté de lui, dans la première situation, il aura tendance à vouloir s'écarter de lui et le dépassera avec un différentiel de vitesses pas très élevé. Dans la deuxième situation, il est moins gêné par la moto sur la voie adjacente qui occupe moins d'espace.

## CHAPITRE 3. REPRÉSENTATION EGO-CENTRÉE DE L'AGENT FONDÉE SUR LES AFFORDANCES

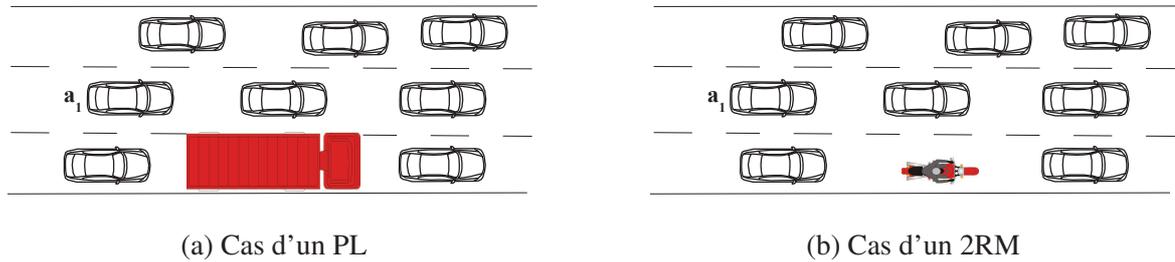


FIGURE 3.5: Effet paroi lié à la voie adjacente

Nous postulons que l'impact des parois dépend de plusieurs paramètres tels que la proximité avec les véhicules voisins, la dangerosité et la stabilité en termes de vitesse. La vitesse pratiquée par un conducteur dépend de ces paramètres s'agissant de voies « physiques » ou de voies « virtuelles ». Rappelons que plus la différence de vitesses est importante, plus le conducteur a besoin d'espace latéral pour passer.

Les caractéristiques des parois que nous avons retenues sont :

- la vitesse de la paroi  $v_{paroi}$  : pour chaque paroi, nous définissons une vitesse propre, c'est la vitesse du véhicule le plus lent de la file qui définit la paroi, ou une vitesse de 0 s'il s'agit d'un bord de route,
- la stabilité  $s_{paroi}$  : la stabilité des parois est donnée par la différence entre les vitesses moyennes de chaque paroi (la vitesse moyenne d'une paroi est donnée par la moyenne des vitesses des véhicules formant cette paroi). Nous postulons que plus les vitesses des parois gauche et droite sont identiques et plus l'effet paroi peut être considéré comme stable,
- la proximité : La proximité des parois traduit l'espace disponible entre le véhicule considéré et les bords de la voie. Cet espace influe sur la vitesse à laquelle un conducteur peut passer. Les études en psychologie de la conduite montrent que plus l'espace est réduit, plus la vitesse du véhicule diminue. Nous définissons une proximité à gauche  $p_g$  traduisant l'espace disponible entre le véhicule considéré et le bord gauche de la voie, et de la même manière, une proximité à droite  $p_d$ ,
- la dangerosité : la dangerosité des parois est déterminée par la composition des parois (type de bordure de voie - talus, mur, etc. - pour le cas de bord de route, existence de poids-lourds dans la file composant la paroi - pour le cas des parois « véhicules »).

### 3.2.3 Affordances et voies virtuelles

Dans ce chapitre, nous souhaitons répondre à la problématique suivante : comment reconnaître et mieux représenter une situation de trafic afin que les agents aient un comportement réaliste en termes d'occupation de l'espace. Nous considérons que les espaces qu'un agent peut occuper émergent de l'interaction des usagers présents sur la chaussée avec l'environnement routier.

### 3.2. MODÈLE D'INTERACTION AVEC L'ENVIRONNEMENT

Nous proposons d'utiliser le concept des affordances afin d'identifier les actions possibles offertes par l'environnement en termes d'occupation de l'espace. Ce concept s'adapte bien à la problématique de l'occupation de l'espace et nous proposons de l'adapter à la simulation de trafic routier. Dans le cadre de notre application, les agents suivent des voies pour se déplacer. Nous avons conservé cette notion de voie de déplacement dans notre modélisation de l'environnement et nous considérons que les affordances correspondent aux voies possibles qui émergent à partir des interactions entre les usagers et l'environnement. Les affordances identifiées permettent à l'agent de se construire une représentation ego-centrée de l'environnement orientée vers les actions possibles. L'application de la théorie des affordances à la simulation multi-agent a le potentiel d'aboutir à des agents qui peuvent être considérés comme plus situés. Les interactions avec l'environnement jouent un rôle important dans la prise de décision des agents.

Dans cette section, nous proposons un modèle d'interaction avec l'environnement fondé sur le concept d'affordance. Ce modèle permet d'avoir une vision globale de notre approche avant de détailler notre modèle d'agent. Nous présentons ainsi les concepts généraux de notre approche (figure 3.6).

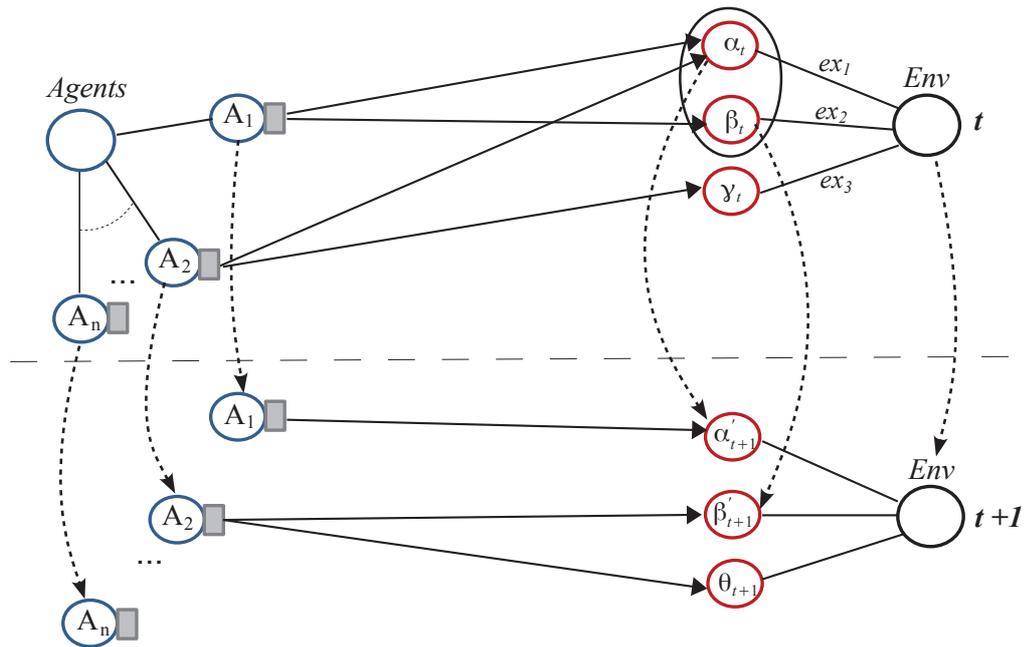


FIGURE 3.6: Modèle d'interaction avec l'environnement

L'environnement est composé d'agents et d'entités ou objets. Ces derniers peuvent correspondre aux objets routiers présents sur la chaussée tels que les équipements, les panneaux, les marquages, etc. L'environnement est dynamique et complexe, il varie au cours du temps. La prise de décision dépend donc fortement du contexte et doit s'adapter aux changements de l'environnement. D'une manière gé-

## CHAPITRE 3. REPRÉSENTATION EGO-CENTRÉE DE L'AGENT FONDÉE SUR LES AFFORDANCES

---

nérale, les entités présentes dans l'environnement peuvent offrir différentes possibilités d'action aux agents ; c'est ce que nous appelons les affordances. Ces dernières peuvent être différentes d'un agent à un autre. Elles dépendent fortement du contexte, des capacités et des objectifs des agents. Nous optons dans cette thèse pour une version étendue du concept d'affordance en incluant l'aspect cognition dans l'identification de celles-ci. Le modèle d'interaction avec l'environnement est décrit par la figure 3.6. Les agents raisonnent sur les informations perçues afin d'identifier les possibilités en termes d'action qui s'offrent à eux. Pour cela, ils disposent de fonctions d'extraction notées  $ex_1, ex_2$ , etc., qui permettent d'identifier les entités qui peuvent correspondre à ces possibilités à partir de l'environnement. Ces entités sont désignées par  $\alpha, \beta, \gamma$ , etc. L'agent raisonne ensuite sur ces éléments identifiés afin de déterminer l'ensemble des affordances. Ces dernières peuvent correspondre aux  $\alpha, \beta, \gamma$ , etc. et/ou à des compositions de ces éléments. L'environnement est dynamique et les affordances dépendent du contexte. Elles sont donc spécifiques à un instant donné  $t$  et peuvent changer à  $t + 1$ .

Plus concrètement, pour la problématique de l'occupation de l'espace au sol, les agents identifient un ensemble d'intervalles libres et occupés (donnés par les positions et les caractéristiques physiques des entités perçues). Ces intervalles correspondent aux éléments désignés par  $\alpha, \beta, \gamma$ . Par exemple, à l'instant  $t$ , l'agent  $A_1$  identifie les intervalles  $\alpha$  et  $\beta$ . L'agent  $A_2$  identifie les intervalles  $\alpha$  et  $\gamma$ . Les agents raisonnent ensuite sur ces intervalles afin de les évaluer et de déterminer s'ils correspondent bien à des possibilités d'actions en termes d'occupation de l'espace. Pour cela, ils utilisent les relations d'Allen [Allen, 1981] sur les intervalles pour les comparer et les restructurer et identifier au final des voies virtuelles qui désignent les affordances (processus illustré par les rectangles grisés au niveau des agents). Ce traitement permet à l'agent  $A_1$  d'identifier l'affordance donnée par la composition de  $\alpha$  et  $\beta$  et à l'agent  $A_2$  d'identifier les affordances  $\alpha$  et  $\gamma$ .

Dans la suite du chapitre, nous détaillons le modèle d'agent et les différentes étapes permettant d'identifier les affordances et de construire la représentation ego-centrée de l'environnement.

### 3.3 Un modèle d'agent fondé sur les affordances

Dans cette partie, nous développons un modèle d'agent permettant de modéliser le comportement de l'occupation de l'espace. Le modèle proposé repose sur l'utilisation du concept d'affordance afin d'identifier les possibilités offertes par l'environnement en termes d'occupation de l'espace [Ksontini *et al.*, 2013].

La section suivante vise à présenter l'architecture d'agent et les différents modules qui la composent. Nous décrivons les différentes étapes permettant à l'agent de prendre une décision en termes d'occupation de l'espace au sol.

#### 3.3.1 Architecture de l'agent

L'architecture d'agent s'appuie sur le pattern Perception-Décision-Action du modèle de prise de décision standard (figure 3.7). La perception se fait en deux étapes : l'identification des affordances et la construction d'une représentation ego-centrée de l'environnement.

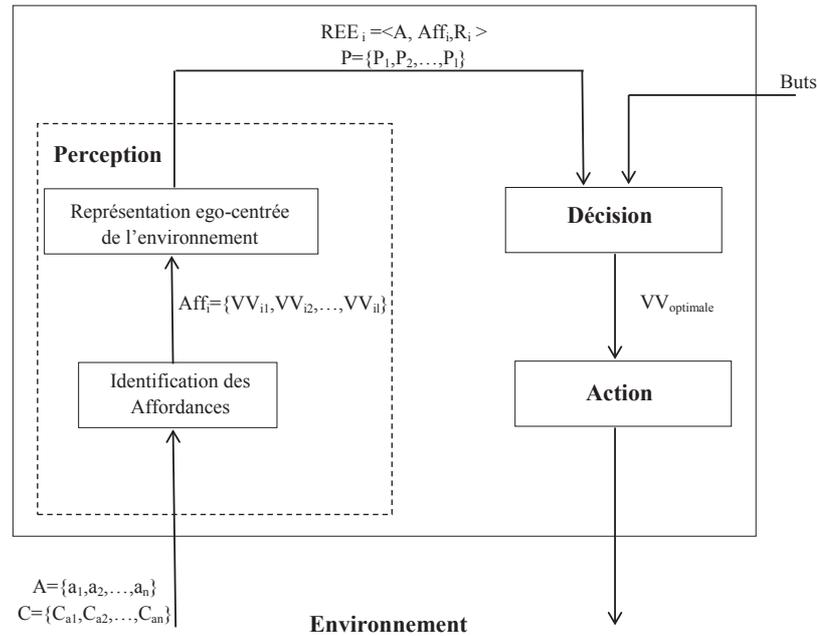


FIGURE 3.7: Architecture de l'agent

L'agent perçoit les entités qui se trouvent autour de lui à une certaine distance de vision d'une manière ego-centrée. A partir des informations perçues, il identifie la liste des affordances résultantes des interactions des entités avec l'environnement. Par la suite, l'agent se construit une représentation ego-centrée de l'environnement autour de lui. Cette représentation est fondée sur les affordances identifiées et permet de synthétiser les informations perçues conformément aux possibilités en termes d'action afin de faciliter le choix entre ces affordances.

Dans notre modélisation des affordances, nous utilisons une version étendue de ce concept. Cette version a été enrichie par la prise en compte de la cognition. Ainsi, les affordances, dépendent des contraintes de l'environnement en plus des capacités mentales de l'agent. Nous prenons en compte l'interprétation situationnelle de l'environnement par l'agent. Afin d'identifier les opportunités offertes par l'interaction des entités perçues avec l'environnement, l'agent prend en compte le contexte, les propriétés des autres agents et ses propres caractéristiques (capacités, intentions, buts, caractéristiques comportementales telles que la distance à la norme).

Dans ce qui suit, nous détaillons les différents modules développés dans notre modèle.

### 3.3.2 La perception

Dans le cadre de notre modèle, nous nous plaçons dans les conditions suivantes :

**Définition 3.3** Soit un système multi-agent composé d'un ensemble d'agents  $\mathcal{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_{|\mathcal{A}|}\}$  plongé dans un environnement  $\mathcal{E}$ . Chaque agent  $a_i$  de  $\mathcal{A}$  est caractérisé par l'ensemble de ses caractéristiques individuelles  $C_i$ . Il perçoit les autres agents situés autour de lui et un certain nombre de leurs caractéristiques. Ils sont donnés par :

- un sous-ensemble de  $\mathcal{A}$  donné par  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  représentant les agents perçus,
- un ensemble  $C^p = \{C_{a_1}^p, C_{a_2}^p, \dots, C_{a_n}^p\}$  des caractéristiques perçues, chaque  $C_{a_j}^p$  est l'ensemble des propriétés décrivant chaque agent  $a_j$  de  $A$  et il est donné par  $C_{a_j}^p = \{c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jm}\}$ .

A partir de la liste des agents perçus et de leurs interactions avec la configuration de la route, l'agent  $a_i$  identifie l'ensemble des affordances autour de lui, donnée par  $Aff_i = \{VV_{i1}, VV_{i2}, \dots, VV_{il}\}$ . L'identification des affordances nécessite un traitement cognitif des informations perçues afin de déterminer les possibilités offertes à l'agent en termes d'occupation de l'espace. Ce processus de traitement permet de vérifier que l'affordance perçue correspond réellement à une action possible. Ceci est effectué à l'aide d'une fonction de gain, notée *Gain*, qui permet d'évaluer une possibilité potentielle. Le résultat de cette étape est une représentation ego-centrée de l'environnement, notée  $REE_i$ , construite par l'agent  $i$  et composée par les affordances identifiées et l'ensemble des caractéristiques de ces dernières (noté  $P$ ). Ces affordances correspondent aux différentes possibilités d'occupation de l'espace. Chaque affordance  $VV_{ij}$  est caractérisée par un ensemble de propriétés donné par  $P_j = \{p_{j1}, p_{j2}, \dots, p_{jq}\}$ . Cet ensemble a été spécifié dans la section 3.2.2.2.

Cette représentation ego-centrée correspond à une représentation mentale explicite de la situation. Elle est propre à chaque agent. Pour sa prise de décision, l'agent utilise la représentation qu'il s'est construite de l'environnement. Pour ce faire, il évalue la liste des affordances identifiées et choisit la meilleure. Notons que les ensembles correspondant à chaque représentation ego-centrée  $REE_i$  dépendent de l'agent qui effectue le raisonnement. Les détails de ce processus ainsi que les différents ensembles introduits sont décrits dans les sections suivantes.

#### 3.3.2.1 Définition des affordances

Comme nous l'avons spécifié précédemment, une affordance correspond à une possibilité d'occupation de l'espace qui résulte de l'interaction entre les entités perçues et la configuration routière. Habituellement, les conducteurs se déplacent dans l'environnement en suivant les voies de circulation. Dans la plupart des modèles de simulation de trafic, ces voies correspondent aux voies physiques définies par le marquage au sol.

Afin de mieux prendre en compte les pratiques des conducteurs en termes d'occupation de l'espace, nous supposons que les agents conducteurs ne se déplacent pas, nécessairement, en respectant

### 3.3. UN MODÈLE D'AGENT FONDÉ SUR LES AFFORDANCES

---

ces voies physiques. Ils occupent l'espace selon ce que l'environnement leur offre comme possibilités en prenant en compte les caractéristiques des entités perçues ainsi que leurs propres caractéristiques individuelles.

**Définition 3.4** *Une affordance correspond à une possibilité d'occupation de l'espace au sol. Elle dépend du contexte mais aussi des capacités physiques et mentales de l'agent en question. Plus concrètement, elle correspond à une voie virtuelle et/ou physique permettant in fine une possibilité d'occuper un emplacement sur la chaussée. L'affordance  $j$  de l'agent  $i$  est donnée par la voie  $VV_{ij}$ .*

$$aff_{ij}(\mathcal{E}, C_i, C^p) = VV_{ij}$$

Les caractéristiques des agents sont de deux types : physiques et mentales. Les caractéristiques physiques peuvent, par exemple, correspondre à la position, la vitesse de déplacement, le type du véhicule, la taille du véhicule, etc. Les caractéristiques mentales correspondent à la distance par rapport à la réglementation, le niveau d'expérience, etc.

Nous pouvons considérer que certaines pratiques d'occupation de l'espace, que nous pouvons observer dans la réalité, telles que le faufilement entre les files de véhicules ne correspondent pas à des comportements normatifs dans la mesure où l'agent ne respecte pas le marquage au sol.

Le fait de prendre en compte les caractéristiques individuelles des agents, telles que sa distance à la réglementation ou son niveau d'expérience, permet d'avoir de l'hétérogénéité au niveau des comportements. Par exemple, un espace donné n'offre pas les mêmes possibilités à un agent qui conduit un deux-roues motorisés et à un agent qui conduit un poids-lourd. De plus, un même espace n'offre pas les mêmes opportunités pour un agent qui a un comportement normatif, c'est à dire qui ne considère pas les espaces en inter-files comme une alternative possible, et un autre dont le comportement n'est pas normatif.

Pour notre modèle, nous avons choisi de conserver cette notion de voies de circulation pour le déplacement des agents et la structuration de l'espace. Par conséquent, les affordances correspondent aux voies virtuelles offrant des possibilités d'occupation de l'espace. Elles ont des caractéristiques permettant de les évaluer par la suite et faire un choix de déplacement. Ces caractéristiques sont données par : la largeur, la longueur (la profondeur ou la distance à l'obstacle), la vitesse moyenne, la vitesse des parois, etc.

Dans le cadre de notre application, nous postulons que le nombre d'affordances ne peut pas dépasser 5. Les affordances correspondent aux possibilités suivantes :

- Rester sur sa propre voie
- Aller vers la gauche pour atteindre une voie adjacente (changement de voie vers la gauche)
- Aller vers la droite pour atteindre une voie adjacente (changement de voie vers la droite)
- Aller vers la gauche pour atteindre un espace plus loin à gauche (changement de voie vers la gauche pour atteindre une voie plus loin que la voie adjacente)

## CHAPITRE 3. REPRÉSENTATION EGO-CENTRÉE DE L'AGENT FONDÉE SUR LES AFFORDANCES

---

- Aller vers la droite pour atteindre un espace plus loin à droite (changement de voie vers la droite pour atteindre une voie plus loin que la voie adjacente)

Les deux dernières possibilités représentent l'existence d'opportunités « atteignables » vers la droite ou vers la gauche, au delà des voies adjacentes. Ces voies ne sont pas nécessairement doublement adjacentes (adjacentes aux voies adjacentes). Elles désignent des voies qui sont atteignables par une succession de manoeuvres de changement de voies. Elles permettent, par exemple, d'indiquer une option favorable atteignable au prix de changements de voies parfois défavorables. Ces alternatives nous permettent de prendre en compte non seulement l'environnement adjacent mais aussi des possibilités qui se situent plus loin permettant d'avoir une perception plus étendue de l'environnement dans lequel sont plongés les agents.

Ce choix est fondé sur l'analyse suivante. Dans une situation routière donnée, et en situation d'interaction, le conducteur a le choix entre rester sur sa voie et s'adapter à la contrainte, et changer de voie à gauche ou à droite. Pour effectuer ses manoeuvres de changement de voies, il a besoin d'avoir de l'information sur ce qui se passe en longitudinal (sur sa propre voie) et en latéral (les voies directement adjacentes à gauche et à droite). D'où la nécessité d'avoir une représentation du contexte sur ces trois voies. De plus, un conducteur a besoin d'avoir de l'information plus loin que l'environnement adjacent afin de pouvoir détecter des options plus favorables non atteignables directement mais par itérations de manoeuvres. Ces alternatives permettent de prendre en compte non seulement l'environnement adjacent mais aussi des possibilités plus éloignées permettant d'avoir une perception plus étendue de l'environnement des agents. Le changement de voie peut donc être une solution immédiate à la contrainte, ou une étape transitoire vers cet objectif, et ce dans le cas où le conducteur essaye d'atteindre une voie « favorable » en empruntant des voies « non favorables ».

L'ensemble  $Aff_i = \{VV_{i1}, VV_{i2}, \dots, VV_{il}\}$ , avec  $l \leq 5$ , donne la liste des affordances identifiées par l'agent  $a_i$ , où chaque affordance correspond à une voie virtuelle possible. La détermination des affordances est effectuée à travers un parcours de l'espace autour de l'agent en partant de l'environnement le plus proche et en allant vers le plus éloigné.

### 3.3.2.2 Mécanisme d'identification des affordances

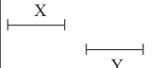
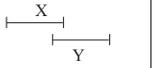
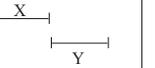
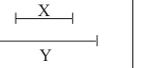
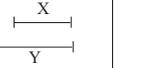
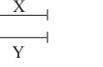
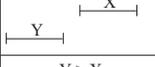
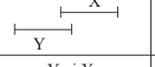
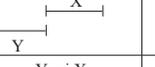
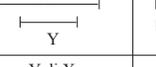
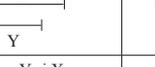
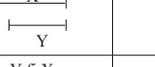
Nous présentons, dans ce qui suit, les différentes étapes permettant à l'agent de déterminer la liste des affordances. A partir de la liste des agents perçus, ordonnés selon leur position latérale à partir du bord droit de la route jusqu'au bord gauche, l'agent identifie l'ensemble des intervalles virtuels  $IV_i = \{iv_{i1}, iv_{i2}, \dots, iv_{im}\}$ . Un intervalle virtuel  $iv_{ij}$  est caractérisé par une largeur *larg* et est défini soit par l'espace disponible entre deux véhicules ou un véhicule et le bord de la route, soit par l'espace occupé par un véhicule. A cette étape, il peut y avoir des intervalles qui se chevauchent ou un intervalle inclus dans un autre dû à la position des véhicules sur la chaussée. Afin d'identifier les intervalles libres de ceux qui sont occupés, nous allons nous inspirer des relations entre intervalles proposées par Allen [Allen, 1981] pour raisonner sur la construction des intervalles virtuels.

### 3.3. UN MODÈLE D'AGENT FONDÉ SUR LES AFFORDANCES

[Allen, 1981] a défini un modèle permettant de décrire tous les positionnements relatifs possibles entre deux intervalles temporels le long d'un axe. Ces positionnements sont modélisés à l'aide de relations temporelles énumérant toutes les relations possibles entre deux intervalles.

Soient deux intervalles  $X$  et  $Y$ , les relations introduites par Allen pour raisonner sur les intervalles sont décrits au tableau suivant :

TABLE 3.2: Les relations d'Allen entre deux intervalles

Précède	Chevauche	Rencontre	Dans	Début	Termine	Égal
						
$X < Y$	$X o Y$	$X m Y$	$X d Y$	$X s Y$	$X f Y$	
Suit	chevauché par	Rencontré par	Contient	Débuté par	Terminé par	
						$X = Y$
$Y > X$	$Y oi X$	$Y mi X$	$Y di X$	$Y si X$	$Y fi X$	

Dans notre modèle, nous adaptons ces relations à une représentation spatiale afin de permettre à l'agent d'identifier et de restructurer les intervalles virtuels. Ces relations sont utiles pour identifier les relations de conflit qui peuvent exister entre les intervalles spatiaux. Par exemple, deux intervalles construits chacun à partir d'une largeur d'un véhicule qui se chevauchent doivent être fusionnés en un seul intervalle occupé. Les intervalles libres et occupés résultants doivent couvrir la largeur de la route. Par conséquent, deux intervalles adjacents doivent en final avoir une relation « rencontre ».

L'agent commence par identifier les intervalles formés par les espaces libres et occupés par des véhicules. Chaque intervalle  $X$  est caractérisé par une largeur donnée par la fonction  $larg(X)$ . De plus, chaque intervalle a une position de début donnée par  $pd(X)$  et une position de fin donnée par  $pf(X)$ . Pour les intervalles occupés, nous définissons une distance à l'obstacle qui sépare l'agent calculant les intervalles et le véhicule occupant l'intervalle. Cette distance est donnée par  $dist(a_i, X)$  (figure 3.8).

Les relations d'Allen permettent de caractériser la relation qui lie deux intervalles qui se succèdent. Sur la base de ces relations, l'agent identifie les intervalles qui peuvent poser problème et qui correspondent aux cas suivants :

- deux intervalles se chevauchent,
- un intervalle contient un autre,
- un intervalle débute avec un autre,
- un intervalle se termine avec un autre.

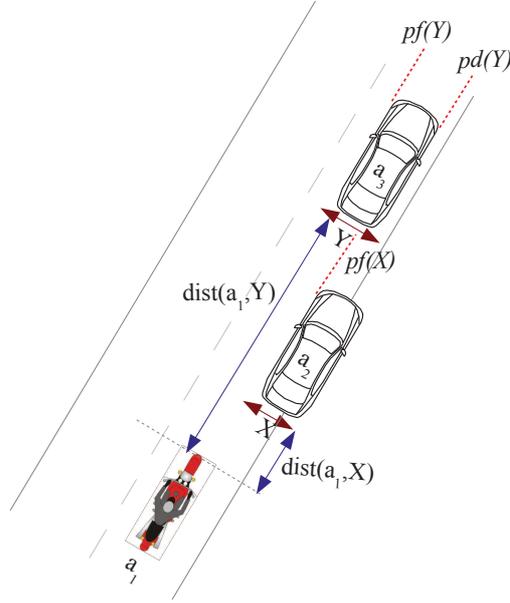


FIGURE 3.8: Caractérisation des intervalles

Les relations inverses sont définies de manière équivalente. L'ensemble des règles est donné par :

- (i) Si deux intervalles  $X$  et  $Y$  se chevauchent, l'agent doit les fusionner pour en considérer un seul :

$$(X o Y) \wedge (larg(a_i) > (pf(Y) - pf(X))) \rightarrow fusionner(X, Y)$$

$$(X oi Y) \wedge (larg(a_i) > (pd(Y) - pd(X))) \rightarrow fusionner(X, Y)$$

- (ii) Si un intervalle  $X$  contient un intervalle  $Y$  alors l'agent conserve dans l'ensemble des intervalles, celui qui a la largeur la plus grande :

$$(X d Y) \wedge (larg(X) < larg(Y)) \rightarrow IV - \{X\}$$

$$(X di Y) \wedge (larg(X) > larg(Y)) \rightarrow IV - \{Y\}$$

- (iii) Si un intervalle  $X$  commence un intervalle  $Y$  (ou inversement), la règle est de conserver l'intervalle le plus large :

$$(X s Y) \wedge (larg(X) < larg(Y)) \rightarrow IV - \{X\}$$

$$(X si Y) \wedge (larg(X) > larg(Y)) \rightarrow IV - \{Y\}$$

- (iv) Si un intervalle  $X$  finit un intervalle  $Y$  (ou inversement), la règle est de conserver l'intervalle ayant la largeur la plus importante :

$$(X f Y) \wedge (larg(X) < larg(Y)) \rightarrow IV - \{X\}$$

$$(X fi Y) \wedge (larg(X) > larg(Y)) \rightarrow IV - \{Y\}$$

### 3.3. UN MODÈLE D'AGENT FONDÉ SUR LES AFFORDANCES

(v) Si un intervalle  $X$  est égal à un intervalle  $Y$ , l'agent conserve l'intervalle le plus proche de lui :

$$(X = Y) \wedge (dist(a_i, X) < dist(a_i, Y)) \rightarrow IV - \{Y\}$$

Pour mieux illustrer ce raisonnement, nous prenons l'exemple de la figure 3.8. Dans cet exemple, nous avons un agent  $a_2$  mal garé, un deuxième agent  $a_3$  se trouvant sur la voie 1 de circulation et un deux-roues motorisé  $a_1$ . Le raisonnement est effectué par l'agent  $a_1$ . Dans ce cas de figure, il y a deux intervalles,  $X$  et  $Y$ , qui se chevauchent. L'agent applique la première règle de fusion d'intervalles pour résoudre le conflit de représentation spatiale. Étant donné que l'espace libre ( $pf(Y) - pf(X)$ ) n'est pas suffisant pour permettre au deux-roues motorisé de poursuivre sa trajectoire, l'agent  $a_1$  considère que les intervalles  $X$  et  $Y$  correspondent, au final, à un seul intervalle occupé par les deux véhicules et fusionne les deux intervalles pour en garder un seul. Il faut noter que la position de début de l'intervalle  $X$  ne sera pas le bord droit du véhicule mais plutôt le bord de la route étant donné que le véhicule est mal garé et qu'il déborde sur le bord de la route.

L'ensemble des intervalles sera donc donné, pour cet exemple, par les deux intervalles  $iv_{11}$  et  $iv_{12}$  (figure 3.9).

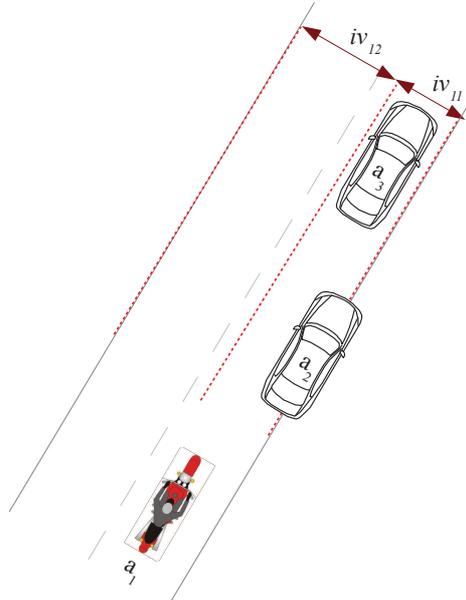


FIGURE 3.9: Les intervalles virtuels

Toutes ces règles permettent à l'agent de raisonner sur les intervalles afin d'identifier les sources de conflit et de restructurer les espaces libres et occupés. A partir de la liste des intervalles virtuels résultant du raisonnement précédent, l'agent identifie la liste des affordances en parcourant les intervalles du plus proche au plus éloigné (selon la position latérale de l'agent et les positions de début et de fin de chaque intervalle). Pour ce faire, il commence par identifier et caractériser son environne-

### CHAPITRE 3. REPRÉSENTATION EGO-CENTRÉE DE L'AGENT FONDÉE SUR LES AFFORDANCES

---

ment immédiat (sa propre voie) ensuite son environnement adjacent (les voies adjacentes à gauche et à droite) et enfin son environnement lointain ou non adjacent (les voies non adjacentes à gauche et à droite).

#### Environnement immédiat

L'agent parcourt l'ensemble  $IV_i$  et identifie l'intervalle  $iv_{ik}$  auquel il appartient d'après sa position latérale. Cet intervalle se transforme en une voie  $VV_{ik}$  en renseignant les paramètres cités précédemment tels que la longueur (la distance à l'obstacle sur cette voie), la vitesse, la densité, etc. Cette voie est ensuite affectée à l'ensemble des affordances  $Aff_i$ . Cette affordance correspond à l'action « rester sur sa propre voie et aller tout droit ».

#### Environnement adjacent

A partir de son environnement immédiat (sa propre voie), l'agent parcourt l'espace vers la gauche et vers la droite afin d'identifier et caractériser les affordances possibles. L'agent commence par les intervalles adjacents à son propre intervalle. Ces intervalles sont donnés par ceux qui ont une relation « rencontre » avec l'intervalle de l'agent, l'un à gauche et l'autre à droite. Ensuite, l'agent évalue chacun des deux intervalles identifiés. S'il estime avoir un gain en empruntant la voie correspondante à l'intervalle, il affecte cette possibilité à la liste de ses affordances. Sinon, il fusionne cet intervalle avec le suivant (s'il n'y a pas de marquage physique passant par cet intervalle) ou il fusionne jusqu'au marquage. L'agent ajoute ensuite cette nouvelle voie à sa liste d'affordances.

Le mécanisme d'évaluation est fondé sur les propriétés des voies identifiées précédemment. Chaque agent a le choix entre deux actions : rester sur sa voie ou changer de voie. Cette évaluation est effectuée à travers une fonction qui compare la vitesse courante de l'agent et la vitesse estimée qu'il pourrait avoir sur la voie cible. Cette fonction est donnée par la différence entre les deux vitesses pour un agent  $a_i$ <sup>7</sup> :

$$gain(VV_{ik}) = \tau * v_{a_i}(VV_{ik}) - vc_{a_i}$$

avec :

- $v_{a_i}(VV_{ik})$  correspond à la vitesse estimée sur la voie  $VV_{ik}$ ,
- $vc_{a_i}$  est la vitesse courante de l'agent  $a_i$ ,
- $\tau$ , compris entre 0 et 1, correspond à l'acceptabilité sociale de la pratique de faufilement qui diffère selon le type du véhicule (deux-roues, voitures, bus, etc.).

---

7. Le choix de cette fonction est complètement empirique, nous avons retenu les paramètres pouvant avoir un impact sur le comportement en nous fondant sur les études en psychologie de la conduite [Saad, 1992, Tornros, 1998, Lewis-Evans et Charlton, 2006].

### 3.3. UN MODÈLE D'AGENT FONDÉ SUR LES AFFORDANCES

Plus précisément,  $v_{a_i}(VV_{ik})$ <sup>8</sup> dépend des paramètres suivants :

- $f_{a_i}(VV_{ik})$  : un paramètre lié aux caractéristiques de flux de la voie  $VV_{ik}$  et qui dépend de la densité de la voie et de la vitesse moyenne,
- $g_{a_i}(VV_{ik})$  : un paramètre lié à l'effet paroi de la voie  $VV_{ik}$  et qui dépend de la proximité des parois et de leur stabilité en termes de vitesses,
- $h_{a_i}(VV_{ik})$  : un paramètre lié aux caractéristiques individuelles de chaque agent et qui traduit sa distance par rapport à la réglementation (comportement normatif et non normatif).

La fonction de gain est positive quand la voie cible présente un intérêt pour l'agent (en termes de vitesse). Cette estimation prend en compte les caractéristiques des voies (largeur, longueur, etc.) les caractéristiques des parois (stabilité, proximité) et les caractéristiques individuelles des agents, notamment la distance par rapport à la norme. Une voie virtuelle peut ne pas présenter le même intérêt selon que l'agent ait un comportement normatif ou pas.

#### Environnement lointain

Pour les voies non immédiatement adjacentes, nous proposons d'évaluer, en parcourant la chaussée de la voie immédiatement adjacente vers le bord de la route (latéralement à droite et à gauche) et de retenir la première voie (virtuelle ou non) dont les caractéristiques sont « meilleures » que la voie courante (le parcours se fait sur l'ensemble  $IV_i$ ). Par « meilleure » nous entendons une voie qui permettrait à l'agent d'espérer un gain selon des critères qui lui sont propres (dans notre cas un gain en vitesse) et qui dépend des caractéristiques individuelles. Le résultat de cette étape est l'ensemble des affordances correspondant à toutes les opportunités identifiées par l'agent.

#### 3.3.2.3 Représentation ego-centrée fondée sur les affordances

Après avoir identifié la liste des affordances, l'agent se construit une représentation ego-centrée de l'environnement fondée sur les affordances détectées. Plus formellement, la représentation ego-centrée de l'environnement d'un agent  $a_i$  notée  $REE_i$  est définie par le tuple  $\langle A, Aff_i, R_i \rangle$  :

- $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  est un sous-ensemble de tous les agents perçus par  $a_i$ ,
- $Aff_i = \{VV_{i1}, VV_{i2}, \dots, VV_{il}\}$ , avec  $l \leq 5$ , désigne l'ensemble des affordances identifiées,
- $R_i = \{r_{a_i}(w_k)/w_k \in A \cup Aff_i\}$  désigne l'ensemble des relations qui relient les objets et les agents. Chaque  $r_{a_i}(w_k)$  établit une relation binaire entre l'agent  $a_i$  et chaque agent  $a_k$  de  $A$  traduisant la relation spatiale entre les deux agents (à sa droite, à sa gauche, devant, derrière, etc.) ou une relation binaire entre l'agent  $a_i$  et chaque voie virtuelle  $VV_{ik}$  de  $Aff_i$  traduisant la relation entre l'agent et la voie considérée (voie de l'agent, voie adjacente à gauche, voie adjacente à droite, etc.).

---

8. La vitesse estimée de l'agent sur la voie  $VV_{ik}$  est donnée par une somme pondérée des paramètres mentionnés précédemment.

## CHAPITRE 3. REPRÉSENTATION EGO-CENTRÉE DE L'AGENT FONDÉE SUR LES AFFORDANCES

---

Les voies virtuelles identifiées sont caractérisées par des propriétés. Chaque  $P_j$  est l'ensemble des propriétés de la voie  $j$ . Nous mentionnons quelques exemples des propriétés que nous prenons en compte dans notre modèle : la largeur, la profondeur (la distance à l'obstacle ou à la fermeture de la voie), la densité, la vitesse moyenne, etc. Nous prenons aussi en compte dans notre modèle des paramètres liés à l'effet paroi, ce dernier ayant un impact sur la prise de décision de l'agent. L'effet paroi peut être lié aux caractéristiques de l'infrastructure (largeur des voies, les murs d'un tunnel, etc.) ou au contexte routier (l'effet de l'existence de poids-lourds sur les voies adjacentes, la variabilité des vitesses sur les voies adjacentes, etc.).

Nous retenons les caractéristiques suivantes :

- la vitesse de chaque paroi (c'est la vitesse du véhicule le plus lent de la file qui définit la paroi ou une vitesse de 0 s'il s'agit d'un bord de route),
- la stabilité des parois (donnée par la différence entre les vitesses moyennes de chaque paroi et nous postulons que plus les vitesses des parois droite et gauche sont identiques et plus l'effet paroi peut être considéré comme stable),
- la proximité des parois (l'espace disponible entre le véhicule considéré et les bords).

Ces caractéristiques ont un impact sur la position latérale et la vitesse appliquée.

Après avoir identifié et caractérisé l'environnement autour de lui en environnement immédiat, adjacent et lointain (non adjacent), l'agent met à jour les relations qu'il a avec les éléments de son environnement (agents perçus et objets identifiés). Les relations correspondent à des relations spatiales avec les autres agents (devant, derrière, adjacent, même voie, etc.) ou à des relations avec les voies identifiées (voie de l'agent, voie adjacente à gauche, voie non adjacente à gauche, etc.).

### 3.3.3 Décision et Action

La représentation ego-centrée de l'environnement permet à l'agent de prendre une décision en choisissant l'affordance optimale. Le résultat du mécanisme de décision est une voie virtuelle possible avec un certain nombre de propriétés telles que la largeur, la position au niveau de l'espace routier, la vitesse de la voie, les vitesses des parois. Ces propriétés permettent d'identifier la position latérale future de l'agent et une vitesse possible.

Grâce à la généralisation de l'usage des voies virtuelles ainsi qu'à l'enrichissement des caractéristiques liées aux voies, nous prévoyons que l'alternative d'opter pour une voie virtuelle d'inter-files ne sera pas systématique, particulièrement pour les véhicules automobiles, les poids-lourds, etc., pour lesquels la « tolérance » liée à l'usage de ce type de voie est faible de même que le gain en termes de temps de parcours. Pour ces derniers usagers, elle sera plutôt favorisée en cas d'événements spécifiques (présence d'un véhicule mal garé, un véhicule d'urgence, par exemple). La pratique de l'inter-file sera plutôt réservée aux deux-roues du fait d'une tolérance et d'un gain important en termes de temps de parcours. La solution que nous proposons devrait aussi permettre d'élargir le domaine de va-

### 3.3. UN MODÈLE D'AGENT FONDÉ SUR LES AFFORDANCES

---

lité du modèle pour des situations de réseau routier avec un nombre important de voies (par exemple, les gares de péages).

A partir de cette représentation ego-centrée de l'environnement fondée sur les affordances, l'agent décide quelle affordance choisir (adopter). Pour ce faire, il calcule un score pour chaque affordance de l'ensemble  $Aff_i$ . Ce score quantifie « l'attractivité » (« *strength* » ou « *attractiveness* » [Kapadia *et al.*, 2009] ) relative de toutes les affordances, en se fondant sur les buts désirés de l'agent et sa propre représentation de l'environnement. Ce score est donné par le terme  $F_{aff}(VV)$ .

$$F_{aff_i}(VV_{ij}) = f(p_{j1}, p_{j2}, \dots, p_{jq}, Buts)$$

où la fonction  $f(\cdot)$  est définie de telle manière que  $F_{aff}(VV)$  fournit une valeur numérique indiquant l'attractivité (une utilité espérée) d'une affordance donnée. Elle est donnée par une somme pondérée des propriétés des affordances  $p_{j1}, p_{j2}, \dots, p_{jq}$  telles que la largeur de la voie, la vitesse moyenne, etc.

Le choix de l'affordance optimale est effectué à travers une évaluation de toutes les affordances identifiées afin de déterminer la meilleure. Le résultat final du système de décision est l'affordance (une possibilité d'occupation de l'espace)  $VV_{ij}$  associée à la valeur optimale  $F_{aff_i}(VV_{ij})$ . L'optimalité est définie en maximisant la fonction  $f(\cdot)$ .

$$VV_{optimale} = arg \max F_{aff_i}(VV_{ij})$$

Une fois que la décision d'opter pour une affordance (une action possible) est prise, l'action doit ensuite être réalisée. Notons que l'action peut prendre du temps et que la réalisation de l'action correspondant à l'affordance choisie peut ne pas être immédiate après la décision. L'agent doit vérifier les prémisses de l'affordance adoptée et peut annuler la décision ou la rendre possible avec un certain nombre d'actions spécifiques.

#### 3.3.4 Algorithmes de construction de la *REE*

Dans cette section, nous synthétisons les différentes étapes présentées précédemment sous la forme d'algorithmes détaillant l'identification des affordances et la construction de la représentation ego-centrée de l'environnement d'un agent.

##### 3.3.4.1 Identification des affordances

Nous commençons par présenter l'algorithme permettant d'identifier la liste des affordances. Cet algorithme est composé de trois fonctions donnant les différentes étapes de détermination des affordances. La fonction *DecomposerIV* permet de décomposer la chaussée en intervalles libres et

### CHAPITRE 3. REPRÉSENTATION EGO-CENTRÉE DE L'AGENT FONDÉE SUR LES AFFORDANCES

---

occupés en se fondant sur la position des agents perçus, donnés par l'ensemble  $A$ , à partir de l'environnement et leurs caractéristiques (taille, type, etc.), données par l'ensemble  $C^p$ . Cette première décomposition permet d'obtenir des intervalles vides et occupés (que nous pouvons qualifier de bruts) donnés par l'ensemble  $intBruts$ . La fonction *ConstuctionIV* permet, à partir de cette première décomposition, de restructurer les intervalles identifiés afin d'aboutir à des intervalles cohérents. Pour cela, nous utilisons les relations d'Allen adaptées à une représentation spatiale de l'environnement. Ces relations sont utiles pour identifier les relations de conflit qui peuvent exister entre les intervalles spatiaux. Par exemple, deux intervalles construits chacun à partir d'une largeur d'un véhicule qui se chevauchent doivent être fusionnés en un seul intervalle occupé. Sur la base de ces relations, l'agent identifie les intervalles qui peuvent poser problème. Enfin, la fonction *CalculAffordances* permet d'identifier la liste des affordances à partir des intervalles virtuels  $IV$ .

---

**Algorithme 1** : Identification des affordances

---

**Entrées** :  $A, C^p$

- 1 **début**
- 2      $IntBruts \leftarrow DecomposerIV(A, C^p);$
- 3      $IV \leftarrow ConstuctionIV(IntBruts, A, C^p);$
- 4      $Aff \leftarrow CalculAffordances(IV, A, C^p);$
- 5     **retourner**  $Aff$
- 6 **fin**

---

Nous n'allons pas détailler toutes ces fonctions, nous allons uniquement nous focaliser sur la dernière servant à déterminer les affordances à partir de la liste des intervalles virtuels (voir Algorithme 2).

Afin d'identifier les affordances, l'agent parcourt son environnement du plus proche au plus éloigné. Il commence par identifier son propre intervalle (l'intervalle auquel il appartient selon sa position latérale), ensuite il l'affecte à l'ensemble des affordances comme étant la possibilité qui correspond à l'action rester sur sa propre voie à travers la fonction *miseAJourVoie* qui permet aussi de calculer un certain nombre de caractéristiques de la voie (ligne 4). Par la suite, l'agent effectue un parcours de la liste des intervalles vers la droite et vers la gauche. L'agent commence par évaluer le premier intervalle à droite (ligne 10). L'évaluation s'effectue par la fonction de gain présentée précédemment. S'il estime avoir un gain en empruntant cette voie ou que l'intervalle en question correspond à la voie physique donnée par le marquage au sol (*VerifierVoiePhysique(IV[k])*), l'agent l'affecte à l'ensemble des affordances (ligne 13). Sinon il fusionne cette voie avec la suivante (s'il n'y a pas de marquage physique passant par cet intervalle) ou il fusionne jusqu'au marquage et met à jour l'indice  $k$  (ligne 16). Il procède ensuite à une évaluation du nouvel intervalle adjacent. Ce traitement incrémental continue jusqu'à ce que l'agent trouve une possibilité à droite. Elle peut donc correspondre soit à une voie virtuelle soit à une voie physique.

### 3.3. UN MODÈLE D'AGENT FONDÉ SUR LES AFFORDANCES

---

**Algorithme 2** : *CalculAffordances*

---

**Entrées** :  $IV, A, C^p$

1 **début**

2 {Environnement immédiat}

3  $k \leftarrow IndiceVoiePropre(IV)$  {la propre voie de l'agent dans la liste des IV};

4  $Aff \leftarrow miseAJourVoie(IV[k]);$

5  $trouvé \leftarrow false;$

6  $m \leftarrow IndiceMax(IV);$

7 {Environnement adjacent}

8 {A partir de la voie courante de l'agent, parcourir les intervalles à droite pour identifier la voie adjacente à droite}

9  $k \leftarrow k + 1;$

10  $gain \leftarrow Estimer(IV[k], A, C^p);$

11 **tant que** ( $k \leq m$  **et non trouvé**) **faire**

12 | **si** ( $gain \geq 0$ ) **ou** ( $VerifierVoiePhysique(IV[k])$ ) **alors**

13 | |  $Aff \leftarrow miseAJourVoie(IV[k]);$

14 | |  $trouvé \leftarrow true;$

15 | **sinon**

16 | | fusionner avec l'intervalle suivant ou fusionner jusqu'au marquage et mise à jour de  $k$ ;

17 | **fin**

18 |  $gain \leftarrow Estimer(IV[k], A, C^p)$  {estimer le nouvel intervalle après l'avoir modifié};

19 **fin**

20 {Environnement non adjacent}

21  $k \leftarrow IndiceVoieAdjD(IV)$  {indice de la voie adjacente à droite};

22 **tant que** ( $k \leq m$  **et**  $gain < 0$ ) **faire**

23 |  $gain \leftarrow Estimer(IV[k], A, C^p);$

24 | **si**  $gain \geq 0$  **alors**

25 | |  $Aff \leftarrow miseAJourVoie(IV[k]);$

26 | **sinon**

27 | |  $k = k + 1;$

28 | **fin**

29 **fin**

30 Refaire le même traitement à gauche à partir de la voie courante de l'agent (étapes de 2 à 29);

31 **retourner**  $Aff$

32 **fin**

---

## CHAPITRE 3. REPRÉSENTATION EGO-CENTRÉE DE L'AGENT FONDÉE SUR LES AFFORDANCES

---

L'agent procède ensuite à l'exploration de l'environnement non adjacent. Il commence par parcourir l'environnement à partir de la voie doublement adjacente à droite jusqu'au bord de la route. Il s'arrête si le gain correspondant à la voie est positif. Dans ce cas, l'agent affecte cette affordance à l'ensemble  $Aff$  (ligne 25) sinon il passe à la voie suivante (ligne 27).

Une fois les affordances à droite identifiées, l'agent procède ensuite au même traitement mais à gauche à partir de sa propre voie (ligne 30) pour identifier les affordances adjacente et non adjacente à gauche.

Les affordances non adjacentes (à droite et à gauche) peuvent correspondre à des voies plus éloignées sur la chaussée. Ces deux possibilités représentent l'existence d'opportunités « atteignables » vers la droite ou vers la gauche, au delà des voies adjacentes. Ces voies ne sont pas nécessairement doublement adjacentes (adjacentes aux voies adjacentes). Elles désignent des voies qui sont atteignables par une succession de manoeuvres de changement de voies. Elles permettent, par exemple, d'indiquer une option favorable atteignable au prix de changements de voies parfois défavorables.

### 3.3.4.2 Construction de la représentation ego-centrée de l'environnement

La représentation ego-centrée de l'environnement est composée de la liste des agents perçus, de l'ensemble des affordances identifiées et de l'ensemble des relations reliant l'agent qui se construit la représentation et les autres agents perçus autour de lui ainsi que des relations entre l'agent  $a_i$  et chaque voie virtuelle  $VV_{ij}$  de  $Aff_i$ . La procédure *ConstruitREE* de l'algorithme 3 prend donc en entrée l'ensemble  $A$  des agents perçus, l'ensemble  $C^p$  de leurs caractéristiques, l'ensemble  $R$  des relations qui va être mis à jour. Pour chaque agent  $a_i$  perçu de l'ensemble  $A$ , la fonction *IdentifierRelationSpatiale* permet de déterminer les relations spatiales qu'a l'agent qui se construit la représentation ego-centrée avec les autres agents perçus, selon leurs positions par rapport aux affordances identifiées (devant, à droite, à gauche, etc.).

Pour chaque affordance  $VV_{ik}$  appartenant à l'ensemble  $Aff_i$ , la fonction *IdentifierRelation* permet de déterminer les relations entre l'agent  $a_i$  et chaque affordance  $VV_{ik}$  de  $Aff_i$ . Ces dernières correspondent à des relations telles que voie propre de l'agent, voie adjacente à gauche, voie adjacente à droite, etc.

### 3.4. INSTANCIATION DU MODÈLE ET EXEMPLES ILLUSTRATIFS

---

#### Algorithme 3 : ConstruitREE

---

Entrées :  $A, C^p, Aff, R$

```

1 début
2   pour chaque  $a_j \in A$  faire
3      $r \leftarrow IdentifierRelationSpatiale(C_i, C^p, Aff_i)$ ;
4      $miseAJourRelation(R, r)$ ;
5   fin
6   pour chaque  $VV_{ik} \in Aff_i$  faire
7      $r \leftarrow IdentifierRelation(P_k, C_i, Aff_i)$ ;
8      $miseAJourRelation(R, r)$ ;
9   fin
10 fin

```

---

## 3.4 Instanciation du modèle et exemples illustratifs

### 3.4.1 Exemple 1 : cas d'un deux-roues motorisé dans une situation de faufilement

Nous illustrons l'instanciation du modèle de représentation ego-centrée de l'environnement avec un exemple simple de situation routière. Pour cela, nous considérons quatre véhicules et une moto évoluant sur une route à deux voies (figure 3.10). Les véhicules  $a_2, a_3, a_4$  et  $a_5$  ont la même vitesse tandis que la moto a une vitesse plus élevée que les véhicules.

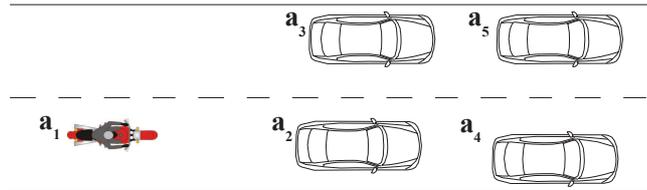


FIGURE 3.10: Exemple d'une situation routière à 2 voies physiques

Nous présentons le traitement du point de vue de l'agent  $a_1$ . L'ensemble des agents perçus est donné par  $A = \{a_2, a_3, a_4, a_5\}$  et l'ensemble des caractéristiques perçues est donné par  $C^p = \{C_{a_2}^p, C_{a_3}^p, C_{a_4}^p, C_{a_5}^p\}$ . L'agent  $a_1$  perçoit les autres agents autour de lui selon une distance de vision. Au début, l'agent reçoit les informations perçues sous forme symbolique. Il se construit ainsi un ensemble  $R$  qui décrit les relations qu'il a avec les éléments de son environnement selon la configuration donnée par les voies physiques (prédicats : devant, gauche, adjacent, etc.). Par exemple,  $devant_{a_1}(a_2)$  signifie que l'agent  $a_2$  est devant l'agent  $a_1$ .

### CHAPITRE 3. REPRÉSENTATION EGO-CENTRÉE DE L'AGENT FONDÉE SUR LES AFFORDANCES

L'ensemble des relations du point de vue de l'agent  $a_1$  est donné par :

$$R_1 = \{ \text{devant}_{a_1}(a_2), \text{devant}_{a_1}(a_3), \text{devant}_{a_1}(a_4), \text{devant}_{a_1}(a_5), \text{memeV}_{a_1}(a_2), \text{memeV}_{a_1}(a_4), \\ \text{gauche}_{a_1}(a_3), \text{gauche}_{a_1}(a_5), \text{adjacent}_{a_1}(a_3), \text{adjacent}_{a_1}(a_5), \text{voiePropre}_{a_1}(VP_1), \\ \text{voieAdjG}_{a_1}(VP_2) \}$$

En appliquant les différents algorithmes présentés dans la section précédente, nous obtenons le raisonnement suivant du point de vue de l'agent  $a_1$  :

1. Déterminer la liste des véhicules gênants : l'agent  $a_1$  identifie la liste des agents  $\{a_2, a_4, a_3, a_5\}$  comme étant gênants. Ils sont donnés par les véhicules vus devant à une certaine distance. Cette distance dépend de la vitesse de l'agent  $a_1$ . Ils sont ensuite ordonnés selon leurs positions latérales. Les véhicules gênants désignent ceux qui sont sur la voie propre de l'agent et qui le gênent pour avancer et ceux qui sont sur les autres voies puisque ils sont considérés comme potentiellement gênants si l'agent change de voie.
2. Construire les intervalles virtuels : pour cela l'agent  $a_1$  parcourt la liste des agents et identifie la liste des intervalles donnés soit par l'espace occupé par un véhicule soit par l'espace entre deux véhicules (ou un véhicule et le bord de la route). Cette première liste correspond à ce que nous avons définis par les intervalles bruts, ils sont identifiés à l'aide de la fonction *DecomposerIV* de l'algorithme 1 (figure 3.11).

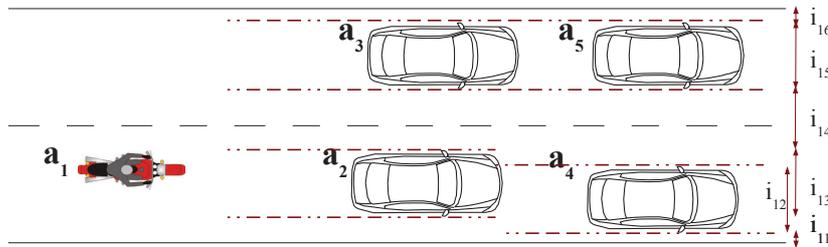


FIGURE 3.11: Identifications des intervalles bruts

Par la suite, l'agent raisonne sur ces derniers en utilisant les relations d'Allen afin de résoudre des situations de conflits tels que le chevauchement d'intervalles et aboutit à la liste des intervalles virtuels (fonction *ConstructionIV* de l'algorithme 1). Dans cet exemple, l'ensemble des intervalles bruts est donné par  $i_{11}, i_{12}, i_{13}, i_{14}, i_{15}, i_{16}$ . Nous pouvons constater que les deux intervalles  $i_{12}$  et  $i_{13}$  se chevauchent étant donné que les véhicules qui forment ces deux intervalles se chevauchent aussi. L'agent constate qu'il y a une situation de conflit à travers la relation « chevauche » entre ces intervalles et utilise la règle suivante pour résoudre ce conflit :

$$(i_{12} \text{ oi } i_{13}) \wedge (\text{larg}(a_i) > (\text{pd}(i_{13}) - \text{pd}(i_{12}))) \rightarrow \text{fusionner}(i_{12}, i_{13})$$

### 3.4. INSTANCIATION DU MODÈLE ET EXEMPLES ILLUSTRATIFS

L'intervalle  $i_{12}$  est chevauché par l'intervalle  $i_{13}$  et la distance restante entre les deux intervalles est inférieure à la taille de  $a_1$ , alors les deux intervalles sont fusionnés. Dans cet exemple, il n'y a qu'une seule situation de conflit, une seule règle est donc utilisée.

Ainsi, comme la figure 3.12 le montre, les intervalles virtuels sont donnés par l'ensemble suivant  $IV_1 = \{iv_{11}, iv_{12}, iv_{13}, iv_{14}, iv_{15}\}$ .

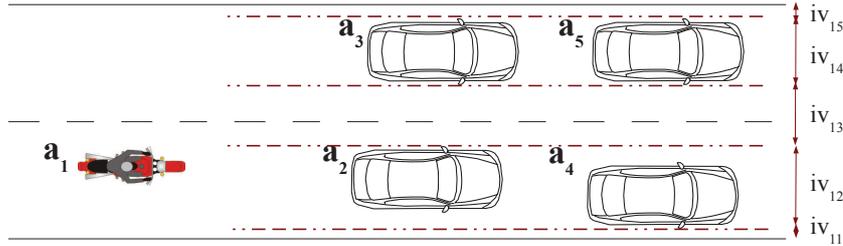


FIGURE 3.12: Construction des intervalles virtuels

3. Identifier les affordances : l'identification des affordances se construit dans l'environnement le plus proche au plus éloigné autour de lui. L'agent commence par son environnement immédiat pour cela il identifie sa propre voie parmi les intervalles virtuels par rapport à sa position latérale (ligne 3 de l'algorithme 2). La propre voie de l'agent correspond donc à l'intervalle  $iv_{12}$  et sera affectée à la liste des affordances  $Aff_1$ .

Pour l'environnement adjacent, l'agent commence par évaluer l'intervalle virtuel adjacent à droite  $iv_{11}$  (ligne 10 de l'algorithme 2). Comme cet intervalle n'a pas une largeur suffisante pour permettre à la moto de passer, l'agent ne peut pas le retenir comme étant une possibilité à droite. Cet intervalle sera alors fusionné avec l'intervalle  $iv_{12}$  (ligne 16 de l'algorithme 2). Le nouvel intervalle  $(iv_{12} \cup iv_{11})$  sera affecté de nouveau comme étant la propre voie de l'agent  $a_1$  dans l'ensemble  $Aff_1$ . L'évaluation de l'intervalle virtuel à gauche  $iv_{13}$  donne un gain positif, l'agent l'affecte comme étant une possibilité à gauche à la liste des affordances  $Aff_1$ .

L'agent procède enfin à la détermination des affordances non adjacentes (de lignes 20 à 29 de l'algorithme 2). Pour cet exemple, il n'y a pas d'environnement non adjacent à droite. Concernant l'environnement non adjacent à gauche, l'agent évalue l'intervalle  $iv_{14}$ , il a un gain égal à celui de la voie propre de l'agent puisque les véhicules  $a_2, a_3, a_4$  et  $a_5$  ont la même vitesse. Dans le cas où les véhicules n'ont pas la même vitesse et si le gain calculé de l'intervalle  $iv_{14}$  est négatif, l'agent ne garde pas cet intervalle comme une possibilité à gauche. Il reste juste un seul intervalle jusqu'au bord de la route ( $iv_{15}$  dont le gain est négatif), il sera alors fusionné avec l'intervalle  $iv_{14}$ . L'agent l'affecte ensuite à l'ensemble des affordances (figure 3.13). A la fin du traitement, l'ensemble des affordances est donc composé des trois voies virtuelles, donné par  $Aff_1 = \{VV_{11}, VV_{12}, VV_{13}\}$ .

## CHAPITRE 3. REPRÉSENTATION EGO-CENTRÉE DE L'AGENT FONDÉE SUR LES AFFORDANCES

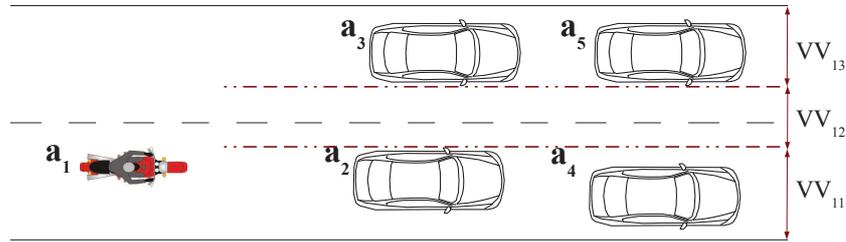


FIGURE 3.13: Identification des affordances

4. Construction de la représentation ego-centrée  $REE_1$  : la représentation ego-centrée de l'environnement de l'agent  $a_1$  est définie par le tuple  $\langle A, Aff_1, R_1 \rangle$  :

- $A = \{a_2, a_3, a_4, a_5\}$ ,
- $Aff_1 = \{VV_{11}, VV_{12}, VV_{13}\}$ ,
- $R_1 = \{devant_{a_1}(a_2), devant_{a_1}(a_3), devant_{a_1}(a_4), devant_{a_1}(a_5), memeV_{a_1}(a_2), memeV_{a_1}(a_4), gauche_{a_1}(a_3), gauche_{a_1}(a_5), voiePropre_{a_1}(VV_{11}), voieAdjG_{a_1}(VV_{12}), voieNonAdjG_{a_1}(VV_{13})\}$ .

Les agents  $a_3$  et  $a_5$  ne sont plus considérés comme adjacents (selon la nouvelle représentation que se fait l'agent de son environnement, ces derniers ne sont plus situés sur la voie adjacente à gauche).

L'agent prend sa décision en se référant à la représentation ego-centrée qu'il s'est construite et aux nouvelles relations identifiées. Pour cela, il évalue les affordances identifiées et choisit la meilleure, c'est-à-dire la voie virtuelle  $VV_{12}$  qui lui permet de débloquer sa situation (figure 3.14).

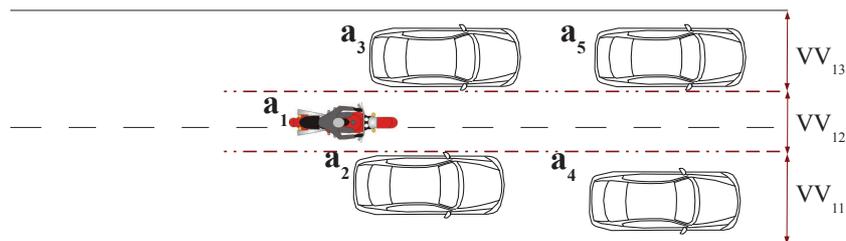


FIGURE 3.14: Choix de l'agent  $a_1$

### 3.4.2 Exemple 2 : cas d'une voiture dans une réduction de voies

Nous prenons un deuxième exemple pour illustrer l'instanciation de notre modèle. Pour cet exemple, nous présentons le raisonnement du point de vue d'un agent conduisant une voiture. Nous allons brièvement présenter les différentes étapes afin de mettre en évidence la différence de repré-

### 3.4. INSTANCIATION DU MODÈLE ET EXEMPLES ILLUSTRATIFS

sentation entre un deux-roues motorisés et une voiture. Nous considérons une situation routière avec trois voies de circulation et 8 véhicules 3.15.

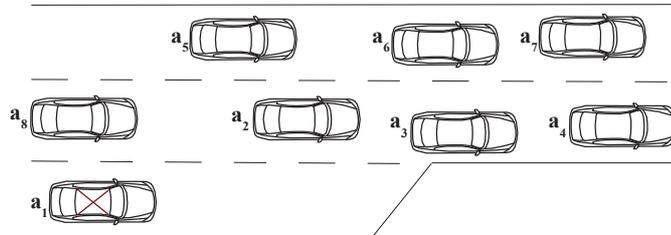


FIGURE 3.15: Exemple d'une situation routière à 3 voies physiques

Nous présentons le traitement du point de vue de l'agent  $a_1$ . Ce dernier identifie la liste des agents qui vont servir à construire les intervalles virtuels. Il ne prend pas en compte le véhicule  $a_8$  parce qu'il est considéré derrière lui. L'agent  $a_1$  commence par identifier les intervalles virtuels donnés par les espaces libres et occupés par les véhicules aperçus. Nous pouvons constater à travers la figure 3.16 qu'il y a des intervalles qui se chevauchent, par exemple, les intervalles formés par les véhicules  $a_2$ ,  $a_3$  et  $a_4$ .

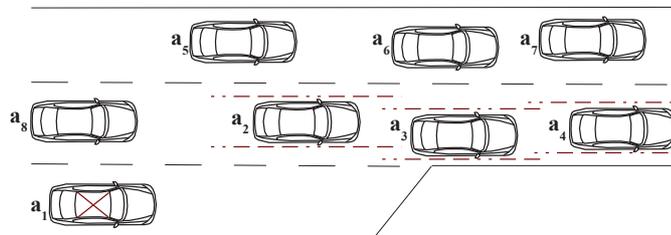


FIGURE 3.16: Identification des intervalles bruts

Ces intervalles sont détectés à l'aide des relations d'Allen et sont restructurés (fonction *ConstructionIV* de l'algorithme 1). Nous aboutissons à la liste des intervalles virtuels donnés par la figure 3.17.

### CHAPITRE 3. REPRÉSENTATION EGO-CENTRÉE DE L'AGENT FONDÉE SUR LES AFFORDANCES

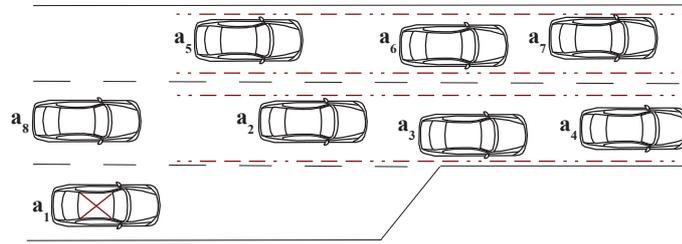


FIGURE 3.17: Construction des intervalles virtuels

A partir des intervalles virtuels, l'agent identifie la liste des affordances (Algorithme 2). Nous pouvons constater (figure 3.17) qu'aucun intervalle virtuel libre ne permet de débloquer la situation du véhicule  $a_1$ . Sa propre voie sera fermée sous peu et il doit effectuer un changement de voie. L'ensemble des voies virtuelles est au final donné par la liste des voies physiques (figure 3.18).

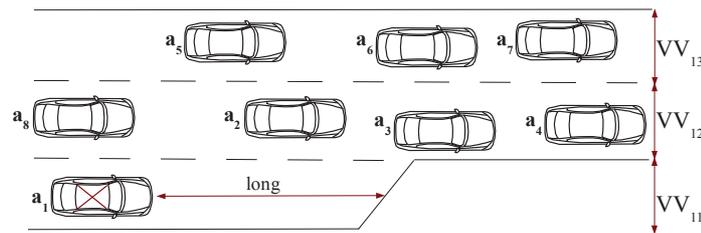


FIGURE 3.18: Identification des affordances

Au final, la représentation ego-centrée de l'environnement  $REE_1$  de l'agent  $a_1$  est donnée par le tuple suivant :

- $A = \{a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7\}$ ,
- $Aff_1 = \{VV_{11}, VV_{12}, VV_{13}\}$ ,
- $R_1 = \{devant_{a_1}(a_2), devant_{a_1}(a_3), devant_{a_1}(a_4), devant_{a_1}(a_5), devant_{a_1}(a_6),$   
 $devant_{a_1}(a_7), gauche_{a_1}(a_2), gauche_{a_1}(a_3), gauche_{a_1}(a_4), gauche_{a_1}(a_5),$   
 $gauche_{a_1}(a_6), gauche_{a_1}(a_7), adjacent_{a_1}(a_2), adjacent_{a_1}(a_3), adjacent_{a_1}(a_4),$   
 $voiePropre_{a_1}(VV_{11}), voieAdjG_{a_1}(VV_{12}), voieNonAdjG_{a_1}(VV_{13})\}$ .

Notons que la voie propre de l'agent  $a_1$  est ouverte jusqu'à une certaine distance (*long*). Elle ne sera donc pas choisie lors de la décision (elle n'est pas considérée comme l'affordance optimale). L'agent choisira la voie avec la vitesse la plus élevée mais dans un premier temps il passera forcément par la voie  $VV_{12}$ . Cette dernière correspond soit à la destination finale soit à une étape intermédiaire si le but est d'atteindre la voie  $VV_{13}$ .

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre contribution à la problématique de l'occupation de l'espace au sol pour des conducteurs simulés. Notre proposition s'articule autour de deux aspects :

- Premièrement, nous avons utilisé le concept d'affordance afin d'identifier les différentes possibilités offertes par l'environnement en termes d'occupation de l'espace au sol. Ces affordances dépendent à la fois du contexte et des caractéristiques individuelles de l'agent. Dans le cadre de notre application, les affordances correspondent à des voies virtuelles qui peuvent émerger à partir des interactions entre les entités perçues et l'environnement routier. Nous avons présenté, dans la deuxième section de ce chapitre, un modèle d'interaction avec l'environnement fondé sur les affordances. Ce modèle permet de présenter l'idée générale de notre approche.
- Deuxièmement, l'agent se construit une représentation ego-centrée de l'environnement fondée sur les affordances identifiées. Cette représentation est dynamique et contextuelle et permet à l'agent d'avoir une représentation « mentale » de la situation orientée vers les possibilités d'action. Elle permet ainsi de synthétiser la situation dans laquelle se trouve l'agent et de faciliter la prise de décision de ce dernier.

Dans la dernière partie du chapitre, nous avons proposé une instanciation de notre modèle pour deux exemples de situations routières. Le premier exemple illustre les différentes parties de notre modèle de la perception jusqu'à la prise de décision pour une situation routière selon le point de vue d'un deux-roues motorisés. Le deuxième exemple a été présenté brièvement afin d'illustrer l'utilisation de notre modèle pour une situation différente, du point de vue d'une voiture.

Dans le chapitre suivant, nous présentons brièvement l'outil de simulation ArchiSim et nous exposons les différentes expérimentations menées pour évaluer la pertinence de notre modèle de représentation ego-centrée de l'environnement fondée sur les affordances dans le cadre de la simulation de trafic.

### **CHAPITRE 3. REPRÉSENTATION EGO-CENTRÉE DE L'AGENT FONDÉE SUR LES AFFORDANCES**

---

## Chapitre 4

# Évaluation et validation du modèle

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Le modèle de simulation comportementale ArchiSim</b>	<b>104</b>
4.1.1	Démarche	104
4.1.2	Architecture	105
4.1.3	Production de trafic sous ArchiSim	109
<b>4.2</b>	<b>Évaluation de notre approche</b>	<b>111</b>
4.2.1	Expérimentation sur la base de scénarii	112
4.2.2	Simulation d'un circuit réel et validation	115
<b>4.3</b>	<b>Conclusion</b>	<b>124</b>

---

Nous avons proposé au chapitre précédent un modèle d'agent permettant une représentation ego-centrée de l'environnement fondée sur les affordances. Nous avons également présenté une instantiation de ce modèle pour deux exemples de situations routières.

Dans ce chapitre, nous présentons l'outil de simulation de trafic ArchiSim [Espié, 1995] dans lequel nous avons implémenté notre modèle et obtenu les résultats de nos différentes expérimentations. Dans la première partie, nous présentons une description brève du projet de simulation de trafic ArchiSim. La seconde partie est consacrée à l'évaluation de notre modèle et à la présentation de nos résultats. L'évaluation et la validation de notre approche sont faites à deux niveaux. Une première évaluation fondée sur différents scénarii pour tester des cas particuliers où les conducteurs simulés sont mis dans des situations pour lesquelles un comportement bien précis est attendu. L'évaluation consiste à observer les comportements individuels et à les comparer avec les pratiques que l'on peut observer dans la réalité. Le second niveau d'évaluation s'intéresse à une validation macroscopique du trafic résultant des comportements individuels. Pour cela, nous simulons le trafic pour un circuit réel pour lequel nous disposons de données mesurées sur le terrain. Nous comparons ensuite les données de simulation et les données réelles. Nous présentons une comparaison des données simulées issues du modèle de référence (ArchiSim sans les voies virtuelles) et les données simulées après intégration

## CHAPITRE 4. ÉVALUATION ET VALIDATION DU MODÈLE

---

de notre modèle avec les données réelles. Nous présentons aussi une comparaison entre nos résultats et les résultats des travaux de [Bonte *et al.*, 2006, Bonte *et al.*, 2007] cités dans cette thèse. Nous clôturons nos expérimentations par l'introduction d'un véhicule d'urgence dans la simulation afin de montrer la généralité de notre proposition qui peut être appliquée à plusieurs types d'utilisateurs et à plusieurs situations.

### 4.1 Le modèle de simulation comportementale ArchiSim

L'idée centrale du projet consiste à simuler un trafic complexe et réaliste en se fondant sur les résultats des travaux en psychologie de la conduite. Cette approche, initiée dès 1987, s'est concrétisée en 1992 par le projet ArchiSim. L'architecture d'ArchiSim a permis par la suite de coupler un simulateur de conduite avec une simulation de trafic [Espié, 1995]. La motivation d'une telle approche est de pouvoir étudier le comportement d'un être humain plongé dans un trafic visuellement et statistiquement réaliste. ArchiSim est fondée sur une approche comportementale [Espié et Saad, 2000] et se positionne comme une simulation microscopique, déterministe et à temps discret.

Dans ArchiSim, une situation routière est considérée comme étant le résultat du comportement des conducteurs, de leurs interactions et des effets de l'infrastructure routière et la réglementation. Chaque acteur possède une certaine autonomie, ses propres connaissances, ses propres buts ainsi que sa propre stratégie pour effectuer ses différentes tâches et pour résoudre les éventuels conflits qu'il pourrait rencontrer.

#### 4.1.1 Démarche

Les travaux réalisés dans le cadre du projet ArchiSim sont initialement le fruit d'une collaboration entre deux entités de l'INRETS : le Laboratoire de Psychologie de la Conduite (LPC) et le Département d'Analyse et Régulation du Trafic (DART).

Les travaux menés au LPC ont abouti à la définition d'un modèle conceptuel du comportement des conducteurs. Ce modèle, conçu par F. Saad, se focalise sur les aspects tactiques de la conduite. Il a été construit à l'aide d'un véhicule instrumenté et d'entretiens post-conduites avec des conducteurs. Le véhicule instrumenté était équipé d'un moyen d'enregistrement de la scène visuelle (sur le devant du véhicule) et des paramètres suivants : le temps et la distance parcourue (pour positionner les événements dans le temps et dans l'espace par rapport à la route), la vitesse du véhicule et les instants de freinages. Deux observateurs accompagnaient le sujet pour le bon fonctionnement des enregistrements et pour noter les mouvements de tête et tous les événements non enregistrés par la vidéo.

Un entretien post-expérimentation vient, par la suite compléter l'étude en verbalisant les commentaires du sujet face aux comportements adoptés durant l'expérimentation [Saad, 1992]. Ce mode opératoire a permis d'obtenir une description précise de l'activité d'un conducteur lors d'interactions

## 4.1. LE MODÈLE DE SIMULATION COMPORTEMENTALE ARCHISIM

---

complexes en situations réelles et d'identifier les connaissances utilisées et les stratégies appliquées. Une analyse fine de toutes les données recueillies a ensuite permis d'explicitier les prises de décisions du conducteur en relevant les motifs qui les sous-tendent.

Les résultats de ces travaux indiquent que les motivations du conducteur sont principalement la sécurité, le maintien de l'allure préférentielle, la minimisation de l'effort et la minimisation des contraintes (i.e. des interactions avec son environnement). Un conducteur souhaite donc maintenir sa vitesse, s'orienter, supprimer les interactions et s'adapter. Il réalise cela en corrigeant son allure et en changeant de voie si nécessaire. La génération des intentions du conducteur peut alors être traduite par quelques règles comportementales.

Le modèle de comportement du conducteur utilisé dans ArchiSim est issu d'une collaboration entre psychologues et informaticiens de l'IFSTTAR (ex INRETS) dans le but de traduire les résultats obtenus sous forme de règles génériques et implémentables [Saad et Schnetzler, 1994]. Ces règles sont les suivantes :

- Règle de suppression d'interaction :  
Si le conducteur se trouve dans une interaction de longue durée (par exemple une gêne occasionnée par un véhicule devant) et qu'il a la possibilité de la supprimer (changer de voie), alors le conducteur opte pour la suppression de l'interaction.
- Règles d'adaptation :
  - Si le conducteur se trouve dans une interaction de courte durée et qu'il a la possibilité de la supprimer, alors l'adaptation est de courte durée.
  - Si le conducteur se trouve dans une interaction de courte durée et qu'il est impossible de la supprimer provisoirement alors l'adaptation est de courte durée.
  - Si le conducteur se trouve dans une interaction de longue durée et qu'il est impossible de la supprimer alors l'adaptation est de longue durée.

Ces règles sont génériques et elles caractérisent la façon dont le conducteur essaye de gérer une situation d'interaction dans laquelle il se trouve en fonction de l'état de celle-ci (nature temporelle de l'interaction et possibilité ou non de la supprimer). L'ambition de l'équipe MSIS de l'INRETS a été d'implémenter ces règles sous forme de code informatique afin d'obtenir des mobiles autonomes capables, autant que possible, de réagir à n'importe quelle situation en gérant leurs interactions de manière à les supprimer ou à s'adapter [Espié *et al.*, 2003].

### 4.1.2 Architecture

#### 4.1.2.1 Vue globale

Le mode de fonctionnement d'ArchiSim est distribué. Le coeur de l'architecture consiste en un processus « central » qui fournit sur requête une description de l'environnement de chaque agent. Ce processus central est nommé « serveur de vision ». Il donne aux agents une représentation symbolique

## CHAPITRE 4. ÉVALUATION ET VALIDATION DU MODÈLE

de leur environnement. Il contient toutes les données relatives à l'environnement simulé comme la description du réseau (noeuds d'intersections, les routes), des équipements routiers (signalisation horizontale et verticale, etc.) et les mobiles y évoluant (en fait leurs avatars). Ce processus n'intervient pas dans le mécanisme de prise de décision individuel de chaque agent : il s'agit d'un intermédiaire permettant de simplifier l'interaction agent/environnement.

Le fonctionnement d'ArchiSim est synchrone, la simulation est décomposée en pas de temps et à chaque pas de temps, chaque agent envoie au serveur de vision une requête. Cette requête contient son état courant visible, c'est-à-dire sa position, sa vitesse, l'état de ses indicateurs, etc. La requête concerne les éléments placés dans son champ de perception (paramétrable en distance). Le serveur de vision attend de recevoir toutes les requêtes des agents pour mettre à jour la base de données représentant le réseau. Ensuite il détermine et envoie à chacun les éléments que celui-ci peut percevoir. Chaque agent récupère les informations relatives à son environnement, prend sa décision et met à jour ses données locales vers le serveur (figure 4.1). Chaque agent peut recevoir au maximum une liste de 100 vues (une vue correspond à un agent ou un élément de l'infrastructure routière) décrivant son environnement local.

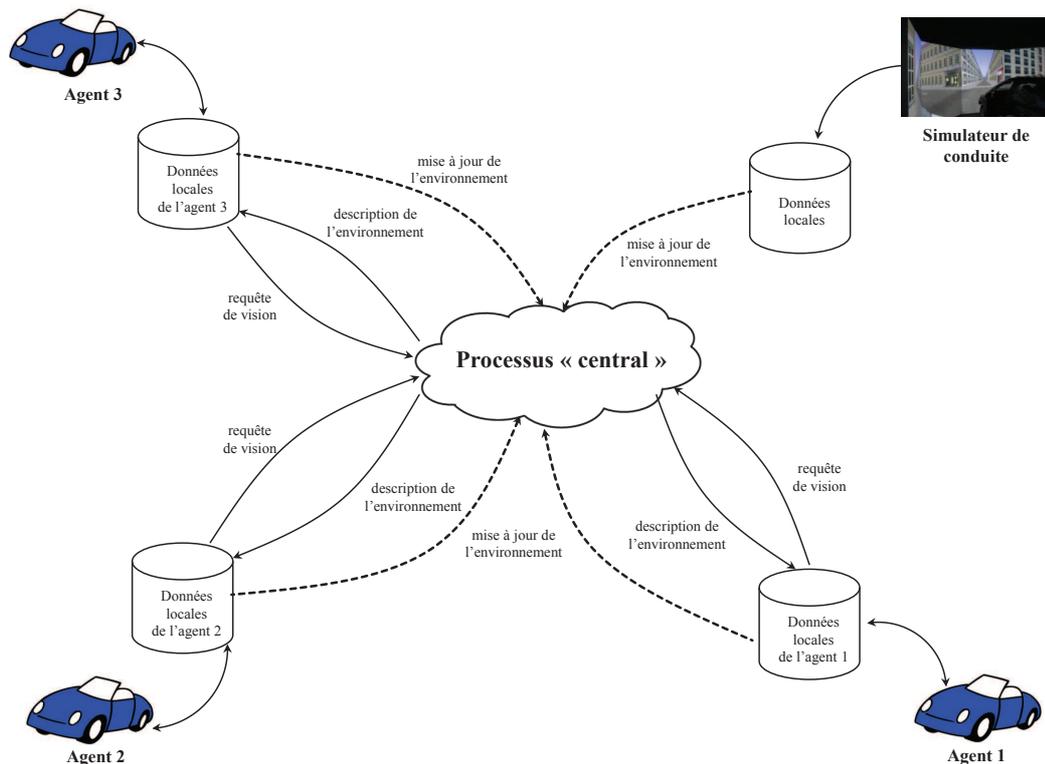


FIGURE 4.1: Architecture globale d'ArchiSim

## 4.1. LE MODÈLE DE SIMULATION COMPORTEMENTALE ARCHISIM

---

La simulation peut être distribuée sur plusieurs machines reliées entre elles par un réseau de type Ethernet. Dans ce cas, les communications s'effectuent en mode connecté à travers un mécanisme de sockets. Grâce à son architecture ouverte et distribuée, Archisim offre la possibilité d'accueillir un simulateur de conduite composé de différents modules : un modèle dynamique de véhicule, le module de scénario (pour jouer des situations spécifiques), le module visuel 3D, etc.

### 4.1.2.2 Agent conducteur

La modélisation du trafic dans ArchiSim s'appuie sur une modélisation comportementale des entités simulées. De ce fait, chaque acteur mobile (automobiliste, motard, piéton, etc.) est modélisé sous la forme d'un agent disposant d'un certain nombre de caractéristiques :

- des buts à satisfaire : itinéraire à suivre, vitesse désirée à maintenir, etc.,
- des caractéristiques individuelles : caractéristiques physiques du véhicule, un niveau d'expérience de la conduite, un style de conduite, un niveau de respect de la réglementation, etc.,
- un champ de perception : pour se déplacer sur le réseau routier, un agent a besoin de percevoir un certain nombre d'informations relatives à son environnement (présence de signalisation, présence d'autres véhicules, etc.). Dans ArchiSim, la perception de l'environnement de l'agent passe par le serveur de vision par l'envoi de requête. L'agent a la possibilité de préciser ce qu'il souhaite « voir » en définissant un certain nombre de paramètres : distance de vision en latéral, devant et derrière lui. Ces distances définissent le champ de perception de l'agent.
- des accointances : correspondant aux agents qui se trouvent dans son champs de perception,
- une certaine autonomie : pour satisfaire ses objectifs, un agent peut modifier et adapter librement sa trajectoire au cours du temps et en fonction du contexte dans lequel il se trouve. Il peut par ailleurs ne pas respecter la réglementation donnée par le code de la route, en fonction du contexte et de ses caractéristiques individuelles, ce qui traduit une certaine autonomie par rapport à la norme [Doniec *et al.*, 2008].

De part la complexité de la tâche de conduite qui est considérée comme une tâche cognitive, les agents dans ArchiSim sont cognitifs. Les algorithmes utilisés prennent en compte un certain nombre d'informations beaucoup plus riches que les simples stimuli utilisés pour les agents réactifs.

### 4.1.2.3 Perception de l'environnement

Le réseau routier est décrit sous forme d'un graphe dans lequel les routes correspondent aux arcs et les intersections aux noeuds. Chaque agent est repéré sur le réseau par un numéro de route, un point kilométrique, une distance par rapport à l'axiale et un cap relatif à l'axe de la route. Cette manière de se repérer dans l'environnement permet aux agents d'utiliser la totalité de l'espace roulant de la route et de s'adapter au contexte en changeant de voie si c'est nécessaire. Ceci permet de ne pas avoir des trajectoires pré-calculées pour les mobiles.

## CHAPITRE 4. ÉVALUATION ET VALIDATION DU MODÈLE

---

Pour pouvoir se déplacer sur le réseau routier, l'agent a besoin de percevoir les différents éléments de son environnement comme par exemple la signalisation verticale (feu, stop, etc.) ou la présence de véhicules devant lui. Comme nous l'avons évoqué précédemment, dans ArchiSim, la perception de l'environnement des agents repose sur le serveur de vision. Ce dernier attend de recevoir toutes les requêtes de vision des agents de la simulation, calcule pour chaque agent les éléments qu'il peut voir et envoie à chaque agent la liste de ces éléments.

La localisation des objets précisée par le serveur de vision consiste en des positions absolues par rapport à la route et des distances relatives curvilignes (qui suivent donc le profil longitudinal de la route). Par la suite, l'agent conducteur se fait une vision ego-centrée en se fondant sur la vision physique fournie par le serveur de vision. Cette vision ego-centrée consiste à repositionner les agents et les objets perçus par rapport au chemin de l'agent (la trajectoire que ce dernier prévoit de réaliser).

Dans ArchiSim, l'environnement peut être qualifié de partiellement accessible (section 1.2.3) étant donné que la perception des agents est limitée en distance mais aussi en nombre de véhicules pouvant être perçus. Par conséquent, le serveur de vision ne transmet pas une description complète de l'environnement à un agent. De plus un agent ne reçoit les informations sur son environnement qu'une seule fois par pas de temps, l'environnement est donc discret. L'environnement est fortement dynamique du fait du contexte applicatif : le trafic est un contexte qui évolue rapidement au cours du temps, de plus, il peut y avoir une intervention d'un ou plusieurs êtres humains par le biais de simulateur(s) de conduite participant à la simulation et permettant à un ou des conducteur(s) réel(s) d'immerger dans une situation simulée.

### 4.1.2.4 Interactions entre agents et prise de décision

Dans ArchiSim, les agents évoluent de manière autonome. L'espace roulant est partagé entre tous les agents de la simulation et correspond de ce fait à une ressource commune ce qui peut conduire, dans certains cas, à un conflit de ressources. Les interactions entre agents sont principalement concurrentielles et conflictuelles.

Le mécanisme de décision dans ArchiSim est fondé essentiellement sur des algorithmes de résolution de conflits. Ces algorithmes sont exécutés à chaque pas de temps et ne tiennent pas compte des connaissances passées. Les agents ne sont pas dotés d'un mécanisme de mémorisation. Ce choix a été fait par les concepteurs d'ArchiSim car les mécanismes de mémorisation sont particulièrement complexes et encore mal connus. De plus, cette hypothèse permet de s'affranchir des coûts calculatoires de mémorisation qui peuvent être très élevés.

Les interactions entre les agents s'effectuent sans communications directes. Il s'agit plutôt de communications indirectes à travers l'environnement. Dans le cas d'ArchiSim, les seuls échanges de messages s'effectuent entre les agents et le serveur de vision.

## 4.1. LE MODÈLE DE SIMULATION COMPORTEMENTALE ARCHISIM

---

Après avoir présenté les grandes lignes d'ArchiSim, nous allons maintenant présenter les différents logiciels composant ArchiSim et les étapes de production de trafic.

### 4.1.3 Production de trafic sous ArchiSim

Pour le projet ArchiSim, un certain nombre d'outils ont été développés permettant de faciliter la mise en oeuvre d'expérimentations et le traitement des données collectées suite aux simulations.

#### 4.1.3.1 Création de réseaux

ArchiSim dispose d'un outil permettant la création et la saisie de réseaux : Wr2. Les routes et les intersections composant le réseau sont décrites de manière vectorielle à l'aide de fichiers générés automatiquement. Ces fichiers comportent des données telles que : les points kilométriques des axiales, la structure du réseau (graphe), la configuration des routes (délimitations et trottoirs), le marquage au sol des différents tronçons, les signalisations (panneaux à messages statiques ou dynamiques, feux tricolores, etc.).

#### 4.1.3.2 Génération du trafic

ArchiSim est doté d'un outil permettant la génération de la demande de trafic et l'initialisation du réseau pour la simulation : Distrib. Une demande de trafic consiste en une liste de véhicules à générer durant la simulation. Elle peut être générée selon deux types de fichiers :

- un fichier de type .VHS qui permet de faire apparaître simultanément, dès le début de la simulation, des véhicules caractérisés par leur position et leur vitesse initiale,
- un fichier .LOI qui définit les véhicules à générer en fonction de leur date de création, de leur position, de leur vitesse initiale, de l'itinéraire à suivre sur le réseau et des paramètres de comportements des agents (expérience, facilité de conduite, distance par rapport à la réglementation, etc.).

L'outil Distrib permet de préciser les caractéristiques de la distribution de trafic (figure 4.2). Il est possible de spécifier la répartition des véhicules selon leur type (pourcentage de poids lourds, de bus et de motos) et la densité du trafic par voie et par sens de circulation. L'outil permet aussi de spécifier les caractéristiques individuelles des agents telles que : le niveau d'expérience, la distance par rapport à la réglementation, etc.

#### 4.1.3.3 Simulation

La simulation à proprement parler est lancée avec le logiciel Dr2. Ce dernier prend en entrée les fichiers décrivant le réseau créés par Wr2 et la distribution de trafic générée par Distrib. Dr2 offre une interface graphique avec une vue 2D du réseau routier et de la simulation. Chaque mobile est

## CHAPITRE 4. ÉVALUATION ET VALIDATION DU MODÈLE

The screenshot shows a dialog box titled "Paramètres de génération" with the following fields and values:

- nom du circuit: INSERT.
- type de fichier à générer: loi
- nb de véhicule à générer (en mode vhs): [empty]
- nouvelle session: oui
- nombre de génération(s) créée(s): 0
- nom de la route: A2
- noTraj: 00
- PK de génération (dm): Valeur --> [empty]
- voie de génération déb: 1
- fin: 1
- vit initiale (dm/s): Valeur --> [empty]
- 200
- vit désir VL (dm/s): Valeur --> [empty]
- 200
- % de PL: 0.15000
- vit désir PL (dm/s): Valeur --> [empty]
- 200
- type de conducteurs: 0 -> Archisim
- AICC: Valeur --> [empty]
- 0
- Conducteur ARCHISIM:
  - dInfra: Valeur --> [empty]
  - 50
  - souplesse: Valeur --> [empty]
  - 50
  - dTraj: Repart Unif
  - de 35 a 45
  - expérience: Valeur --> [empty]
  - 0
  - dRglt: Valeur --> [empty]
  - 50
- débit (vh/h) pour toutes les voies: Valeur --> [empty]
- 1000
- durée du débit: Heure(s) 0
- Minute(s) 0
- Seconde(s) 10

Buttons at the bottom: générer, nouveau circuit, quitter.

FIGURE 4.2: L'outil de génération du trafic Distrib

simulé à travers un rectangle proportionnel aux dimensions du type et du modèle du véhicule qui lui est associé. Il est possible d'obtenir une visualisation 3D de la scène routière en utilisant l'outil Sim<sup>2</sup>.

### 4.1.3.4 Collecte et traitement des données

Pour pouvoir collecter un certain nombre de données concernant la simulation, l'utilisateur a la possibilité de placer sur le réseau un ensemble de capteurs permettant, à chaque passage d'un véhicule, d'enregistrer dans un fichier : le temps de passage, sa vitesse, son accélération, etc. Un outil de traitement de données nommé Dess permet de traiter les fichiers créés par les capteurs virtuels en agrégeant les données obtenues suivant une période de temps définie par l'utilisateur. Cet outil facilite l'obtention d'indicateurs statistiques et de courbes de trafic permettant d'analyser et d'étudier les situations de trafic qui ont émergé.

### 4.1.3.5 Vue d'ensemble des différents outils

La figure 4.3 donne une vue globale des différents outils développés autour d'ArchiSim et de leur utilisation. Le processus débute par la création du réseau et la génération du trafic, pour permettre par

## 4.2. ÉVALUATION DE NOTRE APPROCHE

la suite l'obtention d'un visuel de la simulation (2D et/ou 3D) et donner la possibilité à l'utilisateur de traiter et analyser les données résultantes.

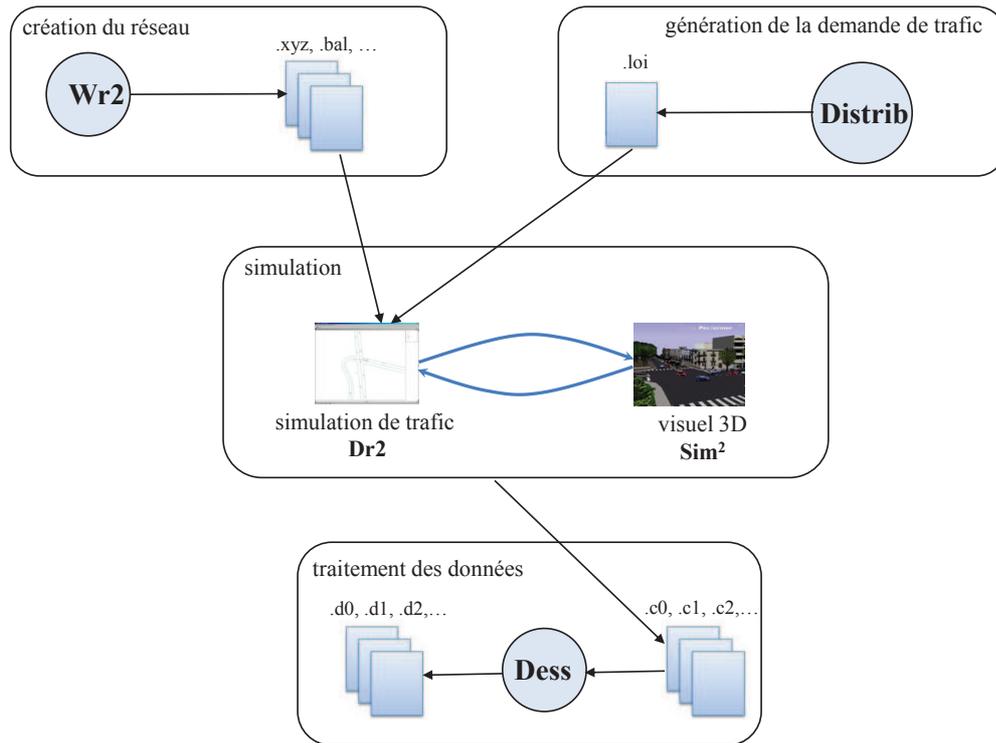


FIGURE 4.3: Outils de simulation développés pour ArchiSim

## 4.2 Évaluation de notre approche

Dans cette section, nous présentons l'évaluation de notre approche. L'évaluation est faite à deux niveaux, à un niveau individuel et à un niveau collectif. Au niveau individuel, nous utilisons différents scénarii afin d'observer des comportements que nous souhaitons tester et valider. Le niveau collectif permet de valider le trafic résultant à partir des comportements individuels et de leurs interactions.

### 4.2.1 Expérimentation sur la base de scénarii

La première partie de notre évaluation consiste en une évaluation subjective des comportements simulés des conducteurs. Pour évaluer les comportements individuels des agents en termes de positionnement dans l'espace routier, nous utilisons différents scénarii permettant de placer les agents dans des situations de trafic appropriées pour observer le comportement désiré. Nous avons commencé par valider le comportement habituel de déplacement des deux-roues [Ksontini *et al.*, 2012a, Ksontini *et al.*, 2012b]. Les scénarii présentés dans les sous-sections suivantes, nous ont permis d'évaluer notre modèle dans des situations de trafic fortement sujettes à une remontée de files de la part des deux-roues motorisés ou une remontée de file au niveau d'un carrefour : une situation d'arrêt au feu et une situation d'un carrefour avec tourner à gauche et à droite. Ensuite, nous validons notre modèle d'un point de vue macroscopique en comparant les données réelles collectées sur un circuit et les données de simulation.

#### 4.2.1.1 Scénario 1 : Situation d'arrêt au feu

Dans ce scénario, nous considérons une route avec deux voies physiques et de 1000 mètres de long. Nous plaçons un feu sur la route à 800 mètres et nous effectuons les simulations avec 20 véhicules afin de vérifier le comportement de remontée de files des deux-roues au niveau des feux. Nous comparons les simulations avec le modèle de référence (sans les voies virtuelles) et les simulations avec notre modèle (dans ce dernier cas, tous les agents utilisent notre modèle).

Nous pouvons constater à travers les simulations réalisées (figure 4.4) que dans le cas de notre modèle (figure à droite) l'agent conduisant les deux-roues a fait le choix dès le pas 1253 de s'insérer et de se faufiler entre les deux files de véhicules à l'arrêt en remontant jusqu'au feu (pas 2491). Cependant, sur les simulations de gauche (sans les voies virtuelles), nous constatons qu'au pas 3937, l'agent est toujours derrière la file de véhicules à l'arrêt. Ce comportement résulte de la représentation ego-centrée fondée sur les voies virtuelles. Cette représentation a permis à l'agent de détecter une voie virtuelle entre les deux files de véhicules arrêtés au feu. Ce type de comportement n'apparaît pas dans le modèle de référence, étant donné que les voies correspondent aux voies physiques définies par le marquage. Ces deux voies physiques sont occupées par les véhicules de devant. Par conséquent, avec le modèle de référence, le conducteur du deux-roues n'a pas d'autres choix que de rester bloqué derrière le véhicule qui est juste devant en attendant que le feu passe au vert. Ce type de comportement correspond rarement au comportement des deux-roues dans une situation de trafic réelle. Au contraire, nous pouvons constater que notre modèle reproduit bien des comportements que l'on peut observer fréquemment dans la réalité.

## 4.2. ÉVALUATION DE NOTRE APPROCHE

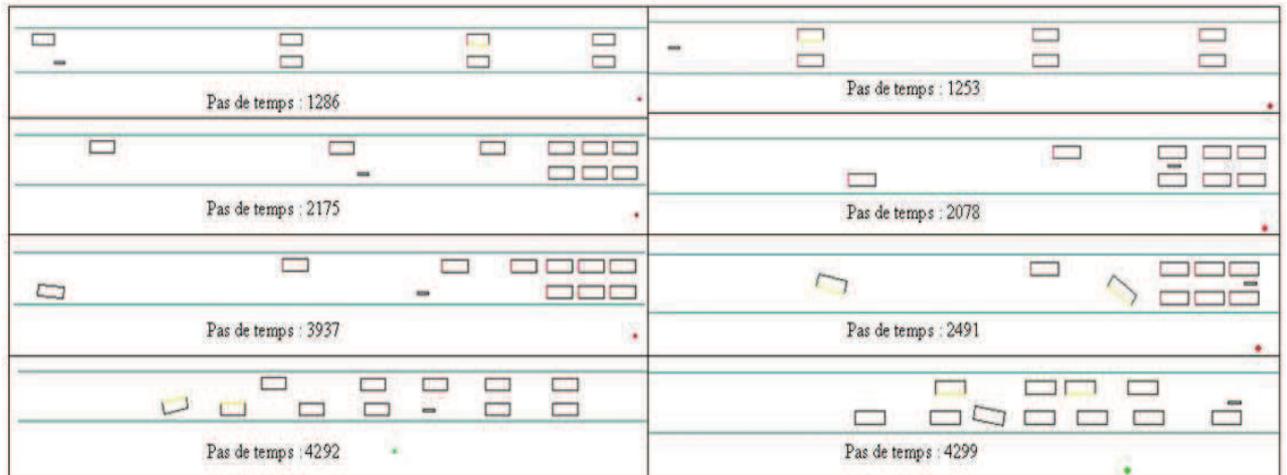


FIGURE 4.4: Comparaison du comportement des deux-roues avec le modèle de référence (sans voies virtuelles) et avec notre modèle (ajout des voies virtuelles)

Nous avons réalisé une série d'expérimentations pour comparer les vitesses des deux-roues motorisés dans le cadre de notre modèle d'agent fondé sur les affordances et dans le cas du modèle de référence (ArchiSim sans les voies virtuelles). La figure 4.5 illustre la courbe de vitesse des deux-roues motorisés avec notre modèle et avec le modèle de référence. Nous constatons, qu'entre le pas 0 et le pas 1200, le deux-roues motorisé accélère plus dans le cas de notre modèle que dans le modèle de référence. Ce comportement résulte de l'utilisation de la voie virtuelle, qui émerge au milieu, par l'agent dans le cadre de notre modèle alors que dans le modèle de référence le deux-roues motorisé reste bloqué derrière la file de véhicules plus lents. Entre les pas 1200 et 3000, la variation de vitesse du deux-roues est la même dans les deux cas : le deux-roues motorisé freine pour s'arrêter au feu. Au pas 3000, le feu passe au vert, le deux-roues motorisé accélère plus vite dans le cas de notre modèle. Étant donné qu'il précède les autres véhicules, il n'est gêné par aucun obstacle lorsque le feu passe au vert. Dans le cas du modèle de référence, il reste bloqué derrière la file de véhicules en attendant que les autres puissent se déplacer.

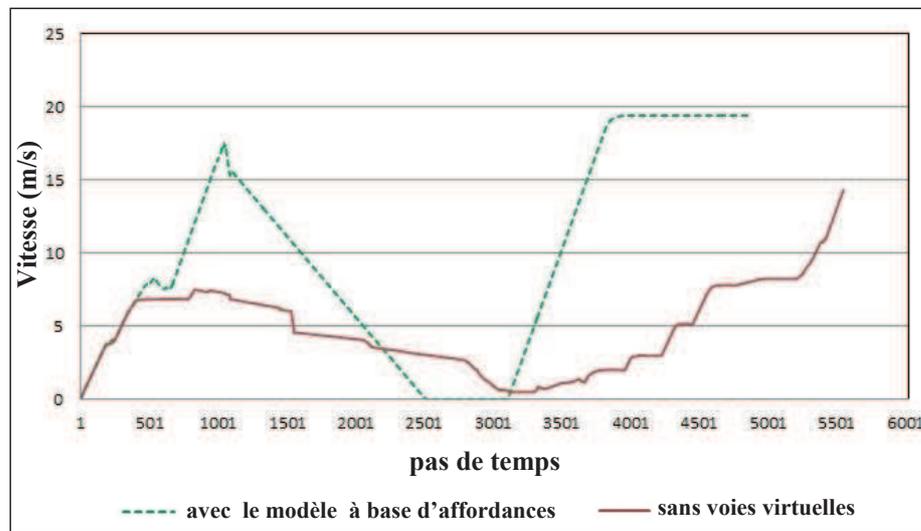


FIGURE 4.5: Courbe de vitesse des deux-roues motorisés

### 4.2.1.2 Scénario 2 : Situation d'un carrefour avec tourner à gauche et à droite

Ce deuxième scénario a pour objectif d'évaluer une situation au niveau d'un carrefour avec des véhicules qui tournent à droite, d'autres qui tournent à gauche et un véhicule qui se déplace tout droit. Ce scénario vise à reproduire un comportement que nous observons souvent au niveau des carrefours. Généralement, les véhicules qui tournent à droite se serrent plus vers la droite, ceux qui tournent à gauche se serrent vers le bord gauche de la route permettant ainsi aux véhicules allant tout droit de passer, ceci pour une route à 2 voies de circulation. Les figures 4.6 et 4.7 présentent une illustration du scénario destiné à évaluer les capacités d'adaptation des agents en termes d'occupation de l'espace. Sur la figure 4.6, les agents se déplacent en se référant aux voies physiques données par le marquage au sol. Nous nous intéressons au comportement que peut avoir le véhicule 0. Les véhicules 1, 3 et 5 vont tourner à droite. Les véhicules 2, 4 et 6 vont tourner à gauche. Nous constatons que le véhicule 0 reste bloqué derrière la file de véhicules qui tournent à droite. Ce n'est que lorsque les véhicules 1, 3 et 5 ont tourné à droite, que le véhicule 0 traverse le carrefour (pas de temps 671).

La figure 4.7 présente le même scénario avec des agents dotés de notre modèle. Le mobile 0 se construit une représentation de la situation. Étant donné que les véhicules 1, 3 et 5 tournent à droite, ils se serrent vers le bord droit de la route. Les véhicules 2, 4 et 6 observent le même comportement mais à gauche. Nous constatons que dès le pas de temps  $t = 3$ , le mobile 0 met son clignotant et commence à déboîter sur une voie virtuelle entre les deux files de véhicules. À  $t = 159$ , le mobile a déjà traversé le carrefour alors qu'au même pas de temps, il était encore bloqué derrière la file de véhicules dans la première simulation (figure 4.6). Le mobile 0 se construit une représentation ego-centrée de la situation fondée sur les affordances. Pour cela, il identifie trois affordances :

- la voie la plus à droite, formée par les véhicules 1, 3 et 5,

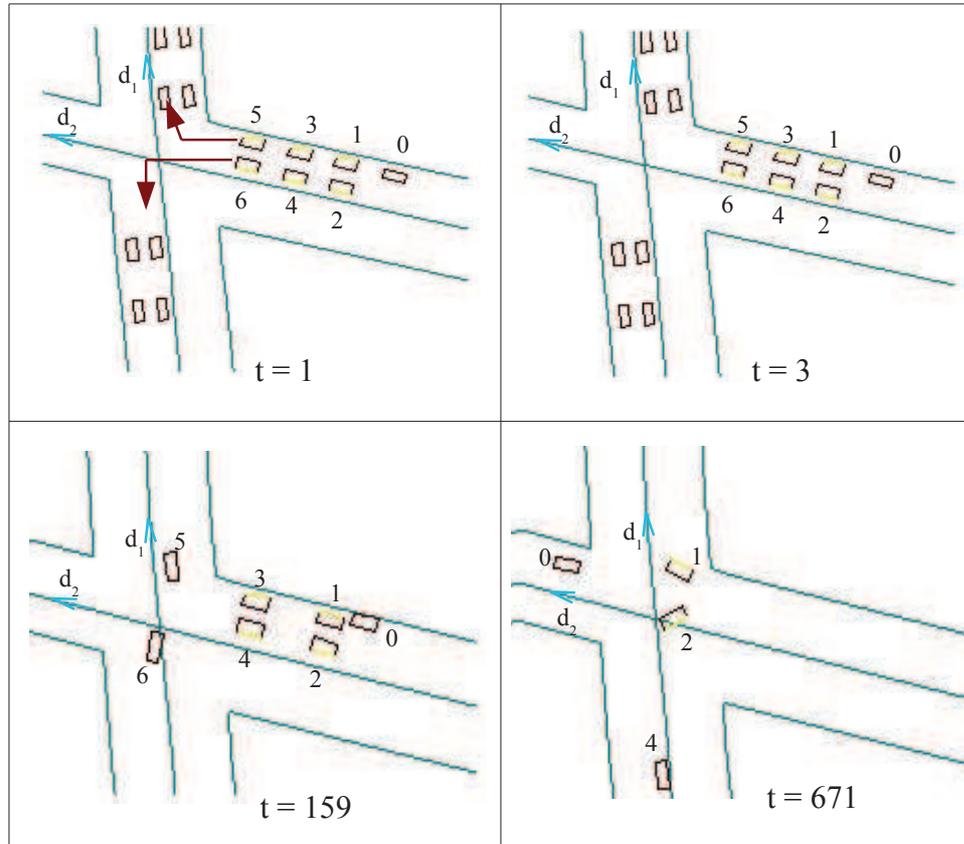


FIGURE 4.6: Simulation sans les voies virtuelles au niveau d'un carrefour

- la voie la plus à gauche, formée par les véhicules 2, 4 et 6,
- la voie qui émerge au milieu entre les deux files de véhicules.

Par conséquent, la représentation ego-centrée de l'environnement du mobile 0 est composée de ces trois affordances. Afin de prendre une décision, le mobile évalue ces dernières et opte pour la meilleure, c'est-à-dire, la voie virtuelle entre les deux files de véhicules. Cette voie présente de meilleures caractéristiques en termes de vitesse et permet au mobile de débloquer sa situation et de traverser le carrefour.

### 4.2.2 Simulation d'un circuit réel et validation

Pour évaluer d'un point de vue macroscopique le trafic obtenu, nous comparons les données de simulation avec des données collectées sur un circuit réel de 31 km de long avec des routes départementales, nationales et des autoroutes. Notons que pour la problématique de l'occupation de l'espace et plus particulièrement pour les phénomènes d'occupation de l'espace tels que nous pouvons les ob-

## CHAPITRE 4. ÉVALUATION ET VALIDATION DU MODÈLE

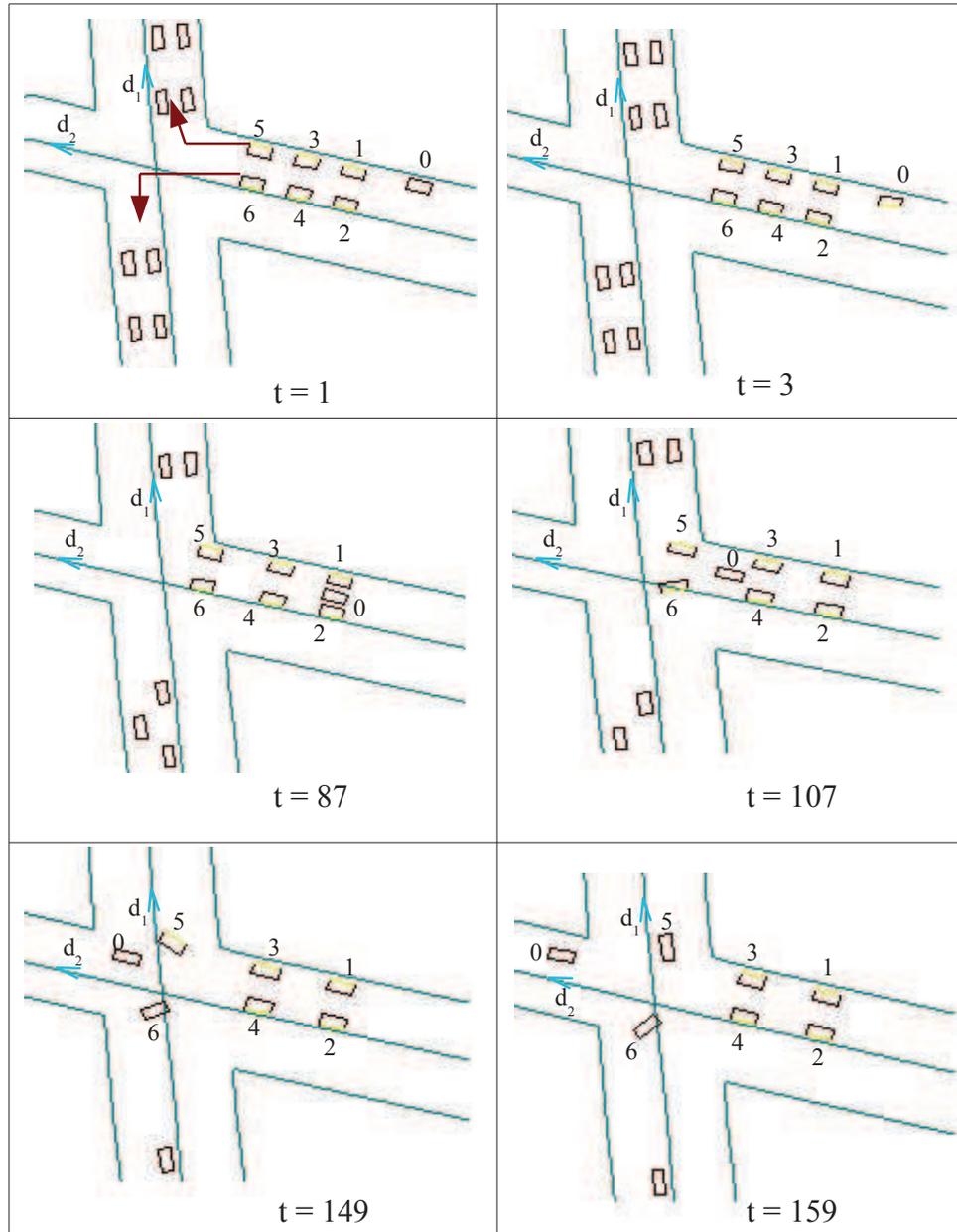


FIGURE 4.7: Simulation avec le modèle à base d'affordances au niveau d'un carrefour

server dans la réalité, il existe très peu de données permettant de valider notre modèle. Cependant, nous utilisons des données issues d'une étude effectuée par l'ADEME<sup>9</sup> [Ducreux, 2008].

9. Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie

### 4.2.2.1 Démarche et contexte

L'objectif de notre travail est d'améliorer la validité des simulations de trafic en milieu urbain et péri-urbain en prenant mieux en compte le contexte de conduite et les comportements des conducteurs en termes d'occupation de l'espace. Plus précisément, il s'agit de produire en simulation des comportements observés en situation réelle tels que les phénomènes de faufilement (2 roues, véhicules d'urgence). L'enjeu est double tant au niveau de la reproduction des comportements individuels et de leurs réalismes qu'au niveau collectif et de l'impact de ces comportements sur le trafic résultant. Afin d'atteindre cet objectif, il est primordial de valider notre modèle. Dans la section précédente, nous avons validé des situations typiques pour lesquelles un comportement particulier est attendu. Dans cette section, nous présentons le deuxième volet du processus de validation.

La première étape de la validation au niveau collectif consiste à trouver un réseau pour lequel des données réelles ont été mesurées afin de pouvoir les utiliser pour le modèle de simulation. La difficulté est de trouver des données précises et complètes. Malheureusement, pour des comportements liés à l'occupation de l'espace au sol, et plus particulièrement le comportement des deux-roues motorisés, les données sont extrêmement rares. Ce constat est dû à plusieurs raisons, le plus important dans le cadre de notre problématique, correspond au fait qu'il n'existe pas de capteurs permettant de collecter des données pour les déplacements en inter-files. Les capteurs utilisés permettent en général de mesurer des données correspondant à des déplacements sur les voies physiques. Pour disposer de telles données, il faudrait soit instrumenter des véhicules circulant sur le réseau soit extraire des données à partir de vidéos enregistrées. Le premier processus est très coûteux et n'entre pas dans les objectifs des organismes qui font la collecte des données réelles tels que les mairies ou les organismes publics. Ceci est principalement dû au fait que le souci majeur des villes est de récupérer des données pour leurs besoins propres et non pas spécialement pour permettre la validation de modèles de simulation de trafic. Le deuxième processus consistant à analyser des vidéos, est quant à lui coûteux en termes de temps de traitement. Nous ne disposons pas de telles données et il nous était impossible de le faire dans le cadre de cette thèse car le temps imparti pour répondre à notre problématique ne nous a pas permis d'inclure cette étape.

Dans un tel contexte, nous avons utilisé des données issues d'une étude effectuée par l'ADEME [Ducreux, 2008]. Cette étude avait pour but de comparer la consommation de carburant et les émissions des gaz polluants des deux-roues motorisés à celles des voitures. Il a été décidé de comparer les deux familles de véhicules dans des conditions d'utilisation similaires, du point de vue du conducteur : un trajet domicile-travail entre la banlieue (Linas) et le centre de Paris (Musée d'Orsay) en heure de pointe (heure d'arrivée à Paris : 8 h 30).

## CHAPITRE 4. ÉVALUATION ET VALIDATION DU MODÈLE

### 4.2.2.2 Description du réseau et caractéristiques

Le circuit utilisé correspond à un itinéraire de 31 km de long. Le départ avait lieu de Linas-Monthléry (91) et l'arrivée était au musée d'Orsay (75007). Ce parcours comprend des sections d'autoroute, des routes nationales ainsi que des rues en ville, et présente des degrés d'encombrement de la circulation très différents. Le trajet doit refléter les conditions de conduite auxquelles est confronté un conducteur lorsqu'il se rend dans un grand centre urbain.

La méthode de collecte des données de trafic consiste à faire des enregistrements simultanés, sur route, dans des conditions encadrées pour un scooter 125  $cm^3$ , une moto de 600  $cm^3$  et une voiture urbaine. Les conducteurs des deux-roues motorisés étaient expérimentés. Les conducteurs ont une conduite que l'on peut qualifier de raisonnée, c'est-à-dire qu'ils respectent les limitations de vitesse et ils sont autorisés à remonter les files ou se faufiler dans certaines situations et si les files de véhicules sont au ralenti.

Ces enregistrements nous fournissent des vitesses moyennes et des temps de parcours d'une voiture et d'un deux-roues dans des conditions d'utilisation similaires. Les résultats sont résumés dans le tableau 4.1.

TABLE 4.1: Données réelles sur un réseau de 31 km par jour et par type de véhicule

date	type du véhicule	temps de parcours	vitesse moy. (km/h)	nombre d'arrêts
03/04/2007	Voiture	1h 21min 30sec	23,1	67
	Scooter 125 $cm^3$	45min 13sec	41,3	21
04/04/2007	Voiture	1h 53min 21sec	16,5	118
	Scooter 125 $cm^3$	54min	34,8	32
	Moto 600 $cm^3$	49min 44sec	37,7	33
05/04/2007	Voiture	1h 29min 49sec	21,8	71
	Scooter 125 $cm^3$	43min 29sec	43,6	17
	Moto 600 $cm^3$	41min 04sec	45,9	17
06/04/2007	Voiture	1h 27min 51sec	21,3	68
	Scooter 125 $cm^3$	41min 22sec	42,6	22
	Moto 600 $cm^3$	42min 58sec	43,8	20
07/04/2007	Voiture	1h 21min 20sec	23,2	66
	Scooter 125 $cm^3$	44min 30sec	42,5	25
	Moto 600 $cm^3$	43min 46sec	42,9	24

Les données ont été recueillies sur 5 jours successifs mais en les analysant, nous pouvons observer que les temps de parcours du deuxième jour (le 04/04/2007) sont élevés par rapport aux autres jours

## 4.2. ÉVALUATION DE NOTRE APPROCHE

(tableau 4.1). Ce jour correspond, de fait, à un jour particulier étant donné qu'il s'agissait d'un jour de grève dans les transports publics. Nous ne le prenons pas en compte dans notre analyse car il n'est pas représentatif. Nous calculons alors une moyenne des temps de trajet, une moyenne des vitesses et une moyenne du nombre d'arrêts par type de véhicule (deux-roues motorisé et voiture) pour les 4 jours représentatifs. Les valeurs moyennes sont résumées dans le tableau 4.2.

TABLE 4.2: Données réelles moyennes sur un réseau de 31 km par type de véhicule

type du véhicule	temps de parcours moyen	vitesse moyenne (km/h)	nombre d'arrêts
Voiture	1h 25min 07sec	22,35	68
2RM	43min 09s	43,22	21

### 4.2.2.3 Résultats de simulation

Nous avons reproduit une portion de 23 km du circuit réel pour réaliser les simulations. Nous avons généré une demande de trafic hétérogène en plaçant une voiture et un deux-roues motorisé (2RM) dans les mêmes conditions de vitesse et de position. Nous avons aussi placé dans la simulation des capteurs virtuels positionnés aux mêmes points kilométriques que dans la réalité.

Les simulations ont été réalisées dans deux situations expérimentales différentes. Dans la première situation, les agents ont le comportement de référence qui correspond au modèle d'ArchiSim sans les voies virtuelles : les agents se positionnent sur la chaussée selon les voies physiques données par le marquage au sol. La deuxième situation correspond aux agents dotés du modèle fondé sur les affordances. Nous comparons d'abord les résultats de notre modèle avec ceux du modèle de référence dans le but d'évaluer l'impact de notre modèle sur le trafic. Ensuite, nous comparons nos résultats aux données réelles. Enfin, nous comparons nos résultats à ceux des travaux de [Bonte *et al.*, 2007]. Les données réelles et les résultats des simulations sont résumés dans le tableau 4.3.

Nous nous intéressons au comportement d'une voiture et d'un 2RM générés avec les mêmes caractéristiques afin d'étudier l'impact de notre modèle. Les données réelles montrent que le 2RM met la moitié du temps de parcours de la voiture pour un même trajet. Nous ne retrouvons pas cette même tendance pour les résultats de simulation du modèle de référence où les temps de parcours entre moto et voiture sont très proches. Ce dernier résultat est dû au fait, que dans le modèle de référence, le comportement de déplacement est le même pour les voitures et les 2RM. Tous les usagers de la route utilisent les voies physiques données par le marquage au sol (figure 4.8).

Nous comparons les résultats de simulation de notre modèle avec ceux du modèle de référence. La différence entre les temps de parcours de la voiture et de la moto a été améliorée par rapport au modèle de référence, la moto prend moins de temps pour effectuer le même trajet (figure 4.8). Par conséquent, la vitesse moyenne de la moto est supérieure à celle de la voiture. Nous pouvons égale-

## CHAPITRE 4. ÉVALUATION ET VALIDATION DU MODÈLE

TABLE 4.3: Données réelles et données de simulation pour une route de 23 km

	Type du véhicule	Temps de parcours	Vitesse moy (km/h)	Nombre d'arrêts
Données réelles	Voiture	1h 03min 09sec	21,85	51
	2RM	32min 01sec	43,10	16
Modèle de référence	Voiture	54min 21sec	25,40	151
	2RM	52min 58sec	26,05	137
Résultats de [Bonte <i>et al.</i> , 2007]	Voiture	57min 06sec	24,29	77
	2RM	32min 32sec	42,64	31
Modèle fondé sur les affordances	Voiture	58min 47sec	23,52	91
	2RM	32min 10sec	43,09	35

ment constater que le nombre d'arrêts de la moto est inférieur à celui de la voiture. Ainsi, le modèle fondé sur les affordances permet à l'agent conduisant la moto d'identifier les voies virtuelles offertes par l'environnement. En raison de leur taille, les 2RM ont tendance à utiliser les voies virtuelles plus que les autres types de véhicules. Leur temps de parcours et le nombre d'arrêts sont inférieurs à ceux des voitures.

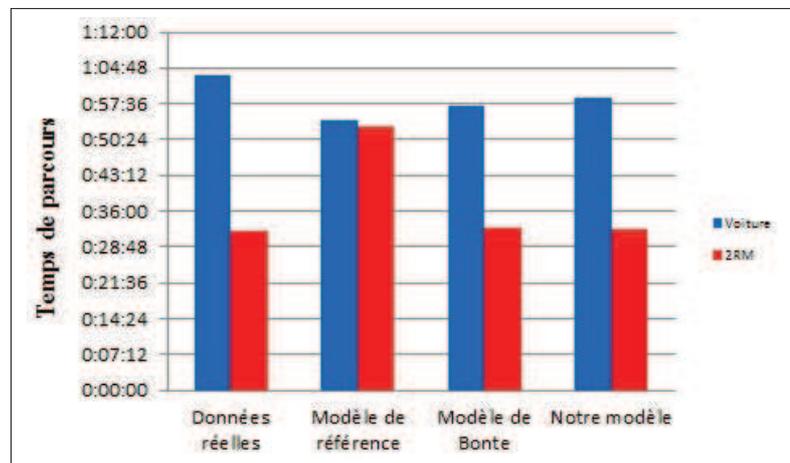


FIGURE 4.8: Comparaison entre les temps de parcours réels et les temps de parcours simulés

Notons que l'on observe les mêmes tendances, lorsque l'on compare les résultats obtenus avec notre modèle et les données réelles. L'écart entre les résultats de simulation et les données réelles (notamment l'écart entre les temps de parcours de la voiture et les nombres d'arrêts) est dû à un problème de calibration de la simulation. Nous ne disposons en effet d'aucune donnée permettant d'ajuster précisément les débits ou les vitesses des autres véhicules. De plus, en comparant nos résultats et ceux de [Bonte *et al.*, 2007], nous observons des résultats similaires. Notre modèle ne détériore pas les résul-

tats obtenus par rapport à ceux de [Bonte *et al.*, 2007]. Cependant, notre approche permet de couvrir des situations plus larges, appliquées à d'autres types d'usagers que les 2RM.

Nous pouvons conclure que notre modèle prend en compte le fait que la pratique du faufilement est plus utilisée par les deux-roues motorisés que par les autres types de véhicules. Nous avons mis en évidence cette différence de comportement dans [Ksontini *et al.*, 2012a, Ksontini *et al.*, 2012b] où nous avons pu observer que le conducteur de la voiture choisit la solution d'une voie virtuelle uniquement s'il a un comportement non normatif (cas extrême). Le choix des voies virtuelles n'est pas systématique, il dépend des caractéristiques des voies ainsi que des caractéristiques du véhicule (la taille par exemple) et des caractéristiques individuelles des agents (la distance par rapport à la réglementation). Notre modèle est générique dans le sens où il n'est pas spécifique à un type particulier de conducteur. L'hétérogénéité des comportements résulte des différents contextes de conduite et des caractéristiques individuelles des conducteurs couplés à des règles génériques. Nous allons conclure la validation de notre modèle par une dernière expérimentation qui permet d'illustrer la généralité de notre proposition. Cette expérimentation consiste à introduire un véhicule d'urgence dans la simulation et à comparer son temps de parcours par rapport aux autres usagers de la route.

### 4.2.2.4 Généralisation au cas du véhicule d'urgence

La comparaison des données de simulation avec les données réelles nous a permis de conclure que nous avons réussi à reproduire les tendances observées dans les données réelles. Les voitures mettent deux fois plus de temps que les deux-roues motorisés pour le même trajet et s'ils circulent dans les mêmes conditions. Dans cette dernière section de validation de notre modèle, nous proposons des expérimentations sur une portion de 23 km du circuit réel décrit précédemment en intégrant un véhicule d'urgence. Ces expérimentations ont pour objectif de montrer la généralité de nos modèles et la possibilité de leurs applications à d'autres types d'usagers.

Afin de reproduire le comportement réel des véhicules d'urgence, nous avons introduit un nouveau comportement chez les autres usagers qui consiste à se décaler en présence d'une ambulance pour lui faciliter le passage. Nous qualifions ce comportement de coopératif et il est obligatoire dans la réalité en présence des véhicules d'urgence. Nous pouvons observer ce comportement coopératif à travers la figure 4.9. Le véhicule 1 correspond au véhicule d'urgence, il a la sirène déclenchée et les phares allumés. Nous pouvons constater que les véhicules devant détectent la présence du véhicule d'urgence et essaient de se décaler à droite et à gauche (si c'est possible) afin de faciliter le passage au véhicule 1. Notamment, les véhicules 3, 5 et 7 se décalent vers la droite et les véhicules 2, 4, 6 et 8 se décalent vers la gauche. Tous ces véhicules se remettent au milieu de leurs voies après le passage du véhicule d'urgence.

Le comportement coopératif peut aussi être observé avec les deux-roues motorisés dans certaines situations, notamment sur le périphérique parisien. Concernant les véhicules d'urgence, la seule différence de comportement par rapport aux autres usagers correspond au fait que ce type d'usager force

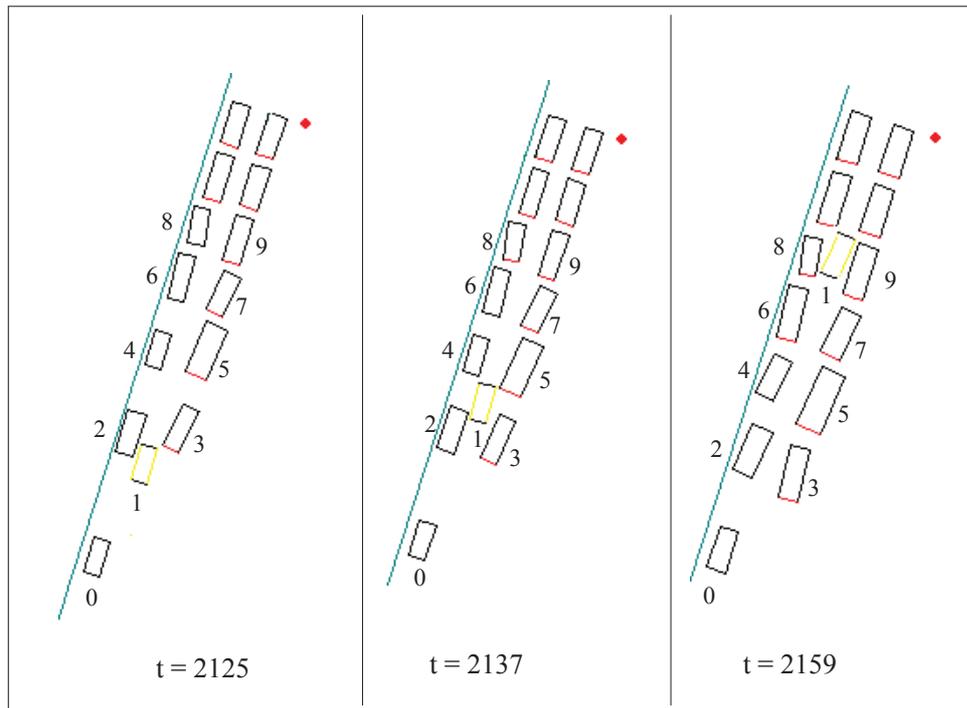


FIGURE 4.9: Écartement des autres véhicules en présence d'un véhicule d'urgence

le passage en se positionnant en inter-file non pas parce qu'il y a un espace suffisant leur permettant de passer mais pour créer l'espace grâce à la coopération des autres. Une fois les autres se décalent, le véhicule d'urgence peut alors se déplacer en se fondant sur nos modèles de construction de la représentation ego-centrée de l'environnement et d'identification des affordances développées dans cette thèse.

Nous présentons deux expérimentations sur le circuit réel simulé en introduisant un véhicule d'urgence. Dans la première, nous avons apporté les modifications de comportement que nous venons de décrire et nous comparons le temps de parcours d'un véhicule normal, d'un deux-roues motorisé et d'un véhicule d'urgence générés avec les mêmes caractéristiques de vitesse et de position. Dans la deuxième expérimentation, nous apportons une nouvelle modification au niveau du comportement du véhicule d'urgence. Dans la réalité, quand une ambulance, circulant en situation d'urgence et allumant la sirène, ne s'arrête pas aux feux rouges. Nous avons introduit cet aspect au niveau du comportement des véhicules d'urgence et nous comparons les temps de parcours du véhicule d'urgence avec les autres usagers comme pour la première expérimentation.

Les résultats de la première expérimentation sont illustrés par la figure 4.10. Nous pouvons constater que le véhicule d'urgence met moins de temps qu'un véhicule normal pour effectuer le même trajet mais il met plus de temps qu'un deux-roues motorisé. Ce résultat s'explique par le fait que ce dernier a plus de facilité à se faufiler entre les véhicules qu'un véhicule d'urgence vu sa taille.

## 4.2. ÉVALUATION DE NOTRE APPROCHE

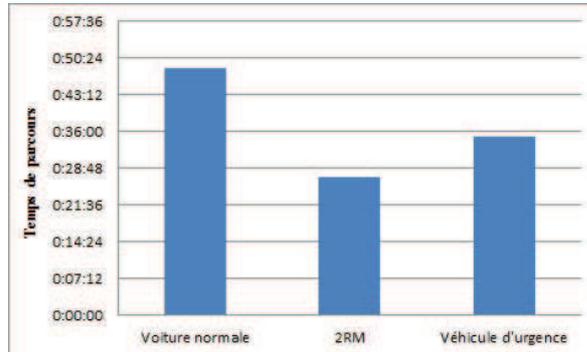


FIGURE 4.10: Résultats de simulation dans le cas où le véhicule d'urgence s'arrête aux feux

En introduisant le fait que le véhicule d'urgence ne s'arrête pas aux feux, nous constatons à travers la figure 4.11 que ce dernier met moins de temps qu'un véhicule normal et qu'un 2RM pour effectuer le même trajet. Notons que la différence entre le temps de parcours du véhicule d'urgence et celui du 2RM n'est pas très importante. Ce résultat est dû au fait que le 2RM compense la différence par la facilité des remontées de files et des faufilements. Ces résultats sont plus réalistes, dans la mesure où un véhicule d'urgence doit mettre moins de temps que les autres véhicules pour un même trajet.

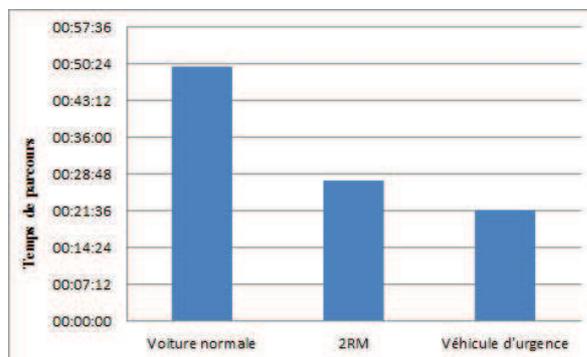


FIGURE 4.11: Résultats de simulation dans le cas où le véhicule d'urgence ne s'arrête pas aux feux

Ces expérimentations ont eu pour seul but de vérifier la généricité de notre approche. Pour calibrer et valider le modèle, il nous manque l'accès à des données réelles. Ces résultats permettent toutefois de dire que notre modèle reproduit les tendances observées lors des remontées de files effectuées par les véhicules d'urgence. Les affordances résultent du contexte routier et des interactions des autres entités. Les espaces vides se créent grâce à la coopération des autres agents permettant ainsi au véhicule d'urgence de passer entre deux files de véhicules.

### 4.3 Conclusion

Nous avons implémenté notre modèle avec l’outil de simulation de trafic ArchiSim. Nous avons validé quelques comportements individuels notamment le faufilement et la remontée de files des deux-roues motorisés. Au niveau collectif et sur un réseau complexe, nous obtenons des tendances comparables entre les résultats obtenus par notre modèle et ceux issus de données réelles. Avec notre modèle, l’écart entre les temps de parcours d’une voiture et d’une moto a été amélioré par rapport aux résultats de simulation du modèle de référence et se rapproche de la réalité.

Nous pouvons conclure que notre modèle rend compte de la pratique de faufilement pour les deux-roues motorisés. Le choix des voies virtuelles n’est pas systématique, il dépend des caractéristiques des voies ainsi que des caractéristiques du véhicule (la taille par exemple) et des caractéristiques individuelles des agents (la distance par rapport à la réglementation).

L’hétérogénéité des comportements résulte des différents contextes de conduite et des caractéristiques individuelles des conducteurs couplés à des règles génériques. Notre modèle est générique dans le sens où il n’est pas spécifique à un type particulier d’usager ni à une situation donnée. Nous l’avons utilisé pour reproduire des situations telles que l’approche des carrefours ou le comportement en présence d’un véhicule d’urgence.

# Conclusion générale

## 1 Introduction

Actuellement, nous sollicitons de plus en plus les réseaux routiers pour nos déplacements quotidiens. La montée des préoccupations environnementales et la volonté d'améliorer la sécurité routière font de la simulation de trafic routier une méthode incontournable pour analyser les comportements et trouver des solutions durables aux différents problèmes rencontrés. Les simulations permettent de réduire les coûts et les risques liés aux expérimentations des phénomènes complexes. Dans ce sens, les simulations de trafic de type microscopique sont de plus en plus fréquentes pour certaines problématiques qui nécessitent d'avoir une granularité fine des comportements. Elles s'intéressent à la reproduction réaliste du déplacement individuel de véhicules et permettent de rendre compte des comportements de prise de décision sous-jacents des conducteurs.

Nous avons présenté au chapitre 1 les différentes approches existantes de simulation microscopique. Certaines sont fondées sur l'utilisation d'équations différentielles telles que les lois de poursuite. Ces approches analytiques manquent de généralité puisque les équations sont obtenues à partir de données mesurées dans une situation de trafic particulière et sont difficilement généralisables à d'autres situations. Nous avons aussi présenté les travaux utilisant une approche comportementale fondée sur les systèmes multi-agents. Cette approche privilégie l'étude des interactions des entités composant le trafic plutôt que l'étude mathématique du trafic ; on parle aussi d'approche « centrée-individu ». Dans cette approche, une entité simulée prend en compte son environnement et s'adapte en permanence à son contexte routier. Les phénomènes de trafic (congestion, occupation des voies de circulation, etc.) émergent car ils sont le résultat, d'une part, des pratiques individuelles et des interactions et, d'autre part, de la variété (hétérogénéité) des comportements (véhicules hétérogènes et comportements de conducteurs hétérogènes).

Nous avons abordé, la simulation du trafic routier en considérant une approche comportementale fondée sur les systèmes multi-agents. Nos travaux s'inscrivent dans le cadre du projet de simulation de trafic comportementale ArchiSim de l'IFSTTAR (ex INRETS). Chaque conducteur simulé est un agent possédant ses propres caractéristiques de conduite et ayant un itinéraire à suivre. L'architecture d'ArchiSim permet de coupler un simulateur de conduite avec une simulation de trafic. La motivation

## CHAPITRE 4. CONCLUSION GÉNÉRALE

---

d'une telle approche est de pouvoir étudier le comportement d'un être humain plongé dans un trafic visuellement et statistiquement réaliste.

### 2 Contributions

Les travaux conduits dans le cadre de cette thèse ont pour but d'étendre le champ de validité des simulations de trafic en milieu urbain et péri-urbain, avec notamment une meilleure prise en compte du contexte de conduite, de l'hétérogénéité des véhicules (2 roues-motorisés, véhicule léger, poids lourd, etc.) et des comportements des conducteurs en termes d'anticipation de positionnement sur les voies et d'occupation de l'espace. Le but est de produire en simulation des comportements observés en situation réelle tels que les phénomènes de faufilement. Nous avons présenté au chapitre 2 quelques pratiques que l'on peut observer dans la réalité en termes d'occupation de l'espace au sol ainsi que les travaux en simulation qui se sont intéressés à cette problématique. Pour résumer, une grande partie des outils de simulation existants supposent que le positionnement des véhicules sur la chaussée est régi par les voies physiques, ce qui ne permet pas de simuler les phénomènes observés en termes d'occupation de l'espace roulant. Très peu de travaux en simulation multi-agents de trafic se sont intéressés à ces pratiques.

Afin de proposer une solution générique, qui prenne en compte les pratiques des conducteurs en termes d'occupation de l'espace, nous nous sommes intéressés à la manière avec laquelle un conducteur interagit avec son environnement et comment il se représente le contexte dans lequel il se trouve.

#### 2.1 Un modèle d'interaction avec l'environnement fondé sur les affordances

Nous avons proposé un modèle d'interaction avec l'environnement fondé sur le concept d'affordance. Ce concept permet d'identifier les possibilités d'action offertes par l'environnement. Ces dernières dépendent fortement du contexte, des capacités et des objectifs des agents. Nous avons opté dans cette thèse pour une version étendue du concept d'affordance en incluant l'aspect cognition dans l'identification de celles-ci. Les agents raisonnent sur les informations perçues afin d'identifier les possibilités en termes d'action qui s'offrent à eux.

Dans le cadre de nos travaux, l'espace laissé libre sur la chaussée par les véhicules ne correspond pas à une entité qui se manifeste physiquement d'une manière effective mais à quelque chose qui peut être perçue par les agents. Cet espace formé par les véhicules offre la possibilité de passer. Notre modélisation correspond dans un sens à la vision du concept d'affordance présentée par la psychologie écologique.

La modélisation du concept d'affordance pour la problématique de l'occupation de l'espace permet d'avoir un certain niveau d'abstraction du modèle dans le sens où les affordances considérées ne sont pas fournies par des entités ou par des relations à des agents spécifiques. Elles sont plutôt four-

nies par une situation particulière dans laquelle un agent se trouve. Nous avons proposé un modèle générique permettant d'identifier les possibilités qui s'offrent à l'agent en termes d'action.

Le concept d'affordance s'adapte bien à la problématique de l'occupation de l'espace et nous l'avons adapté à la simulation de trafic routier. Dans le cadre de notre application, les agents suivent des voies pour se déplacer. Nous avons conservé cette notion de voie de déplacement dans notre modélisation de l'environnement et nous considérons que les affordances correspondent aux voies possibles qui émergent à partir des interactions entre les usagers et l'environnement. L'utilisation du concept d'affordance dans le cadre de la simulation du trafic routier constitue une approche nouvelle et originale. Ce concept permet d'accorder un rôle plus important à l'environnement et de mieux considérer les interactions entre les agents et leur environnement. D'un point de vue conceptualisation, nous avons montré qu'il était tout à fait possible d'incorporer ce concept dans une simulation multi-agent et qu'il n'est pas incompatible avec une telle approche.

### 2.2 Une représentation ego-centrée de l'environnement

Nous avons proposé de doter les agents d'une représentation ego-centrée de l'environnement leur permettant de prendre des décisions en termes d'occupation de l'espace. Cette représentation de l'environnement est composée par les affordances identifiées. Elle est de ce fait orientée vers les possibilités d'action en termes d'occupation de l'espace et prend en compte les contraintes physiques de l'environnement (géométrie de la chaussée), le contexte routier (trafic, proximité de carrefour), les objectifs et les besoins de l'agent.

Cette représentation ego-centrée couvre l'environnement immédiat, adjacent mais aussi l'environnement non directement adjacent. Ces alternatives nous permettent de prendre en compte non seulement les possibilités d'occupation de l'espace qui sont proches de l'agent mais aussi celles qui se situent plus loin permettant d'avoir une perception plus étendue de l'environnement dans lequel sont plongés les agents. Nos modèles ainsi que nos algorithmes permettant de décrire le comportement des agents ont été présentés au chapitre 3 de la thèse.

Les affordances couplées avec une représentation ego-centrée de l'environnement permettent à l'agent d'identifier et de raisonner sur les différentes possibilités en termes d'action s'offrant à lui tout en prenant en compte ses propres caractéristiques.

### 2.3 Validation du modèle dans le cadre de la simulation du trafic routier

Pour valider notre approche, nous avons implémenté nos modèles dans l'outil de simulation ArchiSim et réalisé différentes expérimentations. L'évaluation de nos travaux est menée à deux niveaux : à un niveau individuel en utilisant différents scénarii permettant d'évaluer les comportements individuels des agents de manière subjective et à un niveau collectif en simulant un circuit réel et en comparant les données de trafic réelles et celles simulées. Nous pouvons conclure que notre modèle

## CHAPITRE 4. CONCLUSION GÉNÉRALE

---

rend compte de la pratique de faufilement des deux-roues motorisés, et dans certains cas, d'autres types de véhicules. Le choix des voies virtuelles n'est pas systématique, il dépend des caractéristiques des voies ainsi que des caractéristiques du véhicule (la taille, le type du véhicule, etc.) et des caractéristiques individuelles des agents (la distance par rapport à la réglementation).

L'hétérogénéité des comportements résulte des différents contextes de conduite et des caractéristiques individuelles des conducteurs couplés à des règles génériques. Notre expérimentation sur la remontée de file des véhicules d'urgence illustre le fait que la solution que nous proposons rend compte de situations diverses et montre la généralité de l'approche proposée. La représentation ego-centrée fondée sur les affordances permet à chaque agent de prendre une décision en matière d'occupation de l'espace, en fonction de ses propres caractéristiques et du contexte.

### 3 Perspectives

L'adaptation du concept d'affordance à la simulation du trafic constitue une approche originale et nouvelle. Elle fournit une première base de réflexion pour les problématiques existantes en simulation et plus particulièrement en simulation de trafic. De plus, elle est sujette à de nombreuses extensions possibles offrant ainsi l'opportunité pour des travaux futurs. Nous présentons dans cette section, quelques extensions possibles aux travaux présentés dans cette thèse et détaillons quelques perspectives de recherche plus générales.

#### 3.1 Validation

Concernant la validation, plusieurs perspectives sont proposées. Le premier problème rencontré pour la validation de nos travaux concerne la difficulté d'acquérir des données réelles détaillées illustrant les pratiques simulées. Notons que pour la problématique de l'occupation de l'espace et plus particulièrement pour les phénomènes d'occupation de l'espace tels que nous pouvons les observer dans la réalité, il existe très peu de données car les capteurs permettant de mesurer l'occupation de l'espace n'existent pas ou ne sont pas déployés. Néanmoins, il s'agit d'une préoccupation qui commence à intéresser les autorités publiques vu les enjeux sécuritaires que représente le phénomène de la circulation en inter-files des deux-roues motorisés. Des projets de recherche sont en cours pour développer ces capteurs. Nous espérons disposer, dans le futur, de données plus détaillées concernant cette manœuvre afin de pouvoir mieux valider les modèles développés.

Une deuxième perspective consiste à valider les comportements sur simulateur de conduite, c'est-à-dire faire conduire un sujet sur le simulateur, ou lui présenter des simulations. Le sujet observe et analyse les différents comportements des deux-roues motorisés. Ces derniers doivent lui paraître le plus réalistes possibles. Les expérimentations doivent être élaborées avec l'aide de psychologues de conduite afin de mener à bien ce type de validation. Il serait en outre intéressant de comparer

les avis d'automobilistes et de conducteurs de deux-roues pour juger de la pertinence et du réalisme des comportements simulés. Les conducteurs des 2RM pourraient déterminer si les décisions prises auraient été les leurs. Les automobilistes, de leur côté pourraient juger du réalisme des situations dans lesquelles ils ont été immergés.

Enfin, pour compléter la validation, nous proposons de tester notre modèle pour d'autres types de situations. Dans cette thèse, nous n'avons pas pu valider notre modèle de représentation ego-centrée de l'environnement dans des situations avec un nombre élevé de voies telles que les gares de péage autoroutiers. Nous souhaitons tester l'impact de la prise en compte de l'environnement non adjacent sur la prise de décision des agents notamment dans des cas où la meilleure solution ne se trouve pas forcément dans l'environnement directement adjacent de l'agent.

### 3.2 Amélioration du modèle d'affordance

Nous avons proposé un modèle d'agent pour la construction d'une représentation ego-centrée de l'environnement fondée sur le concept d'affordance. La première perspective que nous proposons concerne la généralisation de notre modèle à d'autres types de comportements tels que les comportements de déplacements des cyclistes et des piétons. Il serait intéressant d'utiliser le concept d'affordance pour le déplacement de ces deux types d'utilisateurs. Concernant les cyclistes, nous pouvons garder la notion de voies virtuelles pour leur déplacement. Leurs interactions avec les autres véhicules sont certainement moins importantes que celles des 2RM qui se faufilent entre les véhicules. Cependant, dans certains pays, ils partagent la voie dédiée avec d'autres utilisateurs tels que les bus ou alors ils circulent sur des zones sans marquage au sol. Notre modèle peut tout à fait être appliqué dans ces situations. Pour les piétons, ils se déplacent dans des zones où il n'y a pas de règles de structuration de l'environnement. Il serait donc intéressant d'adapter notre modèle à ce type d'utilisateur. Néanmoins nous devons apporter quelques modifications à notre modèle pour l'adapter aux spécificités de déplacements des piétons. Ces derniers n'utilisent pas des voies pour se déplacer, nous pouvons les remplacer par des zones qui sont représentées d'une manière ego-centrée autour de l'agent. Chaque zone est caractérisée par un certain nombre de propriétés telles que la taille, la densité, etc. Les affordances pourraient dans ce cas correspondre à une position future désignée par des coordonnées  $(x, y)$ .

La deuxième perspective, à ce niveau, que nous souhaitons explorer concerne un aspect plus général de la modélisation du concept d'affordance. La solution proposée consiste à stocker les affordances au niveau de l'agent. Nous avons présenté au chapitre 3 de la thèse les avantages d'une telle modélisation. Nous souhaitons cependant, dans un travail futur, modéliser le concept en accordant plus d'importance à l'environnement en stockant les affordances au niveau de ce dernier. La question posée par cette approche correspond au fait que les affordances stockées au niveau de l'environnement ne seront pas ego-centrées. Elles garderont tout de même leurs caractéristiques relationnelles vis-à-vis de l'agent. La disponibilité de l'affordance pour un agent dépendra, dans ce cas aussi, des caractéris-

## CHAPITRE 4. CONCLUSION GÉNÉRALE

---

tiques propres de l'agent. L'objectif de cette perspective consiste à étendre la manière de modéliser les affordances dans le cadre de la simulation multi-agent et à la comparer avec l'approche proposée dans cette thèse en termes d'impact sur les performances de calcul. Cependant afin de permettre la perception directe des affordances, il faudrait étendre la modélisation de l'environnement en rajoutant des mécanismes permettant d'identifier les affordances. Nous pouvons dans ce sens, annoter l'environnement ou utiliser la notion de filtre pour activer telle ou telle affordance pour un agent donné.

### 3.3 Perspectives applicatives

Nous proposons aussi des perspectives applicatives à nos travaux de recherche. Toujours dans le cadre de la problématique de l'occupation de l'espace routier, notre proposition peut être étendue à la problématique de l'allocation dynamique des voies et la notion des voies dédiées. La gestion dynamique des voies de circulation désigne des méthodes permettant d'augmenter ou de modifier le nombre de voies d'une infrastructure routière grâce à une redéfinition du marquage au sol en prenant en compte l'état du trafic. Par exemple, les voies réversibles qui consistent à utiliser une voie de circulation alternativement dans un sens ou dans l'autre pour coller au plus près du trafic qui est, dans ce cas, asymétrique (le flux dominant du matin en entrée de ville se retrouve le soir en sortie de ville). Un autre exemple de l'allocation dynamique de la route est donné par les voies supplémentaires de pointe ou voies auxiliaires dynamiques (« *Peak lanes ou Rush Hour Lanes* »). Ces dernières consistent à ouvrir la BAU (Bande d'Arrêt d'Urgence) à la circulation temporaire et uniquement aux heures de pointe. Un dernier exemple consiste à changer dynamiquement le marquage au sol, en fonction de la densité du trafic et de sa vitesse, en utilisant des dispositifs lumineux. Afin d'introduire ces notions au niveau de la simulation, nous pouvons utiliser le concept d'affordance. Contrairement à notre modèle où les affordances sont stockées au niveau de l'agent, ces dernières seront plutôt stockées au niveau de l'environnement. Dans ces cas de figure, l'environnement offre de nouvelles possibilités d'occupation de l'espace au sol suivant le nouveau marquage proposé. Dans le même contexte, les voies dédiées, par exemple au co-voiturage, au bus ou aux vélos, offrent des possibilités en termes d'occupation de l'espace à certains usagers selon leurs types et leurs caractéristiques physiques. Pour prendre en compte ces extensions au niveau de la modélisation, nous pouvons envisager par exemple d'annoter l'environnement afin de permettre l'identification des affordances par les agents.

Toujours dans le cadre de la simulation, nous proposons une autre perspective qui concerne plutôt les choix de déplacement. Pour une problématique de choix du mode de transport, nous pouvons supposer que les agents ont plusieurs possibilités de moyens de transport. Ils peuvent se déplacer en voiture, en métro, en bus, etc. Ces possibilités de déplacement peuvent être considérées comme des affordances offertes à l'agent par les entités qui existent dans l'environnement. Elles peuvent dépendre des objectifs et des caractéristiques individuelles des agents. Par exemple, dans une situation donnée, un agent a besoin de se déplacer d'un point *A* vers un point *B*. Il peut prendre un taxi, le bus ou le

### **3. PERSPECTIVES**

---

méto. Ces trois possibilités peuvent être considérées comme des affordances. L'agent les évaluera et choisira celle qui répond le mieux à ses objectifs et ses caractéristiques individuelles.

## CHAPITRE 4. CONCLUSION GÉNÉRALE

---

# Publications

## Conférences Internationales

Ksontini F., Guessoum Z., Mandiau R., Espié S. (2013). Using Ego-centred Affordances in multi-agent traffic simulation. proceedings of the Twelfth International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS'2013, May 6-10), pages 151-158, Saint Paul, Minnesota, USA, 2013 (papier long, 23% d'acceptation) .

Feirouz Ksontini, Stéphane Espié, Zahia Guessoum and René Mandiau. (2012). Traffic Behavioral simulation in urban and suburban - Representation of the drivers' environment, In Proceedings 10th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (PAAMS'12), pages 115-125, publié dans Advances in Intelligent and Soft Computing, Vol.155, SpringerLink (papier long, position 52 sur 701 conférences selon « Estimated Impact of Conference »).

Feirouz Ksontini, Stéphane Espié, Zahia Guessoum and René Mandiau. (2012). A driver ego-centered environment representation in traffic behavioral simulation (short paper). In Proceedings 10th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (PAAMS'12), pages 249-253, publié dans Advances in Intelligent and Soft Computing, Vol.155, SpringerLink (papier court).

## Conférence nationale

Ksontini F., Mandiau R., Espié S., Guessoum Z. (2012). Représentation égo-centrée de l'environnement virtuel dans le cadre de la simulation de trafic routier. 20èmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents, JFSMA. Honfleur, France, 2012 (papier long, 50% d'acceptation).

## Workshops Internationaux

Feirouz Ksontini, René Mandiau, ESPIÉ Stéphane Espié, Zahia Guessoum (2010). From activity and context toward reaction time : application to traffic simulation. 6th Workshop on Agents in Traffic and Transportation, co-located with the 8th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2010), Toronto, Canada, pages 21-27 (papier long, 50% d'acceptation).

## **CHAPITRE 4. PUBLICATIONS**

---

### **Communications Nationales**

Feirouz Ksontini (2011). Simulation comportementale de trafic en milieu urbain et péri-urbain - Représentation de l'environnement des conducteurs. (papier long) Actes IFSTTAR ISBN 978-2-85782-694-1 - ISSN 0769-0266.

Feirouz Ksontini (2010). Modélisation et simulation comportementale de trafic en milieu urbain et péri-urbain avec prise en compte des flux mixtes, évaluation des émissions de CO2 (poster). Actes INRETS n°129, 8p. et CD-ROM, ISBN 978-2-85782-690-3.

# Bibliographie

- [Afoutni *et al.*, 2012] AFOUTNI, Z., COURDIER, R. et GUERRIN, F. (2012). Modélisation de l'action située basée sur les affordances et la stigmergie. In *20èmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA'12)*, pages 117–126.
- [Ahuja, 2001] AHUJA, S. (2001). Simulation of driver behaviour in heterogeneous untidy traffic in developing countries. In *Proceedings of Symposium on Advanced Vehicle Technologies, The International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, New York, USA.
- [Alexiadis *et al.*, 2004] ALEXIADIS, V., COLYAR, J., HALKIAS, J., HRANAC, R. et MCHALE, G. (2004). The next generation simulation program. *ITE Journal*, 74:22–26.
- [Allen, 1981] ALLEN, J. (1981). An interval based representation of temporal knowledge. In *Proceedings of the seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 221–226.
- [Arentze et Timmermans, 2003] ARENTZE, T. et TIMMERMANS, H. (2003). A multiagent model of negotiation processes between multiple actors in urban developments : a framework for and results of numerical experiments. In *Environment and Planning B : Planning and Design*, volume 30, pages 391–410.
- [Aupetit et Espié, 2012] AUPETIT, S. et ESPIÉ, S. (2012). Analyse ergonomique de l'activité de conduite moto lors de la pratique de l'inter-files en région parisienne. *Activités*, 9:48–70.
- [Báez-Barranco *et al.*, 2007] BÁEZ-BARRANCO, J.-A., STRATULAT, T. et FERBER, J. (2007). A unified model for physical and social environments. In *Proceedings of the 3rd international conference on Environments for multi-agent systems III, E4MAS'06*, pages 41–50, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag.
- [Balbo, 2012] BALBO, F. (2012). *Modèle déclaratif pour une gestion contrôlée et adaptative des interactions contextuelles dans les Systèmes Multi-Agents*. Habilitation à diriger des recherches, Université Paris-Dauphine, Paris, France.
- [Balmer et Nagel, 2006] BALMER, M. et NAGEL, K. (2006). Shape morphing of intersection layouts using curb side oriented driver simulation. In LEEUWEN, J. et TIMMERMANS, H., éditeurs : *Innovations in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*, pages 167–183. Springer Netherlands.

## CHAPITRE 4. BIBLIOGRAPHIE

---

- [Balmer *et al.*, 2009] BALMER, M., RIESER, M., MEISTER, K., CHARYPAR, D., LEFEBRE, N. et NAGEL, K. (2009). Matsim-t : Architecture and simulation times. In BAZZAN, A. L. et KLÜGL, F., éditeurs : *Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering*, pages 57–78. IGI Global, Hershey, US.
- [Bandini *et al.*, 2006] BANDINI, S., CELADA, F., MANZONI, S., PUZONE, R. et VIZZARI, G. (2006). Modelling the immune system with situated agents. In *Neural Nets*, volume 3931 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 231–243. Springer Berlin Heidelberg.
- [Bandini et Vizzari, 2007] BANDINI, S. et VIZZARI, G. (2007). Regulation function of the environment in agent-based simulation. In WEYNS, D., PARUNAK, H. V. D. et MICHEL, F., éditeurs : *Environments for Multi-Agent Systems III*, volume 4389 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 157–169. Springer Berlin Heidelberg.
- [Banet, 2006] BANET, A. (2006). Conscience du risque et attitudes face au risque. Mémoire de D.E.A., Laboratoire d'études et d'analyse de la cognition et des modèles.
- [Barceló *et al.*, 2004] BARCELÓ, J., CODINA, E., CASAS, J., FERRER, J. et GARCÍA, D. (2004). Microscopic traffic simulation : a tool for the design, analysis and evaluation of intelligent transport systems. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 41(2-3):173–203.
- [Bazzan, 2005] BAZZAN, A. (2005). A distributed approach for coordination of traffic signal agents. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 10(1):131–164.
- [Bazzan et Klügl, 2013] BAZZAN, A. et KLÜGL, F. (2013). A review on agent-based technology for traffic and transportation. *The Knowledge Engineering Review*, pages 1–29.
- [Bazzan *et al.*, 1999] BAZZAN, A., WAHLE, J. et KLÜGL, F. (1999). Agents in traffic modelling : from reactive to social behavior. In BURGARD, W., CHRISTALLER, T. et CREMERS, Armin, B., éditeurs : *Advances in Artificial Intelligence*, volume 1701 de *LNAI*, pages 303–306. Springer.
- [Ben-Akiva *et al.*, 2010] BEN-AKIVA, M., KOUTSOPOULOS, H., TOLEDO, T., YANG, Q., CHOUDHURY, C., ANTONIOU, C. et BALAKRISHNA, R. (2010). Traffic simulation with mitsimlab. In BARCELÓ, J., éditeur : *Fundamentals of Traffic Simulation*, volume 145 de *International Series in Operations Research & Management Science*, pages 233–268. Springer New York.
- [Bhat et Koppelman, 2003] BHAT, C. R. et KOPPELMAN, F. S. (2003). Activity-based modeling of travel demand. In *Handbook of Transportation*, pages 36–65.
- [Bonakdarian *et al.*, 1998] BONAKDARIAN, E., CREMER, J., KEARNEY, J. et WILLEMSSEN, P. (1998). Generation of ambient traffic for real-time driving simulation. In *Proceeding of Image Conference*, pages 123–133.
- [Bond et Gasser, 1988] BOND, A. et GASSER, L. (1988). *Reading in distributed artificial intelligence*. Morgan Kaufmann publishers, Inc.
- [Bonte *et al.*, 2006] BONTE, L., ESPIÉ, S. et MATHIEU, P. (2006). Modélisation et simulation des usagers deux-roues motorisés dans archisim. In *Actes des 14e Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA'06)*, pages 31–44.

- 
- [Bonte *et al.*, 2007] BONTE, L., ESPIÉ, S. et MATHIEU, P. (2007). Virtual lanes interest for motorcycles simulation. *In Proceedings of the fifth European Workshop on Multi-Agent Systems*, pages 580–596.
- [Bonte *et al.*, 2008] BONTE, L., ESPIÉ, S. et MATHIEU, P. (2008). Les différents comportements des motocyclistes : application en simulation de trafic. *Revue Génie Logiciel*, (86):29–36.
- [Bousquet *et al.*, 1998] BOUSQUET, F., BAKAM, I., PROTON, H. et LE PAGE, C. (1998). Cormas : Common-pool resources and multi-agent systems. *In Pasqual del POBIL, A., MIRA, J. et ALI, M., éditeurs : Tasks and Methods in Applied Artificial Intelligence*, volume 1416 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 826–837. Springer Berlin Heidelberg.
- [Bousquet et Le Page, 2004] BOUSQUET, F. et LE PAGE, C. (2004). Multi-agent simulations and ecosystem management : a review. *Ecological Modelling*, 176(3-4):313–332.
- [Brackstone et McDonald, 1999] BRACKSTONE, M. et MCDONALD, M. (1999). Car-following : a historical review. *In Transportation Research Part F*, volume 2, pages 181–196.
- [Briot et Demazeau, 2001] BRIOT, J. et DEMAZEAU, Y. (2001). *Principes et architectures des systèmes multi-agents*. Hermes Science, Lavoisier.
- [Brooks, 1986] BROOKS, R. A. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *Journal of Robotics and Automation*, pages 14–23.
- [Brooks, 1991] BROOKS, R. A. (1991). Intelligence without reason. *Artificial Intelligence*, 47:139–159.
- [Bruner, 1957] BRUNER, J. (1957). *Going beyond the information given*, pages 41–69. Cambridge, MA : Harvard University Press.
- [Burmeister *et al.*, 1997] BURMEISTER, B., DOORMANN, J. et MATYLIS, G. (1997). Agent-oriented traffic simulation. *In Transactions of the Society for Computer Simulation International*, volume 14, pages 79–86.
- [Casas *et al.*, 2010] CASAS, J., FERRER, J., GARCIA, D., PERARNAU, J. et TORDAY, A. (2010). Traffic simulation with aimsun. *In JAUME, B., éditeur : Fundamentals of Traffic Simulation*, volume 145 de *International Series in Operations Research & Management Science*, pages 173–232. Springer New York.
- [Cayford *et al.*, 1997] CAYFORD, R., WEI-HUA, L. et DAGANZO, C. (1997). The netcell simulation package : Technical description. *In Technical Report UCB-ITS-PRR-97-23*, University of California, Berkeley, USA.
- [Champion, 2003] CHAMPION, A. (2003). *Mécanisme de coordination multi-agent fondé sur les jeux : application à la simulation comportementale de trafic routier en situation de carrefour*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes.
- [Champion et Espié, 2002] CHAMPION, A. et ESPIÉ, S. (2002). Let interactions live : How to improve the behavior of simulated drivers approaching an intersection. *In Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference*, San Diego, USA.

## CHAPITRE 4. BIBLIOGRAPHIE

---

- [Champion *et al.*, 1999] CHAMPION, A., MANDIAU, R., KOLSKI, C., HEIDET, A. et KEMENEY, A. (1999). Traffic generation with the scanner ii simulator : towards a multi-agent architecture. *In Proceedings of the Driving Simulation Conference '99*.
- [Chandler et Montroll, 1958] CHANDLER, R.E. Herman, R. et MONTROLL, E. (1958). Traffic dynamics : studies in car following. *In Operations research*, volume 6, pages 165–184.
- [Chemero, 2003] CHERMERO, A. (2003). An outline of a theory of affordances. *Ecological Psychology*, 15:181–195.
- [Chmura et Pitz, 2007] CHMURA, T. et PITZ, T. (2007). An extended reinforcement algorithm for estimation of human behavior in congestion games. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 10.
- [Cho et Wu, 2004] CHO, H.-J. et WU, Y.-T. (2004). Modeling and simulation of motorcycle traffic flow. *In SMC (7)*, pages 6262–6267.
- [Cohen et Levesque, 1990] COHEN, P. R. et LEVESQUE, H. J. (1990). Intention is choice with commitment. *In Artificial Intelligence*, volume 42, pages 213–261.
- [Cohen, 1993] COHEN, S. (1993). Ingénierie du trafic routier. éléments de théorie du trafic et applications. *In Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*.
- [Cohn et Renz, 2008] COHN, A. et RENZ, J. (2008). Qualitative spatial representation and reasoning. *In Handbook of Knowledge Representation*, volume 3, pages 551–596. Elsevier.
- [Condotta, 2000] CONDOTTA, J.-F. (2000). *Problèmes de satisfaction de contraintes : algorithmes et complexité*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier (Toulouse III).
- [Cornwell *et al.*, 2003] CORNWELL, J., O'BRIEN, K., SILVERMAN, B. et TOTH, J. (2003). Affordance theory for improving the rapid generation, composability and reusability of synthetic agents and objects. *In Twelfth Conference on Computer Generated Forces and Behavior Representation*.
- [Dai et Li, 2010] DAI, J. et LI, X. (2010). Multi-agent systems for simulating traffic behaviors. *Chinese Science Bulletin*, 55:293–300.
- [Demazeau, 1995] DEMAZEAU, Y. (1995). From interactions to collective behaviour in agent-based systems. *In Proceedings of the 1st. European Conference on Cognitive Science. Saint-Malo*, pages 117–132.
- [Demazeau et Müller, 1990] DEMAZEAU, Y. et MÜLLER, J.-P. (1990). Decentralized artificial intelligence. pages 3–16. Elsevier Science Publisher B.V. (North-Holland).
- [Dessalles *et al.*, 2007] DESSALLES, J., MÜLLER, J. et D., P. (2007). Emergence in multi-agent systems : conceptual and methodological issues. *In AMBLARD, F. et PHAN, D., éditeurs : MultiAgent Models and Simulation for Social and Human Sciences*, pages 327–355. The Bardwell-Press, Oxford.
- [Doniec, 2006] DONIEC, A. (2006). *Prise en compte des comportements anticipatifs dans la coordination multi-agent : application à la simulation de trafic en carrefour*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes.

- 
- [Doniec *et al.*, 2007] DONIEC, A., MANDIAU, R., ESPIÉ, S. et PIECHOWIAK, S. (2007). Comportements anticipatifs dans les systèmes multi-agents. application à la simulation de trafic routier. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 21(2):183–221.
- [Doniec *et al.*, 2008] DONIEC, A., MANDIAU, R., PIECHOWIAK, S. et ESPIÉ, S. (2008). Anticipation based on constraint processing in a multi-agent context. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (JAAMAS)*, 17(2):339–361.
- [Drogoul, 1993] DROGOUL, A. (1993). *De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes. Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agents*. Thèse de doctorat, Université de Paris VI.
- [Drogoul *et al.*, 2002] DROGOUL, A., VANBERGUE, D. et MEURISSE, T. (2002). Multi-agent based simulation : where are the agents ? *In Proceedings of the 3rd international conference on Multi-agent-based simulation II*, MABS, pages 1–15, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag.
- [Duchon *et al.*, 1998] DUCHON, A. P., KAEHLING, L. P. et WARREN, W. H. (1998). Ecological robotics. *Adaptive Behavior*, 6(3-4):473–507.
- [Ducreux, 2008] DUCREUX, B.-O. (2008). Comparaison entre deux-roues à moteur et voitures : profil de conduite, consommation de carburant et émissions des gaz d'échappement en utilisation quotidienne. Données et références, ADEME.
- [Ehlert et Rothkrantz, 2001] EHLERT, P. A. M. et ROTHKRANTZ, L. J. M. (2001). A reactive driving agent for microscopic traffic simulation. *In Proceedings of the 15th European Simulation Conference*, pages 943–949. SCS Publishing House.
- [El Hadouaj, 2004] EL HADOUAJ, S. (2004). *Conception de comportements de résolution de conflits et de coordination : Application à une simulation multi-agent du trafic routier*. Thèse de doctorat, Université Paris VI.
- [El Hadouaj *et al.*, 2000] EL HADOUAJ, S., DROGOUL, A. et ESPIÉ, S. (2000). How to combine reactivity and anticipation : the case of conflicts resolution in a simulated road traffic. *In MOSS, S. et DAVIDSSON, P., éditeurs : Multi-Agent-Based Simulation, Second International Workshop*, pages 82–96, Boston, USA. Springer.
- [El Hadouaj *et al.*, 2004] EL HADOUAJ, S., ESPIÉ, S. et DROGOUL, A. (2004). A multi-agent road traffic simulation model : Validation of the insertion case. *In Proceedings of Summer Computer Simulation Conference (SCSC)*, San Jose, California, USA.
- [Epstein, 2007] EPSTEIN, J. M. (2007). *Generative Social Science : Studies in Agent-Based Computational Modeling*. Princeton, NJ : Princeton University Press.
- [Erceau et Ferber, 1991] ERCEAU, J. et FERBER, J. (1991). L'intelligence artificielle distribuée. *In La recherche*, volume 22, pages 750–758.
- [Espié, 1995] ESPIÉ, S. (1995). Archisim, multi-actor parallel architecture for traffic simulation. *In Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transport Systems*, volume IV, Yokohama.

## CHAPITRE 4. BIBLIOGRAPHIE

---

- [Espié, 2004] ESPIÉ, S. (2004). *Simulation comportementale et réalité virtuelle : vers une simulation globale du système de trafic 1989-2004*. Habilitation à diriger les recherches, Université Paris VI.
- [Espié *et al.*, 2002] ESPIÉ, S., AUBERLET, J. et ZHANG, M. (2002). Integrated approach for the study of new road profiles. In *DSC'02 : Proceedings of Driving Simulation Conference*, Paris, France.
- [Espié *et al.*, 2003] ESPIÉ, S., CHAMPION, A. et AUBERLET, J.-M. (2003). From the individual driver's behavior to the traffic simulation model. In *Workshop on Traffic Modeling : Trends and Challenges*, Sitges, Spain.
- [Espié et Saad, 2000] ESPIÉ, S. et SAAD, F. (2000). Driver behaviour modelling and traffic simulation. In *International Ergonomics Association Congress*, San Diego, Californie, USA.
- [Esser *et al.*, 1999] ESSER, J., NEURBERT, L., WAHL, J. et SCHRECKENBERG, M. (1999). Microscopic online simulation of urban traffic. In *Proceedings of the 14th international symposium of transportation and traffic theory*, pages 517–534.
- [Fellendorf et Vortisch, 2001] FELLENDORF, M. et VORTISCH, P. (2001). Validation of the microscopic traffic flow model vissim in different real-world situations. In *Proceedings of the Transportation Research Board*. Washington, DC.
- [Fellendorf et Vortisch, 2010] FELLENDORF, M. et VORTISCH, P. (2010). Microscopic traffic flow simulator vissim. In BARCELÓ, J., éditeur : *Fundamentals of Traffic Simulation*, volume 145 de *International Series in Operations Research and Management Science*, pages 63–93. Springer New York.
- [Ferber, 1995] FERBER, J. (1995). *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. Inter-Edition.
- [Ferber *et al.*, 2004] FERBER, J., GUTKNECHT, O. et MICHEL, F. (2004). From agents to organizations : An organizational view of multi-agent systems. In GIORGINI, P., MÜLLER, J. et ODELL, J., éditeurs : *Agent-Oriented Software Engineering IV*, volume 2935 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 214–230. Springer Berlin Heidelberg.
- [Ferber *et al.*, 2009] FERBER, J., STRATULAT, T. et TRANIER, J. (2009). *Towards an integral approach of organizations in multi-agent systems*, pages 51–75.
- [Ferreira *et al.*, 2009] FERREIRA, P., ESTEVES, E., ROSSETTI, R. et OLIVEIRA, E. (2009). *Multi-agent systems for traffic and transportation*, chapitre Applying Situated Agents to Microscopic Traffic Modelling. PA : IGI Global.
- [Fitzpatrick *et al.*, 2003] FITZPATRICK, P., METTA, G., NATALE, L., RAO, A., et SANDINI, G. (2003). Learning about objects through action-initial steps towards artificial cognition. In *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*, pages 3140–3145.
- [Flipo, 2000] FLIPO, A. (2000). Trust : le simulateur de conduite poids lourd pour la formation. In *Driving Simulation Conference*.

- 
- [Freksa, 1992] FREKSA, C. (1992). Using orientation information for qualitative spatial reasoning. In FRANK, A. U., CAMPARI, I. et FORMENTINI, U., éditeurs : *Theories and methods of spatio-temporal reasoning in geographic space*, Lecture Notes in Computer Science, pages 162–178. Springer, Berlin.
- [Gazis *et al.*, 1961] GAZIS, D., HERMAN, R. et ROTHERY, R. (1961). Non-linear follow the leader models of traffic flow. In *Operations research*, volume 9, pages 545–567.
- [Gibson, 2000] GIBSON, E. (2000). Perceptual learning in development : Some basic concepts. *Ecological Psychology*, 12:295–302.
- [Gibson, 1966] GIBSON, J. (1966). *The Senses Considered as Perceptual Systems*. Boston : Houghton Mifflin.
- [Gibson, 1977] GIBSON, J. (1977). The theory of affordances. In SHAW, R. et BRANSFORD, J., éditeurs : *Perceiving, Acting and Knowing*. Lawrence Erlbaum and Associates, Hillsdale, New Jersey.
- [Gibson, 1979] GIBSON, J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Lawrence Erlbaum and Associates.
- [Gimenez, 1997] GIMENEZ, M. (1997). *La psychologie de la perception*. Collection "domino", Flammarion.
- [Gipps, 1981] GIPPS, P. G. (1981). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B : Methodological*, 15:105–111.
- [Gleizes, 2004] GLEIZES, M.-P. (2004). *Vers la résolution de problèmes par émergence*. Habilitation à diriger des recherches, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- [Goldspink, 2002] GOLDSPINK, C. (2002). Methodological implications of complex systems approaches to sociality : Simulation as a foundation for knowledge. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 5.
- [Gouaich et Michel, 2005] GOUAICH, A. et MICHEL, F. (2005). Towards a unified view of the environment(s) within multi-agent systems. *Informatica (Slovenia)*, 29(4):423–432.
- [Grassé, 1959] GRASSÉ, P.-P. (1959). La reconstruction du nid et les coordinations inter-individuelles chez *bellicositermes natalensis* et *cubitermes* sp. la théorie de la stigmergie : essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs. In *Insectes Sociaux*, volume 6, pages 41–80.
- [Greeno, 1994] GREENO, J. G. (1994). Gibson's affordances. In *Psychological Review*, volume 101, pages 336–342.
- [Greenshields, 1935] GREENSHIELDS, B. (1935). A study of traffic capacity. In *Proceedings of the Highway Research Boards*, volume 14, pages 448–477.
- [Gregory, 1972] GREGORY, R. (1972). Cognitive contours. *Nature*, (238):51–52.
- [Grislin-Le Strugeon, 1995] GRISLIN-LE STRUGEON, E. (1995). *Une méthodologie d'auto-adaptation d'un système multi-agents cognitifs*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut- Cambrésis, Valenciennes.

## CHAPITRE 4. BIBLIOGRAPHIE

---

- [Guessoum, 2000] GUESSOUM, Z. (2000). A multi-agent simulation framework. *Society for Computer Simulation International*, 17(1):2–11.
- [Guessoum et al., 2012] GUESSOUM, Z., MANDIAU, R., MATHIEU, P., BOISSIER, O., GLIZE, P., HAMRI, A., PESTY, S., PICARD, G., SANSONNET, J. P., TESSIER, C. et TRANVOUEZ, E. (2012). *Systèmes Multi-agents et simulation, Chapter 2*, pages 76–120. Cepaduès Editions.
- [Haj-Salem et al., 1998] HAJ-SALEM, H., ELLOUMI, N. et PAPAGEORGIOU, M. (1998). Metacor : A dynamic macroscopic modelling tool for urban corridor. In *IMACS/IEEE Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications*, volume 3, pages 207–212, Nabeul, Hammamet, Tunisia.
- [Hancock, 1999] HANCOCK, P. (1999). Is car following the real question - are equations the answer ? In *Transportation Research Part F*, volume 2, pages 197–199.
- [Hassas, 2003] HASSAS, S. (2003). *Systèmes Complexes à base de Multi-Agents Situés*. Habilitation à diriger des recherches, Université Claude Bernard - Lyon 1, Laboratoire d’Informatique en Images et Systèmes d’information.
- [Hübner et al., 2002] HÜBNER, J., SICHMAN, J. et BOISSIER, O. (2002). Moise + : Towards a structural, functional, and deontic model for the mas organization. In CASTELFRANCHI, C. et JOHNSON, W., éditeurs : *1st International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 02)*, pages 501–502, Bologna Italy. ACM Press.
- [Hegeman et al., 2009] HEGEMAN, G., TAPANI, A. et HOOGENDOORN, S. (2009). Overtaking assistant assessment using traffic simulation. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 17:617–630.
- [Hernández et al., 1995] HERNÁNDEZ, D., CLEMENTINI, E. et FELICE, P. (1995). Qualitative distances. In FRANK, A. et KUHN, W., éditeurs : *Spatial Information Theory A Theoretical Basis for GIS*, volume 988 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 45–57. Springer Berlin Heidelberg.
- [Heylighen, 2007] HEYLIGHEN, F. (2007). Why is open source development so successful ? stigmergic organization and the economics of information. In LUTTERBECK, B., BAERWOLFF, M. et GEHRING, R. A., éditeurs : *Open Source Jahrbuch*, pages 165–180. Lehmanns Media.
- [Hidas, 2002] HIDAS, P. (2002). Modelling lane changing and merging in microscopic traffic simulation. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 10(5-6):351–371.
- [Hogeweg et Hesper, 1990] HOGEWEG, P. et HESPER, B. (1990). Individual-oriented modelling in ecology. *Mathematical Computational Modelling*, 13(6):83–90.
- [Hu et al., 2007] HU, T.-Y., LIAO, T.-Y., CHEN, L.-W., HUANG, Y.-K. et CHIANG, M.-L. (2007). Dynamic simulation-assignment model (dynataiwan) under mixed traffic flows for its applications. In *The proceedings of 86th transportation research board annual meeting*, Washington, DC.
- [Huston et al., 1988] HUSTON, M., DEANGELIS, D. et POST, W. (1988). New computer models unify ecological theory. In *BioScience*, volume 38, pages 682–691.

- 
- [Joo *et al.*, 2013] JOO, J., KIM, N., WYSK, R. A., ROTHROCK, L., SON, Y.-J., OH, Y.-g. et LEE, S. (2013). Agent-based simulation of affordance-based human behaviors in emergency evacuation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 32:99–115.
- [Kapadia *et al.*, 2009] KAPADIA, M., SINGH, S., HEWLETT, W. et FALOUTSOS, P. (2009). Egocentric affordance fields in pedestrian steering. *In Proceedings of the 2009 symposium on Interactive 3D graphics and games, I3D '09*, pages 215–223. ACM.
- [Kesting *et al.*, 2007] KESTING, A., TREIBER, M. et HELBING, D. (2007). General lane-changing model mobil for car-following models. *Transportation Research Record*, 1999(1):86–94.
- [Kesting *et al.*, 2009] KESTING, A., TREIBER, M. et HELBING, D. (2009). Agents for traffic simulation. *Multi-Agent Systems : Simulation and Applications*, pages 325–356.
- [Ketenci, 2013] KETENCI, U. (2013). *Modélisation agent de la perception visuelle humaine limitée appliquée à la simulation du comportement des conducteurs en carrefour*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut- Cambrésis, Valenciennes.
- [Klügl et Bazzan, 2004] KLÜGL, F. et BAZZAN, A. L. C. (2004). *Simulated route decision behaviour : simple heuristics and adaptation*, pages 285–304. Springer.
- [Klügl *et al.*, 2005] KLÜGL, F., FEHLER, M. et HERRLER, R. (2005). About the role of the environment in multi-agent simulations. *In WEYNS, D., PARUNAK, H. V. D. et MICHEL, F., éditeurs : Environments for Multi-Agent Systems*, volume 3374 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 127–149. Springer Berlin Heidelberg.
- [Klügl et Rindsfuser, 2011] KLÜGL, F. et RINDSFÜSER, G. (2011). Agent-based route (and mode) choice simulation in real-world networks. *In IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT)*, pages 22–29.
- [Koppa, 1997] KOPPA, J. (1997). *Traffic flow theory*, chapitre Human factors.
- [Krajzewicz, 2010] KRAJZEWICZ, D. (2010). Traffic simulation with sumo - simulation of urban mobility. *In BARCELÓ, J., éditeur : Fundamentals of Traffic Simulation*, volume 145 de *International Series in Operations Research & Management Science*, pages 269–293. Springer New York.
- [Ksontini *et al.*, 2012a] KSONTINI, F., ESPIÉ, S., GUESSOUM, Z. et MANDIAU, R. (2012a). Driver ego-centered environment representation in traffic behavioral simulation. *In Advances in Intelligent and Soft Computing, PAAMS*, volume 155, pages 249–253. Springer.
- [Ksontini *et al.*, 2012b] KSONTINI, F., ESPIÉ, S., GUESSOUM, Z. et MANDIAU, R. (2012b). Traffic behavioral simulation in urban and suburban - representation of the drivers' environment. *In Advances in Intelligent and Soft Computing, PAAMS*, volume 155, pages 115–125. Springer.
- [Ksontini *et al.*, 2013] KSONTINI, F., GUESSOUM, Z., MANDIAU, R. et ESPIÉ, S. (2013). Using ego-centered affordances in multi-agent traffic simulation. *In GINI, M. L., SHEHORY, O., ITO, T. et JONKER, C. M., éditeurs : proceedings of the Twelfth International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS'2013)*, pages 151–158. IFAAMAS.

## CHAPITRE 4. BIBLIOGRAPHIE

---

- [Ksontini *et al.*, 2012c] KSONTINI, F., MANDIAU, R., ESPIÉ, S. et GUESSOUM, Z. (2012c). Représentation égo-centrée de l’environnement virtuel dans le cadre de la simulation de trafic routier. In CHEVAILLIER, P. et MERMET, B., éditeurs : *20èmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA)*, pages 171–180. Cepadues Editions.
- [Lacroix *et al.*, 2009] LACROIX, B., ROUELLE, V., KEMENY, A., MATHIEU, P., LAURENT, N., MILLET, G. et GALLEE, G. (2009). Informal rules for autonomous vehicles in scanner. In *Driving Simulation Conference*, pages 58–69, Monaco.
- [Lan et Chang, 2005] LAN, L. W. et CHANG, C. W. (2005). Inhomogeneous cellular automata modeling for mixed traffic with cars and motorcycles. In *Journal of Advanced Transportation*, volume 39, pages 323–349.
- [Lan et Hsu, 2006] LAN, L. W. et HSU, C. C. (2006). Formation of spatiotemporal traffic patterns with cellular automaton simulation. In *Transportation Research Board 85th Annual Meeting*, Washington, DC, USA.
- [Lee *et al.*, 2009] LEE, T., POLAK, J. et BELL, M. (2009). New approach to modeling mixed traffic containing motorcycles in urban areas. *Transportation Research Record*, 2140:195–205.
- [Lees *et al.*, 2005] LEES, M., LOGAN, B. S., MINSON, R., OGUARA, T. et THEODOROPOULOS, G. K. (2005). Modelling environments for distributed simulation. In *E4MAS*, volume 3374 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 150–167. Springer.
- [Leonova, 2004] LEONOVA, T. (2004). L’approche écologique de la cognition sociale et son impact sur la conception des traits de personnalité. In *L’année psychologique*, volume 104, pages 249–294.
- [Lewis-Evans et Charlton, 2006] LEWIS-EVANS, B. et CHARLTON, S. G. (2006). Explicit and implicit processes in behavioural adaptation to road width. *Accident Analysis & Prevention*, 38(3):610–617.
- [Lhommet *et al.*, 2012] LHOMMET, M., LOURDEAUX, D. et BARTHÈS, J.-P. (2012). Foule sentimentale : influence des caractéristiques individuelles sur la contagion émotionnelle. *Revue d’Intelligence Artificielle*, 26(3):281–308.
- [Lieberman et Rathi, 1997] LIEBERMAN, E. et RATHI, A. (1997). Traffic simulation. In LABORATORY, O. R. N., éditeur : *In Traffic Flow Theory. Chapter 10*.
- [Lighthill et Whitham, 1955] LIGHTHILL, M. H. et WHITHAM, G. (1955). On kinematic waves ii : a theory of traffic flow on long, crowded roads. In *Proceedings of the royal society of London series A*, volume 229, pages 317–345.
- [Ligozat, 1998] LIGOZAT, G. (1998). Reasoning about cardinal directions. *Journal of Visual Languages and Computing*, 1:23–44.
- [Luo et Boloni, 2012] LUO, Y. et BOLONI, L. (2012). Modeling the conscious behavior of drivers for multi-lane highway driving. In *Proceedings of the 7th Workshop on Agent in Traffic and Transportation*.

- 
- [MacDorman, 2000] MACDORMAN, K. (2000). Responding to affordances : Learning and projecting a sensorimotor mapping. *In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3253–3259.
- [Malone, 1987] MALONE, T. W. (1987). Modeling coordination in organizations and markets. *In Management Sciences*, volume 33, pages 1317–1332.
- [Mandiau, 2000] MANDIAU, R. (2000). *Modélisation et évaluation d'organisations multi-agents*. Habilitation à diriger les recherches, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.
- [Mandiau et al., 2002] MANDIAU, R., Grislin-le STRUGEON, E. et PÉNINOU, A. (2002). *Organisation et applications des SMA*. Hermès, Paris.
- [Michel, 2004] MICHEL, F. (2004). *Formalisme, outils et éléments méthodologiques pour la modélisation et la simulation multiagents*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc.
- [Michon, 1985] MICHON, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models : What do we know, what should we do? *In Human Behavior and Traffic Safety*, pages 485–520. New York : Plenum Press.
- [Minh et al., 2005a] MINH, C. C., SANO, K. et MATSUMOTO, S. (2005a). Characteristics of passing and paired riding maneuvers of motorcycle. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6:186–197.
- [Minh et al., 2005b] MINH, C. C., SANO, K. et MATSUMOTO, S. (2005b). The speed, flow and headway analyses of motorcycle traffic. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6:1496–1508.
- [Minsky, 1988] MINSKY, M. (1988). *La société de l'esprit*. InterEditions.
- [Müller, 2002] MÜLLER, D. (2002). Outils pour la simulation du comportement du conducteur. Mémoire de D.E.A., ECP. Rapport de stage de fin d'études à ECP.
- [Murphy, 1999] MURPHY, R. (1999). Case studies of applying gibson's ecological approach to mobile robots. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A : Systems and Humans*, 29(1):105–111.
- [Nabil et al., 1995] NABIL, M., SHEPHERD, J. et NGU, A. H. H. (1995). 2d projection interval relationships : A symbolic representation of spatial relationships. *In Lecture Notes in Computer Science*, pages 292–309. Springer-Verlag.
- [Nagel et al., 1996] NAGEL, K., BARRETT, C. L. et RICKERT, M. (1996). Parallel traffic microsimulation by cellular automata and application for large scale transportation modeling. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, USA.
- [Nagel et Schreckenberg, 1992] NAGEL, K. et SCHRECKENBERG, M. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique*, 2:2221–2229.

## CHAPITRE 4. BIBLIOGRAPHIE

---

- [Nagel *et al.*, 1999] NAGEL, K., SIMON, P., RICKERT, M. et ESSER, J. (1999). Iterated transportation simulation for dallas and portland. In BRILLON, HURBER, SCHECKENBERG et WALLENTOWITZ, éditeurs : *Traffic and mobility : simulation, economics environment*. Springer-Verlag.
- [Neisser, 1994] NEISSER, U. (1994). Multiple systems : A new approach to cognitive theory. *The European Journal of Cognitive Psychology*, 6:225–241.
- [Norman, 1999] NORMAN, D. (1999). Affordances, conventions and design. *Interactions*, 6(3):38–43.
- [Norman, 2002] NORMAN, J. (2002). Two visual systems and two theories. *Behavioral and Brain Sciences*, 25:73–144.
- [Odell *et al.*, 2002] ODELL, J., PARUNAK, H. V. D., FLEISCHER, M. et BRUECKNER, S. (2002). Modeling agents and their environment. In AOSE, volume 2585 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 16–31. Springer.
- [Okuyama *et al.*, 2005] OKUYAMA, F. Y., BORDINI, R. H. et ROCHA COSTA, A. C. (2005). Elms : An environment description language for multi-agent simulation. In WEYNS, D., PARUNAK, H. V. D. et MICHEL, F., éditeurs : *Environments for Multi-Agent Systems*, volume 3374 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 91–108. Springer Berlin Heidelberg.
- [Papasimeon, 2009] PAPASIMEON, M. (2009). *Modelling Agent-Environment Interaction in Multi-Agent Simulations with Affordances*. Phd thesis, The University of Melbourne, Victoria 3010 Australia.
- [Papasimeon *et al.*, 2007] PAPASIMEON, M., PEARCE, A. et GOSS, S. (2007). The human agent virtual environment. In *Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, AAMAS, pages 1448–1455, Honolulu, Hawaii.
- [Paramics, 2007] PARAMICS (2007). <http://www.paramics.com>. Logiciel de simulation de trafic.
- [Paruchuri *et al.*, 2002] PARUCHURI, P., PULLALAREVU, A. R. et KARLAPALEM, K. (2002). Multi agent simulation of unorganized traffic. In *Proceedings of the First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS)*, pages 176–183. ACM.
- [Parunak, 2006] PARUNAK, D. H. (2006). A survey of environments and mechanisms for human-human stigmergy. In WEYNS, D., PARUNAK, H. et MICHEL, F., éditeurs : *Environments for Multi-Agent Systems II*, volume 3830 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 163–186. Springer Berlin Heidelberg.
- [Parunak *et al.*, 1998] PARUNAK, H. V. D., SAVIT, R. et RIOLO, R. (1998). Agent-based modeling vs. equation-based modeling : A case study and users' guide. In SICHMAN, J., CONTE, R. et GILBERT, N., éditeurs : *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, volume 1534 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 10–25. Springer Berlin Heidelberg.
- [Payne, 1971] PAYNE, H. (1971). Models for freeway traffic and control. In BEKEY, G., éditeur : *Mathematical Models of public systems 1*, pages 51–61.

- 
- [Prietula *et al.*, 1998] PRIETULA, M., CARLEY, K. et GASSER, L. (1998). *Simulating organizations : computational models of institutions and group*. MIT Press.
- [PTV, 2008] PTV (2008). Vissim 5.10 user manual. ptv planung transport verkehr ag, stumpfstraße 1, d-76131 karlsruhe. <http://www.vissim.de/>.
- [Ramat *et al.*, 1998] RAMAT, E., PREUX, P., SEURONT, L. et LAGADEUX, Y. (1998). Modélisation et simulation multi-agents en biologie marine - étude du comportement du copépode. In *SMA-GET'98 : Systèmes Multi-Agents pour la Gestion de l'Environnement et des Territoires*. Clermont-Ferrand.
- [Randell et Cohn, 1989] RANDELL, D. et COHN, A. G. (1989). Modelling topological and metrical properties in physical processes. In *Proceedings 1st International Conference on the Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, pages 55–66. Morgan Kaufmann.
- [Raubal, 2001] RAUBAL, M. (2001). Ontology and epistemology for agent-based wayfinding simulation. *International Journal of Geographical Information Science*, 15(7):653–665.
- [Reece et Shafer, 1993] REECE, D. et SHAFER, S. (1993). A computational model of driving for autonomous vehicles. *Transportation Research*, 27(1):23–50.
- [Richards, 1956] RICHARDS, P. (1956). Shockwaves on the highway. In *Operations research*, volume 4, pages 42–51.
- [Rossetti *et al.*, 2002] ROSSETTI, R. J. F., BORDINI, R. H., BAZZAN, A. L. C., BAMPI, S., LIU, R. et VAN VLIET, D. (2002). Using BDI agents to improve driver modelling in a commuter scenario. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 10(5-6):47–72.
- [Rothrock et Keefer, 1957] ROTHROCK, C. A. et KEEFER, L. A. (1957). Measurement of urban traffic congestion. In *Highway Research Board Bulletin*, volume 156, pages 1–13.
- [Ruskin et Wang, 2002] RUSKIN, H. et WANG, R. (2002). Modelling traffic flow at an urban unsignalized intersection. In *Proceedings of International Conference on Computational Science*, pages 1381–390.
- [Russell et Norvig, 2002] RUSSELL, S. et NORVIG, P. (2002). *Artificial intelligence : A Modern Approach*. Prentice-Hall.
- [Saad, 1992] SAAD, F. (1992). In-depth analysis of interactions between drivers and the road environment : contribution of on-board observations and subsequent verbal report. In *Proceedings of the 4th Workshop of ICTCT*, University of Lund.
- [Saad et Schnetzler, 1994] SAAD, F. et SCHNETZLER, B. (1994). Un modèle conceptuel des comportements des conducteurs en conduite en file sur autoroute. In *Rapport de convention, Technical report, INRETS/DRAST*.
- [Saunier, 2008] SAUNIER, J. (2008). *Les communications multi-parties et leur régulation dans les systèmes multi-agents : modèle et support*. Thèse de doctorat, Université Paris-Dauphine, Paris, France.

## CHAPITRE 4. BIBLIOGRAPHIE

---

- [Saunier, 2005] SAUNIER, N. (2005). *Incidence de la régulation d'un carrefour à feux sur le risque subi par les usagers : apprentissage d'indicateurs par sélection de données dans un flux*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Télécommunications, France.
- [Schelling, 1978] SCHELLING, T. C. (1978). *Micromotives and Macrobehavior*. W. W. Norton & Company.
- [Serugendo *et al.*, 2006] SERUGENDO, G., GLEIZES, M.-P. et KARAGEORGOS, A. (2006). Self-organisation and emergence in multi-agent systems : An overview. *Informatica*, 30(1):45–54.
- [Simonin, 2010] SIMONIN, O. (2010). *Contribution à la résolution collective de problème - Modèles d'auto-organisation par interactions directes et indirectes dans les SMA réactifs et robotiques*. Hdr habilitation à diriger des recherches en informatique, l'Université Henri Poincaré (Nancy 1).
- [Spicher *et al.*, 2009] SPICHER, A., FATÈS, N. et SIMONIN, O. (2009). From reactive multi-agents models to cellular automata - illustration on a diffusion-limited aggregation model. *In ICAART*, pages 422–429.
- [Steiner *et al.*, 2006] STEINER, R., LEASK, G. et MILI, R. (2006). An architecture for mas simulation environments. *In WEYNS, D., PARUNAK, H. V. D. et MICHEL, F., éditeurs : Environments for Multi-Agent Systems II*, volume 3830 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 50–67. Springer Berlin Heidelberg.
- [Stoffregen, 2000] STOFFREGEN, T. A. (2000). Affordances and events. *Ecological Psychology*, 12:1–28.
- [Stoytchev, 2005a] STOYTICHEV, A. (2005a). Behavior-grounded representation of tool affordances. *In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 3060–3065.
- [Stoytchev, 2005b] STOYTICHEV, A. (2005b). Toward learning the binding affordances of objects : A behavior-grounded approach. *In Proceedings of AAAI Symposium on Developmental Robotics*, pages 17–22.
- [Sukthankar *et al.*, 1996] SUKTHANKAR, R., HANCOCK, J., BALUJA, S., POMERLEAU, D. et THORPE, C. (1996). Adaptive intelligent vehicle modules for tactical driving. *In Proceedings of AAAI-1996 Workshop on Intelligent Adaptive Agents*.
- [Sykes, 2010] SYKES, P. (2010). Traffic simulation with paramics. *In BARCELÓ, J., éditeur : Fundamentals of Traffic Simulation*, volume 145 de *International Series in Operations Research & Management Science*, pages 131–171. Springer New York.
- [Tapani, 2011] TAPANI, A. (2011). Traffic simulation modelling of driver assistance systems. *Advances in Transportation Studies*, 23:41–50.
- [Timmermans, 2005] TIMMERMANS, H., éditeur (2005). *Progress in Activity-based Analysis*. Elsevier.

- 
- [Tlig *et al.*, 2012] TLIG, M., BUFFET, O. et SIMONIN, O. (2012). Cooperative behaviors for the self-regulation of autonomous vehicles in space sharing conflicts. *In Proceedings of the Twenty-Fourth International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI-12)*, volume 1, pages 1126–1132.
- [Tornros, 1998] TORNROS, J. (1998). Driving behavior in a real and a simulated tunnel - a validation study. *Accident Analysis & Prevention*, 30:497–503.
- [Tucker et Ellis, 1998] TUCKER, M. et ELLIS, R. (1998). On the relations between seen objects and components of potential actions. *In Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, volume 24, pages 830–846.
- [Tummolini *et al.*, 2005] TUMMOLINI, L., CASTELFRANCHI, C., RICCI, A., VIROLI, M. et OMICINI, A. (2005). "exhibitionists" and "voyeurs" do it better : A shared environment for flexible coordination with tacit messages. *In WEYNS, D., PARUNAK, H. V. D. et MICHEL, F., éditeurs : Environments for Multi-Agent Systems*, volume 3374 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 215–231. Springer Berlin Heidelberg.
- [Turvey, 1992] TURVEY, M. (1992). Affordances and prospective control : An outline of the ontology. *Ecological Psychology*, 4:173–187.
- [Turvey *et al.*, 1999] TURVEY, M. T., SHOCKLEY, K. et CARELLO, C. (1999). Affordance, proper function, and the physical basis of perceived heaviness. *In Cognition*, volume 73, pages B17–B26.
- [Vasirani *et al.*, 2012] VASIRANI, M., KLUGL, F., CAMPONOGARA, E. et HATTORI, H., éditeurs (2012). *Proceedings of the 7th International Workshop on Agents in Traffic and Transportation (ATT)*, AAMAS 2012, Valencia, Spain.
- [Vera et Simon, 1993] VERA, A. H. et SIMON, H. A. (1993). Situated action : A symbolic interpretation. *Cognitive Science*, 17:7–48.
- [Wagner et Hübner, 2005] WAGNER, T. et HÜBNER, K. (2005). An egocentric qualitative spatial knowledge representation based on ordering information for physical robot navigation. *In NARDI, D., RIEDMILLER, M., SAMMUT, C. et SANTOS-VICTOR, J., éditeurs : RoboCup 2004 : Robot Soccer World Cup VIII*, volume 3276 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 134–149. Springer Berlin Heidelberg.
- [Wahle *et al.*, 2002] WAHLE, J., BAZZAN, A. L. C. et KLÜGL, F. (2002). The impact of real time information in a two route scenario using agent based simulation. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 10:73–91.
- [Wahle et Schreckenberg, 2001] WAHLE, J. et SCHRECKENBERG, M. (2001). A multi-agent system for on-line simulations based on real-world traffic data. *In HICSS*.
- [Wang *et al.*, 2005] WANG, H., KEARNEY, J. Cremer, J. et WILLEMSSEN, P. (2005). Steering behaviors for autonomous vehicles in virtual environments. *In Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference*, pages 155–162, Bonn, Germany.

## CHAPITRE 4. BIBLIOGRAPHIE

---

- [Weyns *et al.*, 2007] WEYNS, D., OMICINI, A. et ODELL, J. (2007). Environment as a first class abstraction in multiagent systems. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 14(1):5–30.
- [Weyns *et al.*, 2005] WEYNS, D., PARUNAK, H. V. D., MICHEL, F., HOLVOET, T. et FERBER, J. (2005). Environments for multiagent systems state-of-the-art and research challenges. volume 3374 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 2–52. Springer.
- [Weyns *et al.*, 2004] WEYNS, D., STEEGMANS, E. et HOLVOET, T. (2004). Towards active perception in situated multi-agent systems. *Applied Artificial Intelligence*, 18(9-10):867–883.
- [Weyns *et al.*, 2006] WEYNS, D., VIZZARI, G. et HOLVOET, T. (2006). Environments for situated multi-agent systems : Beyond infrastructure. volume 3830 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 1–17. Springer.
- [Wooldridge, 2002] WOOLDRIDGE, M. (2002). *An Introduction to Multi-Agent Systems*. JohnWiley & Sons.
- [Wooldridge et Jennings, 1995] WOOLDRIDGE, M. et JENNINGS, N. R. (1995). Intelligent agents : Theory and practice. In *Knowledge Engineering Review*, volume 10.
- [Yamashita *et al.*, 2005] YAMASHITA, T., IZUMI, K. et KURUMATANI, K. (2005). Analysis of the effect of route information sharing on reduction of traffic congestion. In KLÜGL, F., BAZZAN, A. et OSSOWSKI, S., éditeurs : *Applications of Agent Technology in Traffic and Transportation*, Whitestein Series in Software Agent Technologies, pages 99–111. Birkhäuser Basel.
- [Yang et Koutsopoulos, 1996] YANG, Q. et KOUTSOPOULOS, H. N. (1996). A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems. *Transportation Research-C*, 4(3): 113–129.
- [Zeigler *et al.*, 2000] ZEIGLER, B. P., PRAEHOFER, H. et KIM, T. (2000). *Theory of Modeling and Simulation*. Academic Press.
- [Zieba *et al.*, 2011] ZIEBA, S., POLET, P. et VANDERHAEGEN, F. (2011). Using adjustable autonomy and human-machine cooperation to make a human-machine system resilient - application to a ground robotic system. *Information Sciences*, 181(3):379–397.

---

## Résumé

Les travaux conduits dans le cadre de cette thèse ont pour but d'étendre le champ de validité des simulations de trafic en milieu urbain et péri-urbain, avec notamment une meilleure prise en compte du contexte de conduite, de l'hétérogénéité des véhicules (deux-roues motorisés, véhicule léger, poids lourd, etc.) et des comportements des conducteurs en termes d'occupation de l'espace au sol. Le but est de produire en simulation des comportements observés en situation réelle tels que les phénomènes de faufilement (deux-roues, véhicules d'urgence, cas des intersections). Nous abordons, la simulation du trafic routier en considérant une approche comportementale fondée sur les systèmes multi-agents. Des travaux précédents ont proposé des solutions non génériques, notamment pour le cas particulier des deux-roues motorisés. Nous proposons un nouveau modèle d'agent permettant de mieux prendre en compte le contexte de conduite et les comportements des conducteurs en termes d'occupation de l'espace. Nous dotons l'agent d'une représentation ego-centrée de l'environnement fondée sur le concept d'affordance. Nous utilisons ainsi les affordances pour identifier les actions possibles, en termes d'occupation de l'espace, offertes par l'environnement. Nous les utilisons ensuite pour construire une représentation ego-centrée de la situation. Le modèle d'agent proposé a été implémenté avec Archisim. Cette implémentation a permis de reproduire une situation de trafic réelle et de comparer les données simulées avec celles recueillies sur le terrain. Différentes expérimentations ont été menées afin d'évaluer la qualité de la solution proposée.

**Mots-clés :** Simulation multi-agents, affordances, trafic routier, voies virtuelles, représentation ego-centrée

## Abstract

The work described in this thesis aims to improve the validity of traffic simulations in urban and suburban areas. We propose to consider the driving context, the heterogeneity of vehicles (motorized two-wheelers, vehicle, truck, etc.) and the driver behavior in terms of space occupation. The purpose is to produce in simulation the observed real world phenomena such as faufilement behavior (two-wheelers, emergency vehicles, cases of intersections). We address the traffic simulation by considering a behavioral approach based on multi-agent systems. Previous work have proposed non-generic solutions, for the particular case of motorized two-wheelers. We propose a new agent model to better take into account the context of driving and driver behavior in terms of space occupation. We endow agent driver with an ego-centered representation of the environment based on the concept of affordances. We use the affordances to identify the possible actions, in terms of space occupation, afforded by environment. The proposed agent model was implemented with ArchiSim. This implementation has allowed to reproduce a real traffic situation and to compare the results to real data. Different experiments were conducted to assess the quality of the proposed solution.

**Keywords :** Multi-agent simulation, affordances, traffic simulation, virtual lanes, ego-centered representation

