



HAL
open science

Modélisation agent de la perception visuelle humaine limitée appliquée à la simulation du comportement des conducteurs en carrefour

Utku Görkem Ketenci

► **To cite this version:**

Utku Görkem Ketenci. Modélisation agent de la perception visuelle humaine limitée appliquée à la simulation du comportement des conducteurs en carrefour. Autre. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2013. Français. NNT : 2013VALE0020 . tel-00879042

HAL Id: tel-00879042

<https://theses.hal.science/tel-00879042>

Submitted on 31 Oct 2013

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

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

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 KETENCI, Utku Görkem.

Le 20/06/2013, 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)

**Modélisation agent de la perception visuelle humaine limitée
appliquée à la simulation du comportement des conducteurs en carrefour**

JURY

Président du jury

– MANDIAU, René. Professeur. LAMIH, Valenciennes.

Rapporteurs

– CHEVAILLIER, Pierre. Professeur. ENIB, Brest.
– DONIKIAN, Stéphane. Directeur de Recherche. INRIA, Rennes.

Examineurs

– LECLERCQ, Ludovic. Directeur de Recherche. IFSTTAR, Lyon.

Directeur de thèse :

– GRISLIN-LE STRUGEON, Emmanuelle. Maître de Conférences HDR. LAMIH, Valenciennes.

Co-encadrants :

– AUBERLET, Jean-Michel. Chargé de Recherche. IFSTTAR, Paris.
– BRÉMOND, Roland. Directeur de Recherche. IFSTTAR, Paris.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier M. Pierre CHEVAILLIER, M. Stéphane DONIKIAN, M. Ludovic LECLERCQ et M. René MANDIAU pour m'avoir fait l'honneur de participer au Jury de soutenance.

Également, je tiens à remercier ma directrice de thèse Emmanuelle GRISLIN LeSTRUGEON et mes encadrants Jean-Michel AUBERLET et Roland BREMOND. Je les remercie non-seulement pour leurs contributions au travail effectué mais aussi pour leurs accueils, leurs indulgences à mes inexpériences et leurs amitiés.

Je remercie les membres de l'IFSTTAR/LEPSiS et les membres du LAMIH/DIM. Il faut remercier particulièrement Selem CHARFI pour ses supports à la dernière phase de la thèse (surtout pour les cafés et les diners gratuits qu'il m'a offerts). Je remercie mes collègues Laurent CARAFFA, Feirouz KSONTINI et Sophie LEMONNIER pour leurs supports au long des années passées à l'IFSTTAR, et Laure BOURGOIS qui a intégré du modèle de piéton dans l'outil que nous avons implanté.

Je remercie ma mère, mon père et ma sœur et tous les membres de ma famille qui m'ont donné la force de me mettre debout quand je suis tombé par terre.

Finalement, je remercie Ayça qui fait partie de ma vie malgré toute cette distance entre la Turquie et la France.

À la mémoire de ma tante Ipek

Table des matières

Table des figures	ix
Liste des tableaux	xi
1 Introduction	1
1.1 Contexte	1
1.1.1 Simulation de Trafic	1
1.1.2 Systèmes Multi-Agents	4
1.1.3 Sciences Cognitives	6
1.2 Problématique	7
1.3 Plan	7
2 État de l’Art	9
2.1 Modélisation du Trafic Routier	9
2.1.1 Modèles Macroscopiques	10
2.1.2 Modèles Mésoscopiques	12
2.1.3 Modèles Microscopiques	12
2.1.3.1 Loi de poursuite	12
2.1.3.2 Loi de changement de voie	14
2.1.3.3 Modèle d’acceptation de créneau	14
2.1.4 De l’évaluation de la performance à l’évaluation de la sécurité . . .	16
2.2 Vers un modèle d’agent-conducteur	17
2.2.1 Modélisation et simulation à base d’agent	18
2.2.1.1 Environnement	20
2.2.1.2 Agent situé	21
2.2.1.3 Architectures d’agent	22
2.2.2 Modélisation de la conduite	23

2.2.2.1	La conduite, une activité multitâche	23
2.2.2.2	Modèle cognitif de conducteur	24
2.3	Décision et Action en SMA	25
2.3.1	Décision	25
2.3.2	Action	27
2.4	Un intérêt particulier pour la perception	27
2.4.1	Perception visuelle en Psychologie	28
2.4.2	Perception en Psychologie Cognitive	29
2.4.2.1	Ressources cognitives limitées	31
2.4.2.2	Processus d'attention	31
2.4.2.3	Perception, sous-tâches et performance	33
2.4.3	Perception en SMA	35
2.4.3.1	Perception par des agents à ressource limitée	35
2.4.3.2	Perception adaptative	36
2.4.3.3	Perception sélective	39
2.4.3.4	Perception active	40
2.4.4	Perception en Réalité Virtuelle	42
2.5	Conclusion	43
3	Modèle d'Agent et Modèle Conceptuel de Perception	45
3.1	Principes pour un agent conducteur	45
3.1.1	Coordination ou compétition?	45
3.1.2	Est-ce que les conducteurs communiquent entre eux?	46
3.1.3	Est-ce que les agents conducteurs sont réactifs?	47
3.1.4	Conclusion	48
3.2	Modélisation d'agent-conducteur	48
3.2.1	Action	49
3.2.2	Décision	50
3.2.3	Perception	51
3.2.3.1	Les sous-tâches de perception	52
3.2.3.2	L'importance des percepts	53
3.2.4	L'environnement	54
3.3	Perception humaine et limitée	55
3.3.1	Préattention	57
3.3.2	Acquisition	57

3.3.2.1	Acquisition Top-Down	57
3.3.2.2	Acquisition Bottom-Up	59
3.3.3	Tri	59
3.3.4	Sélection	60
3.4	Conclusion	61
4	Réalisation d'un Outil de Simulation et Implantation	63
4.1	Objectif de SAPIEN et choix du moteur de simulation	63
4.2	Représentation du réseau routier	65
4.3	Agent-Conducteur	67
4.3.1	Décision	67
4.3.1.1	Sous-tâche de poursuite	67
4.3.1.2	Sous-tâche de traversée de carrefour	67
4.3.1.3	Règles de comportement	68
4.3.2	Perception par un Agent Conducteur	71
4.3.2.1	Perception Top-down	72
4.3.2.2	Perception Bottom-up	74
4.3.2.3	Tri des percepts issus des deux processus de perception	74
4.3.2.4	Sélection ou Mémoire limitée	75
4.3.3	Fonctionnement général du modèle d'agent-conducteur	75
4.4	Exemple d'Application	77
4.5	Conclusion	80
5	Résultats	83
5.1	Carrefour Simulé	84
5.1.1	Génération des scénarios et paramètres de simulation	86
5.2	Influence de la capacité de perception	87
5.2.1	Écoulement du trafic	87
5.2.1.1	Comparaison avec des travaux précédents	89
5.2.2	Temps de traversée	89
5.2.3	Interblocage	91
5.2.4	Accidents et presque-accidents	92
5.2.5	Conclusion	95
5.3	Population hétérogène	96
5.4	Adaptation du système à un comportement aberrant	97

5.5	Conclusion	98
6	Conclusion et Perspectives	101
6.1	Bilan	101
6.1.1	Rappel de l'objectif et approche utilisée	101
6.1.2	Modèle proposé	101
6.1.3	Validation	102
6.1.4	Résultats de simulations	102
6.1.4.1	Interblocages	103
6.1.4.2	Temps de traversée	103
6.1.4.3	Un indicateur des situations accidentogènes	103
6.1.4.4	Simulation de population hétérogène	104
6.2	Perspectives	105
6.2.1	Besoin de validation	105
6.2.2	Dynamique de la perception et mémoire	105
6.2.3	Amélioration de la modélisation de la perception humaine	107
6.2.3.1	Passage du modèle de Sciences Cognitives au modèle in- formatique	107
6.2.3.2	Modélisation de la limite des ressources	108
6.2.3.3	Interprétation des percepts	108
6.2.3.4	Rôle de l'environnement	109
6.2.4	Amélioration de la modélisation du conducteur	109
6.2.5	Utilisation	110
6.3	Conclusion	110
	Bibliographie	111
	Annexes	121
	A	121
A.1	Les règles de priorité de la traversée de carrefour	122
	B	125
B.1	Coûts de perception	126

Table des figures

1.1	Les distributions des accidents en 2010 selon le bilan de l'ONISR.	2
2.1	Le diagramme fondamental de trafic	11
2.2	La poursuite du véhicule devant ($vehicule_{n-1}$) par le véhicule suiveur ($vehicule_n$)	13
2.3	Modèle Générique d'Agent Situé d'après [Weyns and Holvoet, 2004]	21
2.4	Deux interprétations distinctes de la même image sont possibles.	29
2.5	La perception, la mémoire et l'attention.	31
2.6	L'état de l'individu par rapport au type d'informations acquises.	33
2.7	Relation entre les niveaux de la conscience de la situation et les différents modes de conduite selon [Matthews et al., 2001]. Niveau 1 : perception, Niveau 2 : compréhension, Niveau 3 : anticipation.	34
2.8	Module de perception d'après Weyns [Weyns et al., 2004]	42
3.1	Un scénario de communication	46
3.2	Modèle global d'agent-conducteur	49
3.3	Cadre du modèle de perception proposé	52
3.4	Les sous-modules de la perception	55
4.1	Diagramme UML	66
4.2	Types de jeu dans l'algorithme de Champion	68
4.3	Le modèle de conducteur : fonctionnement général.	76
4.4	La situation du carrefour du point de vue de l'agent A (les carrés représentent les véhicules et les flèches sont leurs directions)	78
4.5	Les zones de conflits potentiels de A sont 1, 2 et 3. Les véhicules marqués par une croix ne sont pas perçus par A.	78
4.6	Les conflits potentiels après application d'un seuil de perception $n = 4$	79
4.7	L'outil de simulation	80
5.1	La vue du carrefour à Reggio di Calabria	85
5.2	Carrefour de Reggio di Calabria [Champion, 2003]. Les débits d'entrée observés sur chaque voie en fonction du temps écoulé.	87
5.3	Les débits d'entrée sur les voies Est, Nord et Sud pour différentes valeurs du seuil de perception n (2 à 7 et sans limite) en fonction du temps écoulé.	90
5.4	Temps de traversée	91
5.5	Illustration d'un interblocage au centre d'un carrefour (véhicules rouges).	92
5.6	Nombre d'interblocages	93

5.7	Décélération accidentogène	94
5.8	Décélération irréaliste	95
6.1	Évolution de la liste de percepts non filtrés en fonction du temps (les lettres représentent les véhicules perçus)	106
6.2	Évolution de l'accélération de l'agent A en fonction du temps.	107

Liste des tableaux

2.1	Paramètres et variables de la loi de poursuite	13
2.2	Les sous-tâches de conduite et les niveaux hiérarchiques : Opérationnel (O), Tactique (T) et Stratégique (S).	25
3.1	Exemples de sous-tâches de conduite avec les focus associés.	54
4.1	Prédicats élémentaires qui permettent de définir des règles comportementales plus complexes.	69
4.2	Exemple de calcul par l'agent A de l'importance des percepts selon la situation en Fig. 4.4. Les entités sont indicées en fonction du conflit dans lequel ils sont considérés. Par exemple, le véhicule D apparaît en tant que D_2 dans le conflit c_2 et en tant que D_3 dans le conflit c_3	79
5.1	Les débits d'entrée en véhicules pour une heure sur les 4 axes du carrefour de Reggio [Champion, 2003]	85
5.2	La matrice Origine/Destination (%)	86
5.3	Les paramètres de la lois de poursuite utilisés lors des simulations	86
5.4	Comparaison entre débits simulés et débits observés	88
5.5	Comparaison des REQM (moyen de 100 heures de simulation avec les conducteurs sans limite de perception) de nos résultats avec ceux de Champion et Doniec.	89
5.6	Temps d'exécution	95
5.7	Les résultats de la population hétérogène	96
5.8	Les résultats avec les conducteurs hypovigilants	98

Chapitre 1

Introduction

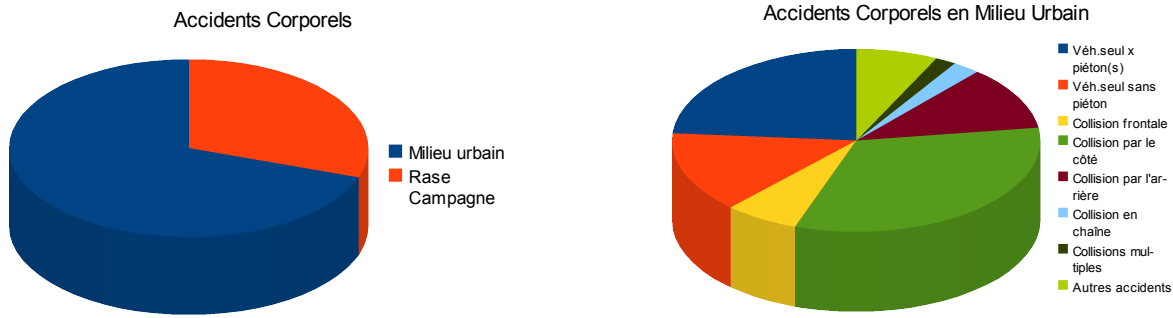
La modélisation et la simulation de trafic routier contribuent à la compréhension des événements dus aux interactions entre les usagers tels que les embouteillages ou les accidents. Dans ce domaine de recherche, notre objectif est de simuler les interactions dans un milieu accidentogène (carrefour) en tenant compte des facteurs humains. Notre problématique est, précisément, de rendre plus crédible la simulations des comportements du conducteur en carrefour. Dans ce but, cette thèse opte pour une approche multi-agent de la modélisation du comportement individuel et des interactions, avec le support d'une sélection de travaux issus des Sciences Cognitives. La première section de ce chapitre est consacrée à la présentation du contexte et des enjeux pour chacun des domaines ; la deuxième section annonce la problématique en détail et la troisième section présente le plan du manuscrit.

1.1 Contexte

En section 1.1.1, nous introduisons la simulation de trafic routier, ses principaux niveaux de modélisation, ses liens avec la sécurité routière et ses lacunes actuelles. La section 1.1.2 présente les Systèmes Multi-Agents (SMA) et les raisons pour lesquelles nous avons adopté cette approche de modélisation. Après avoir identifié le besoin et l'approche proposée, en section 1.1.3, nous introduisons quelques travaux appartenant à l'approche dominante en Psychologie Cognitive pour présenter le fonctionnement cognitif de l'être humain, ce qui va nous permettre de proposer un modèle d'agent à partir des travaux issus de ce domaine.

1.1.1 Simulation de Trafic

La simulation informatique est utilisée depuis presque 60 ans (depuis le Projet Manhattan en 1953). L'objectif de la simulation informatique est de reproduire une partie des phénomènes réels, malgré toutes les simplifications effectuées au cours de la modélisation. Au sens large, la simulation est l'expérimentation d'un modèle. Différentes situations poussent à l'adoption de la simulation informatique comme outil, e.g. si l'expérimentation du système réel crée une gêne permanente en cas d'échec (centrale nucléaire), si le système



(a) La distribution des accidents corporels.

(b) La distribution des types d'accident en milieu urbain.

FIGURE 1.1 – Les distributions des accidents en 2010 selon le bilan de l'ONISR.

réel évolue si vite (ou si lentement) qu'on ne peut pas collecter les données pertinentes ou si le coût de l'expérimentation est très élevé [Klügl, 2009].

Un des domaines qui fait appel à la simulation informatique est la modélisation du trafic routier (depuis 1955 [Gerlough, 1955]). Il existe deux grandes approches dans ce domaine : macroscopique et microscopique.

La modélisation macroscopique traite le système composé de flux de véhicules (trafic) comme un objet dont les variables d'état sont peu nombreuses. Cette approche est soutenue depuis plusieurs années pour comprendre et prévoir la formation d'une congestion et sa propagation sur le réseau ; elle est fondée sur une base mathématique bien établie. Toutefois, elle ne traite pas du détail des interactions locales d'une population hétérogène d'individus.

Par contre, la modélisation et la simulation microscopique du trafic routier traitent chaque acteur (e.g. véhicule) du trafic routier comme un individu. Ces acteurs adaptent leurs comportements à l'environnement dynamique du trafic routier dans lequel ils interagissent avec les autres acteurs, chacun ayant ses propres attributs. En modélisation microscopique du trafic, il y a différents modèles qui correspondent à différentes sous-tâches de conduite. Par exemple, les lois de poursuite servent à simuler le comportement des conducteurs pendant la conduite en file, et la traversée du carrefour est régie selon des règles de priorité et d'acceptation de créneau.

L'objectif de ces modèles (macro ou micro) est de comprendre et de simuler l'état actuel du trafic et son évolution, afin de réguler le présent ou de prévoir le futur, et améliorer ainsi le réseau de transport. Avec la croissance de la population, l'encombrement de la circulation en particulier en milieu urbain est un problème de plus en plus important auquel de nombreux travaux dans ce domaine cherchent une réponse.

Par ailleurs, la sécurité routière est un problème très important du trafic routier. Selon le bilan de l'ONISR¹ [ONISR, 2011], le nombre d'accidents corporels en milieu urbain est beaucoup plus important qu'à la campagne (69,6% de l'ensemble des accidents corporels sur la figure 1.1a). Il y a eu 46 859 accidents corporels, 1 133 personnes tuées, 15 797

1. Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière

blessés hospitalisés et 40 418 blessés non-hospitalisés en 2010 en France Métropolitaine à cause des accidents en milieu urbain. Parmi ces accidents en milieu urbain, les collisions par le côté (essentiellement en carrefour) occasionnent beaucoup d'accidents corporels (32,6% des accidents sur la figure 1.1b).

Dans leur rapport, Brenac et al. [Brenac et al., 2003] présentent une recherche approfondie sur 374 cas d'accidents corporels de la circulation routière impliquant des piétons ayant eu lieu en 2003 en France. Ils ont défini 20 types d'accidents différents (e.g. « conducteur tournant puis heurtant en sortie de carrefour un piéton traversant, souvent non détecté »). La plupart de ces accidents sont liés à un problème de prise d'information.

Actuellement, l'accidentologie et la sécurité routière restent aux frontières du domaine de la modélisation du trafic. L'état actuel des modèles existants est loin de simuler les scénarios d'accident ou les situations accidentogènes (i.e. « presque accident ») car le but des modèles existants est de simuler le trafic afin d'enlever ou de prévenir l'insuffisance du point de vue de l'offre et de la demande du trafic. Donc, les modèles sont généralement sans collision et ne fournissent pas suffisamment d'indicateurs pour une évaluation de la sécurité routière [Gettman and Head, 2003]. Cette thèse vise en partie à terme à combler cette lacune. En respectant les exigences de la modélisation de trafic, nous pensons que les comportements des conducteurs doivent être pris en compte avec leurs limites et leurs imperfections.

Par conséquent, la granularité des modèles de trafic, même microscopiques, doit être affinée en prenant en compte les aspects comportementaux du conducteur. Dans la littérature, différents noms comme l'approche nanoscopique [Archer and Kosonen, 2000b] ou l'approche comportementale [Champion et al., 2001], sont utilisés pour décrire cette approche.

Le comportement du conducteur peut se décrire selon trois niveaux [Allen et al., 1971, Michon, 1985] :

- Niveau Stratégique : ce niveau correspond au choix des objectifs. Cela inclut les activités statiques comme la planification et la sélection du trajet ou l'estimation du temps d'arrivée à destination qui ne sont pas (ou peu) mis à jour lors du déplacement du véhicule.
- Niveau Tactique : les activités de ce niveau sont celles qui seront exécutées pour atteindre les objectifs déterminés au niveau supérieur. Ces activités (e.g. le dépassement d'un véhicule, la traversée de carrefour) sont déterminées par les situations dans lesquelles les conducteurs se trouvent.
- Niveau Opérationnel : à ce niveau, le conducteur exécute des manœuvres basiques comme le freinage ou l'accélération, pour la réalisation des tâches définies au niveau supérieur.

En vue de se rapprocher des situations accidentogènes en simulation de trafic, nous allons nous concentrer sur les activités tactiques et les activités opérationnelles qui ont un effet direct sur l'occurrence des accidents. Le type de situation routière que nous avons considéré, en milieu urbain, et qui occasionne 28,9% des accidents corporels totaux selon le rapport d'ONISR [ONISR, 2011], est le *carrefour*.

Le problème que nous allons particulièrement considérer est celui de la prise d'information. En nous inspirant d'un enjeu mis en évidence dans le rapport de Brenac et

al. [Brenac et al., 2003], notre approche consiste à coupler les modèles microscopiques du trafic avec un modèle de perception humaine. La perception est représentée dans le modèle comme un module d'acquisition et de sélection d'informations qui transmet les informations nécessaires à la prise de décision. La question consiste alors à créer un modèle crédible de perception pour la conduite automobile.

La simulation est aussi un outil d'apprentissage qui est adopté dans plusieurs domaines (simulateur médical, simulateur de vol, simulateur de conduite...). Les simulateurs permettent aux personnes de se tester dans un environnement virtuel et d'enrichir leurs capacités, avant qu'ils ne s'impliquent dans l'environnement réel où les erreurs dues au manque de compétence ou d'expérience peuvent coûter cher. Donc il faut que les simulateurs fournissent une expérience proche autant que faire se peut de la réalité.

Le réalisme d'un simulateur peut être augmenté avec le niveau de concordance des sensations assurées avec celles auxquelles l'utilisateur est habitué [Petit et al., 2012]. Dans la vie, les conducteurs interagissent avec les autres conducteurs. Donc, un moyen d'augmenter le niveau de réalisme est d'améliorer le comportement des conducteurs simulés afin de donner à l'utilisateur l'impression d'interagir avec de vrais conducteurs. Cela suppose un modèle pour le trafic virtuel qui doit, d'une part refléter l'intelligence de l'être humain (avec une capacité d'intégration des changements dans l'environnement, une capacité d'anticipation des situations à risque, etc.), et d'autre part doit inclure les limites humaines qui conduisent à des prises de risque (capacité limitée à traiter l'information, mauvaise prédiction, etc.).

Les travaux réalisés au cours de cette thèse visent à contribuer à la modélisation et la simulation de trafic, avec des possibilités d'application également en simulation de conduite.

1.1.2 Systèmes Multi-Agents

Les Systèmes Multi-Agents (SMA) proposent un formalisme et une approche de la simulation : la Simulation et la Modélisation à Base d'Agents (SMBA)². Le concept d'« agent » est au centre de cette approche et désigne « *un système informatique situé dans un environnement dans lequel il est capable d'exécuter des actions autonomes afin d'atteindre ses objectifs de conception* » [Wooldridge and Jennings, 1995]. Au vu de cette définition, toute simulation des phénomènes de la vie sociale qui inclut les interactions humaines peut être considérée comme une simulation à base d'agents [Gilbert and Troitzsch, 2005], car chaque individu a ses objectifs, son plan et exécute des actions autonomes afin de les atteindre.

Nous avons adopté la SMBA comme approche de modélisation et de simulation car selon [Macal and North, 2008, Klügl, 2009], elle offre des avantages spécifiques pour les cas où :

- le système simulé se compose d'agents autonomes,
- les agents (ayant différentes capacités) se comportent de façon hétérogène,
- les individus modélisés (les agents) adaptent leurs comportements selon les changements de l'environnement et selon les relations dynamiques entretenues avec les

2. Nous avons « francisé » le « ABMS » (Agent-Based Modeling & Simulation) des anglophones

- autres individus,
- l’agent a une composante spatiale (il occupe un espace) qui influence ses comportements et les interactions,
- le nombre d’agents et le nombre d’interactions entre les agents est important,
- il y a au moins deux niveaux d’observations (macro-micro).

Toutes ces caractéristiques se retrouvent dans le cas du trafic routier. En résumé, nous utilisons la SMBA pour observer les macro-phénomènes (les débits, l’embouteillage, la fréquence d’accident) qui émergent d’un système complexe (le trafic routier) à travers des interactions locales d’agents autonomes (les conducteurs).

La modélisation SMA élabore et définit les concepts généraux (e.g. l’agent, l’environnement) qui servent à décomposer un système complexe en concepts et à désigner chacun de ces concepts avec leurs interactions. De ce fait, les SMA posent un cadre de modélisation qui peut être appliqué à la modélisation du trafic. Les SMA (la SMBA) sont de plus en plus utilisés dans le domaine de la modélisation du trafic depuis la fin des années 90 [Sukthankar et al., 1998, Ehlert and Rothkrantz, 2001, Champion et al., 2002, Rigolli and Brady, 2005, Wang et al., 2005, Ferreira et al., 2008]. D’autre part, grâce à ses accointances avec les Sciences Sociales, il est possible d’utiliser les notions élaborées par cette approche pour étendre l’approche nanoscopique du trafic.

Un modèle multi-agent comprend quatre composantes essentielles : l’agent, l’environnement, l’interaction et l’organisation. L’*environnement* est le « contenant » de tous les agents et des autres entités dont l’état peut être perçu et/ou modifié par les *agents*. Selon la modélisation, il est possible de lui attribuer un rôle plus important (e.g. la médiation des interactions entre les agents). Les *interactions* des agents entre eux peuvent se faire par des règles comportementales simples ou par des structures plus complexes comme des *organisations*.

Dans un modèle multi-agent du trafic, les agents modélisent les acteurs autonomes du trafic, à savoir les conducteurs (ou les véhicules), mais aussi les deux roues et les piétons. La structure d’agent généralement utilisée dans ce contexte comprend les trois parties usuelles : *perception-décision-action*³.

La décision a souvent été étudiée en modélisation et simulation microscopique du trafic. Des travaux antérieurs (voir [Champion, 2003, Doniec, 2006]) ont, par exemple, abordé le problème de l’autonomie décisionnelle des agents-conducteurs en carrefour. En effet, l’état actuel des modèles et outils les plus utilisés ne permet pas au conducteur simulé de gérer ses comportements dans un carrefour sans panneau de signalisation (e.g. *stop*, *cédez-le-passage*) de façon autonome. Le point du réseau routier où l’agent va appliquer ses règles de décision est imposé par le concepteur. Une telle approche est suffisante pour modéliser les débits avant et après le carrefour. Avec un bon paramétrage, ces outils offrent des débits simulés d’entrée et de sortie proches de ceux observés en réalité. Par contre, *quand on veut étudier le carrefour lui-même, ces outils révèlent leurs limitations, ils empêchent un bon nombre de phénomènes qui seraient observés dans la vie réelle dans le centre de carrefour* [Mandiau et al., 2008] : comme le blocage partiel de voies ou le stockage de

3. Nous verrons que ce type de modèle est en concordance avec des modèles proposés en psychologie cognitive.

plusieurs véhicules. Un mécanisme de coordination multi-agent fondé sur les jeux a été proposé pour résoudre ce problème [Champion, 2003, Mandiau et al., 2008].

Au contraire de la décision, la perception a été relativement peu étudiée dans le contexte de la modélisation et simulation agent du trafic. Or, comme énoncé précédemment, la prise d'information est une problématique importante liée à la sécurité routière. Notre objectif vise à combler cette lacune, et donc de proposer un modèle de perception qui contribue aux modèles SMA pour la simulation microscopique du trafic routier. Pour cela, et s'agissant de modéliser la perception humaine des conducteurs, notre démarche a consisté à nous inspirer de certains travaux issus des sciences cognitives.

1.1.3 Sciences Cognitives

Nous nous sommes intéressés aux recherches en *sciences cognitives* afin de doter notre modèle de conducteur d'une capacité de perception humaine réaliste. Le terme « cognition » désigne tous les processus mentaux qui ont un rapport avec l'activité de connaissance (activité cognitive) : son acquisition, son stockage, sa transformation et son utilisation. Les sciences cognitives considèrent la connaissance en tant que système de traitement de l'information relatif aux données externes, c.à.d. à l'environnement, avec ses contenus comme les états des entités présentes [Gaonac'h, 2006].

La perception et l'attention sont deux grandes fonctions cognitives qui sont à la base de notre modèle. La perception est « *l'ensemble des mécanismes et procédures qui nous permettent de prendre connaissance du monde qui nous entoure sur la base des informations élaborées par nos différents sens* » [Donnadieu et al., 2006]. Les routines de la perception sont inconscientes, certaines sont innées (e.g. regroupement des formes selon leur couleur) et d'autres sont issues d'un apprentissage (e.g. reconnaissance d'un véhicule dans un environnement). Dans cette thèse, l'intérêt est porté à la perception visuelle.

Selon le dictionnaire Larousse, l'attention est « la capacité de concentrer volontairement son esprit sur un objet déterminé ». La notion de volonté rend la définition ambiguë. Plus clairement, l'attention est la fonction cognitive qui conduit à la sélection des éléments parmi ceux perçus inconsciemment qui continueront à être traités par les activités de plus haut niveau de la cognition comme la prise de décision. Il y a deux processus caractérisant l'attention, les processus top-down (descendant) et bottom-up (ascendant) :

1. Les processus top-down sont dirigés par les buts : les humains portent attention à certains éléments environnementaux en fonction de leurs buts ou intentions, qui déterminent la « pertinence » des informations obtenues.
2. Les processus bottom-up sont dirigés par les données : l'attention est conditionnée par l'attractivité (appelée également « saillance ») des données, à savoir la capacité des items de l'environnement à capter, ou retenir, plus ou moins l'attention.

L'attention est donc l'activité qui complète l'acquisition par une capacité de sélection des informations auxquelles l'être humain porte intérêt grâce à leur saillance et/ou à leur pertinence.

Avec ces deux processus, la troisième composante de la cognition humaine que nous avons prise en compte est la capacité limitée de la mémoire à court terme de l'être humain [Miller, 1956]. Les informations acquises et sélectionnées sont filtrées à cause de cette

capacité limitée qui est aussi importante que les deux autres aspects pour modéliser la perception humaine.

1.2 Problématique

Cette thèse a pour objectif principal de présenter un modèle d'agent-conducteur en mettant le focus sur la modélisation des comportements dans un milieu accidentogène et urbain, le *carrefour*.

Les SMA sont adoptés comme cadre théorique en raison de leur capacité de modélisation des phénomènes sociaux émergeant d'interactions entre entités autonomes. La décision de l'agent-conducteur a été modélisée par des modèles existants en simulation microscopique du trafic. Mais la perception telle qu'elle est actuellement développée dans le domaine des SMA ne permet pas une modélisation de la perception humaine⁴ avec les processus attentionnels (top-down, bottom-up). Or, même si un modèle complet de perception et d'attention en psychologie sur lequel tout le monde est en accord requiert encore des travaux, des connaissances sur lesquelles fonder une modélisation informatique de la perception humaine existent dans le domaine des sciences cognitives. Nous nous appuyons donc sur celles-ci afin d'atteindre notre objectif d'améliorer les modèles existants de perception en SMA avec les facteurs humains pour un modèle plus complet de conducteur à base d'agent.

Associé à la modélisation, notre objectif secondaire est de contribuer à la réalisation d'un outil de simulation, dans le but de valider le modèle proposé. De plus, en détaillant la partie *Perception* de l'agent, nous affinons la granularité du modèle du conducteur. Une des conséquences de ce changement d'échelle, est de permettre d'explorer, en simulation, des variations inter-individuelles (en terme de perception) afin d'augmenter l'hétérogénéité de la population de conducteurs. Enfin, un dernier objectif de cette thèse est de fournir un outil de simulation « flexible » aux cognitivistes travaillant dans le domaine du trafic, c'est-à-dire suffisamment reconfigurable pour permettre de modifier ou redéfinir un ensemble de fonctions composant le modèle.

1.3 Plan

Le chapitre 2 présente l'état de l'art en trois parties : Modélisation du Trafic, SMA et Sciences Cognitives. Le chapitre 3 présente le modèle de perception proposé. Au chapitre 4, l'application et l'implantation du modèle d'agent et de son module de perception sont présentées dans le contexte de la simulation du trafic pour un scénario de traversée de carrefour. Le chapitre 5 présente les résultats des expérimentations effectuées en simulation avec les données d'un carrefour existant. Finalement au chapitre 6, nous terminerons avec la conclusion et les perspectives.

4. Dans cette thèse, la perception est réduite à la perception visuelle qui domine la tâche de conduite.

Chapitre 2

État de l'Art

Dans ce chapitre, nous allons présenter les domaines et les travaux qui nous ont guidé pour atteindre notre objectif de produire un modèle plus crédible de conducteur avec un modèle de perception inspiré de l'humain.

Dans la première section de ce chapitre, nous allons présenter l'état actuel des travaux en modélisation et simulation de trafic routier et nous allons en expliquer les objectifs et les exigences.

Après avoir mentionné la nécessité de faire un modèle plus détaillé des conducteurs pour l'évaluation de la sécurité routière, en deuxième section, nous allons examiner les Systèmes Multi-Agents (SMA) comme une approche permettant d'aborder ce problème et nous allons coupler cette approche avec les connaissances en Sciences Cognitives (SC) sur la tâche de conduite.

En troisième section, nous allons explorer la possibilité de simuler la décision du conducteur avec un modèle de décision d'agent, et nous allons examiner le concept d'action dans un cadre SMA.

Finalement, nous allons examiner en détail la perception. Nous montrerons que celle-ci constitue un processus cognitif important, dans le but de créer un modèle plus détaillé du conducteur. En dernière section, la perception sera ainsi explorée du point de vue SMA et SC.

2.1 Modélisation du Trafic Routier

Le trafic est un sujet d'étude complexe à cause du nombre d'acteurs existants dans l'environnement et du caractère maillé de ce dernier [Buisson and Lesort, 2010]. Une des problématiques les plus importantes est de comprendre la formation et l'évolution de la congestion. La congestion est habituellement traitée du point de vue de l'offre et de la demande. Si la demande des usagers est plus élevée que la capacité de la route (ou du réseau routier), la formation d'un embouteillage est inévitable.

La congestion est un phénomène évolutif, à la fois dans le temps et dans l'espace [Buisson and Lesort, 2010]. Une fois le bouchon formé, avec l'arrivée des nouveaux véhicules, le domaine de congestion s'étend sur un plus large espace en raison de l'espace occupé par chaque véhicule dans la congestion. La file d'attente allongée peut se propager sur tout

un réseau à cause de sa structure maillée.

La théorie du trafic nous fournit des moyens de calcul pour examiner l'évolution du trafic dans le réseau. Ces calculs donnent un ordre de grandeur et grâce aux outils de simulation, les chercheurs peuvent tester différentes hypothèses pour des scénarios et des situations divers.

Par ailleurs, la sécurité routière est un sujet de recherche qui gagne de plus en plus d'importance en simulation. Les recherches pluridisciplinaires nous permettent d'obtenir plus de connaissances sur les comportements de conduite et de faire des modèles plus fins [Archer and Kosonen, 2000a]. Avec la croissance en capacité des ordinateurs (rapidité) et en technique de modélisation informatique (en particulier, avec les SMA), nous avons l'occasion de proposer un modèle plus fidèle à la réalité, ce qui est essentiel pour l'évaluation de la sécurité routière. Par contre, pour calibrer et valider, nous avons encore besoin de développements en collecte des données.

La modélisation et la simulation sont ici destinées à l'étude des caractéristiques du trafic routier sur les axes et nœuds du réseau, en termes de débits, densités, vitesses, etc. Ces caractéristiques peuvent être abordées à différents niveaux de détail, au niveau macroscopique qui correspond à une vue large en termes de flux principalement, au niveau microscopique qui correspond à une vue plus détaillée en termes de comportements individuels et d'interactions. Le niveau mésoscopique offre une vue intermédiaire, en termes de petits groupes de véhicules.

Nous présentons d'abord les modèles macroscopiques et mésoscopiques, puis nous verrons en détail les modèles microscopiques qui correspondent au niveau d'études des processus comportementaux que nous souhaitons aborder dans cette thèse.

2.1.1 Modèles Macroscopiques

Les modèles macroscopiques s'appuient sur une analogie avec la mécanique des fluides. L'hypothèse de base est que les véhicules peuvent être assimilés à un flux homogène. Les variables macroscopiques sont :

- le **débit** Q , le nombre de véhicules qui passent pendant à un intervalle de temps en un point. L'unité est le nombre de véhicules par unité de temps ;
- la **concentration** (ou la densité) K , le nombre de véhicules sur une section du réseau. L'unité de concentration est le nombre de véhicules par unité de longueur ;
- la **vitesse moyenne** U , la vitesse moyenne des véhicules sur une section à un instant donné. Elle est exprimée en unité de longueur par unité de temps.

Selon la mécanique des fluides et les observations, la relation fondamentale entre ces trois variables est représentée par l'équation :

$$Q = K \times U$$

et la loi de conservation :

$$\partial_t K + \partial_x Q = 0$$

décrivant que le nombre des véhicules dans la cellule x croît par rapport à l'équilibre entre les bornes x et $x + dx$ de la cellule. Ces deux équations constituent un système

de deux équations indépendantes avec trois variables inconnues [Hoogendoorn and Bovy, 2001]. Le modèle généralement adopté pour compléter ce système d'équation est le modèle LWR (Lighthill-Whitham-Richards) qui décrit U en fonction de densité K .

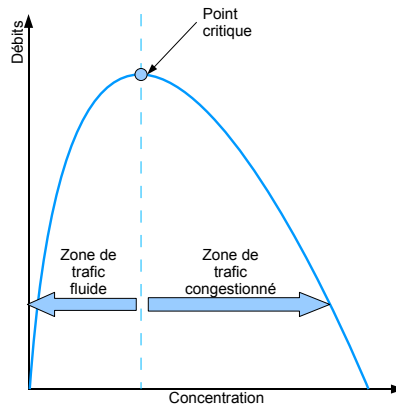


FIGURE 2.1 – Le diagramme fondamental de trafic

La figure 2.1 représente la relation entre la concentration K et le débit Q . Dans la partie gauche de la courbe où il y a une faible concentration, le débit croît jusqu'à ce qu'il atteigne la capacité de la section. Après le dépassement de la capacité (le point critique), une congestion apparaît et plus la concentration augmente, plus le débit diminue.

Avec les modèles macroscopiques, on simule le réseau routier en le discrétisant en terme d'espace (les différents segments) et de temps (les indices de temps) [Papageorgiou et al., 2010]. Les modèles macroscopiques sont capables d'expliquer l'évolution de la congestion sur un réseau. La sortie d'un segment est l'entrée du suivant. Dans le cas d'une forte densité sur un segment, la congestion se propage vers l'amont.

Cette approche modélise un carrefour comme un nœud sur le réseau et traite l'écoulement au nœud en s'appuyant sur une modification locale des règles de calcul de débits. Par exemple, dans un outil de simulation macroscopique du trafic (METANET) [Papageorgiou et al., 2010], le carrefour calcule la quantité totale d'entrée des différentes voies entrantes à un instant t et il la propage sur les différentes voies sortantes en fonction du coefficient de distribution. Dans le cas de forte densité sur les voies sortantes, le carrefour (le nœud) propage la congestion vers les voies entrantes.

Dans l'approche macroscopique, les véhicules ne sont pas modélisés individuellement. On voit que les variations de comportement d'un véhicule à l'autre (inter-individuelles) et d'un véhicule au cours de son déplacement (intra-individuelles) sont généralement négligées dans les modèles macroscopiques. Par contre, ces modèles fournissent le moyen de modéliser l'écoulement du trafic avec un coût informatique beaucoup moins élevé que les modèles microscopiques [Papageorgiou et al., 2010].

2.1.2 Modèles Mésoscopiques

Deux approches distinctes appartiennent au niveau mésoscopique de modélisation du trafic. Une des approches mésoscopiques consiste à combiner la description microscopique d'un véhicule avec les règles macroscopiques comportementales [Leclercq and Becarie, 2012] et permet donc de prendre en compte quelques caractéristiques hétérogènes des conducteurs à un certain niveau (e.g. la vitesse désirée). L'autre approche consiste à ne pas distinguer les véhicules mais à spécifier les comportements d'un groupe hétérogène d'individus. Pour ce faire, les modèles probabilistes peuvent être adoptés [Hoogendoorn and Bovy, 2001].

2.1.3 Modèles Microscopiques

Les modèles microscopiques permettent de décrire les comportements individuels des véhicules. Ces modèles représentent les comportements des véhicules généralement grâce à des règles de la forme « si...alors...sinon... » [Hoogendoorn and Bovy, 2001].

Chaque véhicule (ou conducteur) modélisé est caractérisé par un ensemble de paramètres (e.g. vitesse désirée, accélération). Ces paramètres sont spécifiés par des tirages aléatoires. Par conséquent, les résultats de la simulation d'un modèle microscopique dépendent des paramètres stochastiques et nécessitent plusieurs répliques afin de diminuer l'effet des cas spécifiques dépendant du tirage aléatoire. Les indicateurs d'évaluations (macroscopiques) sont issus de l'agrégation des résultats microscopiques (individuels).

Nous allons présenter les modèles microscopiques dans deux situations : la conduite en section courante et la traversée de carrefour. Les deux tâches importantes de conduite en section courante sont la conduite en file et le changement de voie. Les deux tâches sont simulées par des modèles correspondants : la loi de poursuite et le changement de voie. La traversée de carrefour est principalement assimilée à une action d'acceptation de créneau. Ces modèles seront présentés dans la suite de la section.

2.1.3.1 Loi de poursuite

Dans la littérature, plusieurs modèles tentent d'expliquer les comportements de conduite en file. Tandis que les modèles de distance de sécurité calculent et proposent une distance qui empêche les accidents probables en poursuite [Gipps, 1981], les lois de poursuite sont des modèles de type stimulus-réponse [Hoogendoorn and Bovy, 2001]. Les lois de poursuite sont les principaux modèles de la simulation microscopique de trafic routier. Ils permettent de calculer une valeur d'accélération (la réponse) au temps t en tenant compte de l'état actuel à $t - 1$ (le stimulus). Un des modèles les plus connus (et parmi les premiers) est celui de [Gazis et al., 1959] qui calcule la valeur d'accélération en fonction de la différence de vitesse et de distance avec le véhicule de devant.

Un modèle plus récent est le modèle IDM (Intelligent Driver Model) [Kesting et al., 2009], ses paramètres étant décrits dans le tableau 2.1 et illustrés dans la figure 2.2 :

$$\frac{dv}{dt} = f(s, v, \Delta v) = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right]$$

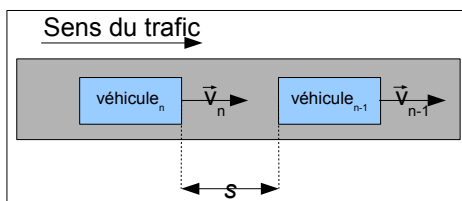


FIGURE 2.2 – La poursuite du véhicule devant ($vehicule_{n-1}$) par le véhicule suiveur ($vehicule_n$)

où

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}}$$

Paramètres	Description
v_0	la vitesse désirée
a	l'accélération maximale
b	la décélération confortable
T	l'écart temporelle désirée
s_0	l'interdistance minimale
Variables	
v	la vitesse actuelle (v_n sur la figure 2.2)
Δv	la différence entre les vitesses des véhicules ($v_n - v_{n-1}$ sur la figure 2.2)
s	l'interdistance actuelle entre deux véhicules (voir Fig. 2.2)
$s^*(v, \Delta v)$	l'interdistance dynamique désirée

TABLE 2.1 – Paramètres et variables de la loi de poursuite

IDM est une combinaison de deux stratégies : la stratégie d'accélération et la stratégie de décélération. La stratégie de décélération est représentée avec le terme $-a \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2$ comme l'interaction répulsive dans le cas où le véhicule n est très proche du véhicule devant $n - 1$. Si la distance actuelle s est grande, le terme de décélération est négligeable devant le terme d'accélération. Donc sur une route dégagée, l'accélération est équivalente à $a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta \right]$ (la stratégie d'accélération). C'est une fonction décroissante avec la valeur maximale a par exemple quand le véhicule est à l'arrêt, et la valeur minimale 0 quand la vitesse du véhicule a atteint la vitesse désirée v_0 .

En cas d'encombrement, le terme de décélération qui dépend du taux entre $s^*(v, \Delta v)$ et s , devient pertinent. Dans le calcul de $s^*(v, \Delta v)$, l'interdistance minimale s_0 est significative quand le véhicule a une vitesse basse. Le terme vT correspond à la poursuite du véhicule devant avec un écart temporel constant T . Le terme $\frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}}$ est actif quand le trafic n'est pas en état stationnaire (où $\Delta v \neq 0$). L'objectif de ce dernier est de calculer un taux de décélération proche d'une décélération confortable b . Pourtant, IDM peut calculer des

décélérations plus fortes que b , si l'interdistance s est très petite, ce qui fait qu'IDM ne permet pas les collisions.

L'exposant δ spécifie comment l'accélération diminue quand la vitesse du véhicule s'approche de la vitesse désirée. Dans [Kesting et al., 2009], les auteurs proposent de fixer δ à 4 pour avoir le comportement le plus réaliste.

Les paramètres de ce modèle (v_0, a, b, T et s_0) sont ceux adoptés dans notre modèle de conducteur pour simuler le comportement en cas de poursuite d'un véhicule de devant et sont illustrés en section 5.1.1.

2.1.3.2 Loi de changement de voie

Les lois de changement de voie sont utilisées pour modéliser le déplacement latéral des conducteurs. Une loi de changement de voie est une fonction qui prend principalement en compte la vitesse désirée du conducteur, ainsi que la vitesse et le créneau sur la voie adjacente. Si le changement de voie est désiré et possible en considération des paramètres, il se réalise.

Le désir de changement de voie dépend de la vitesse désirée. Si un véhicule devant empêche le véhicule derrière d'atteindre la vitesse désirée, ce dernier peut vouloir se déplacer vers une voie lui permettant d'atteindre sa vitesse désirée. D'autre part, la faisabilité d'un changement de voie dépend des créneaux disponibles. Pour évaluer un créneau, le véhicule calcule le freinage imposé par le véhicule à l'aval sur la voie de destination et le freinage qu'il impose au véhicule en amont sur la voie de destination. Si les deux taux de freinage sont acceptables, le changement de voie est possible [Casas et al., 2010].

Nous pouvons considérer ce modèle comme un cas d'utilisation spécialisée des modèles d'acceptation de créneau qui sont expliqués en détail dans la section suivante.

2.1.3.3 Modèle d'acceptation de créneau

Le modèle d'acceptation de créneau (*gap acceptance*) est largement utilisé dans les modèles microscopiques de simulation de trafic. Il modélise le comportement des conducteurs avant d'être engagés en carrefour. Ce modèle détermine la priorité entre deux véhicules qui s'approchent d'un carrefour. La priorité est calculée selon les coordonnées et la vitesse des véhicules. Un conducteur s'approchant du carrefour perçoit les autres véhicules arrivant des différentes directions. En tenant compte de leurs vitesses et des zones de conflit, le conducteur calcule le créneau temporel (la durée d'arrivée d'un véhicule à la zone de conflit). Le paramètre le plus important du modèle est le créneau critique qui désigne la valeur seuil des créneaux acceptables. Les créneaux supérieurs au créneau critique sont acceptés par le conducteur simulé et il se considère comme prioritaire par rapport aux autres véhicules.

Un des principaux sujets de recherche dans ce domaine est de modéliser le créneau critique des conducteurs en utilisant des méthodes statistiques sur les données observées des créneaux temporels refusés ou acceptés par les conducteurs en attente à l'entrée d'un carrefour [Daganzo, 1981, Mahmassani and Sheffi, 1981]. Mahmassani et Sheffi [Mahmassani and Sheffi, 1981] ajoutent dans leur modèle d'acceptation de créneau, l'effet du nombre de créneaux non-acceptés sur le créneau critique. Ils constatent que plus le nombre de

créneaux refusés augmente, plus le créneau critique des conducteurs diminue, ce qui est interprété comme un facteur d'impatience.

[Davis and Swenson, 2004] proposent que la distance entre un véhicule tournant et un autre qui vient du sens opposé est le paramètre le plus fiable associé au comportement de choix du créneau pendant le tourne-à-gauche car les conducteurs ne peuvent pas calculer précisément le créneau temporel. Les auteurs constatent que les méthodes traditionnelles en tenant compte des créneaux temporels sont effectives pour estimer la capacité du carrefour ; par contre, si l'objectif est d'étudier la sécurité routière, les facteurs humains doivent être pris en considération.

Dans un autre travail [Schaap et al., 2009] analysent les recherches actuelles sur le modèle d'acceptation de créneau et leurs insuffisances à simuler des accidents et des situations accidentogènes. Selon les auteurs, l'acceptation du créneau dépend non-seulement du conducteur mais aussi de la nature du carrefour et de la situation du trafic. De plus, l'âge et le genre sont présentés également dans leur travail comme des facteurs qui influencent le comportement d'acceptation de créneau des conducteurs. Schaap et al. proposent un modèle étendu d'acceptation de créneau en pondérant quatre créneaux successifs (i.e. en prenant en compte les quatre véhicules les plus proches) selon un certain nombre de critères. Cette approche est implantée et testée sur un carrefour en T. C'est une tentative pour mieux décrire les comportements des conducteurs à l'entrée du carrefour et estimer le taux d'accident avec plus de précision.

Hidas [Hidas, 2005] a montré que parmi les principaux simulateurs commerciaux microscopiques de trafic (Q-Paramics, Vissim, Aimsun), AIMSUN est le seul outil de simulation qui fournit le moyen convenable de modéliser l'effet du temps d'attente pendant la congestion à l'entrée du carrefour sur la variation de créneau critique. Selon Jones et al. [Jones et al., 2004], cette propriété permet à AIMSUN de rendre plus réaliste le comportement de traversée de carrefour.

Suite à ces constats, nous avons porté une attention particulière à AIMSUN. Le manuel d'utilisateur d'AIMSUN [AIMSUN, 2010] explique les points essentiels du modèle d'acceptation de créneau implanté. Ce modèle est utilisé pour modéliser le comportement « cédez le passage » ou « stop ». AIMSUN calcule la distance entre le véhicule qui vient de la route prioritaire et le point de conflit théorique. Puis, le modèle estime le temps nécessaire pour que l'autre véhicule atteigne le point de conflit à l'aide de la distance perçue, la vitesse et l'accélération de ce dernier. En fonction du temps au point de conflit des autres véhicules, le véhicule simulé décide de continuer ou de s'arrêter. Le modèle d'acceptation de créneau devient invalide s'il n'y a aucun panneau de signalisation en carrefour car dans ce cas, tous les conducteurs se considèrent comme prioritaires et se mettent dans le carrefour. Cette situation est irréaliste.

Par ailleurs, s'il y a plusieurs points de conflit théoriques, le véhicule simulé ne se déplace pas tant qu'il ne trouve pas un créneau qui résout tous ces conflits potentiels. Dans AIMSUN (comme sur le réseau routier), la ligne de « stop » ou le panneau de « cédez le passage » est à l'entrée du carrefour. Le modèle d'acceptation de créneau est appliqué quand le véhicule simulé s'approche de ces panneaux de signalisation. Dans ce cas, la décision est prise à l'entrée du carrefour et ne peut plus être remise en cause au cours de la traversée.

Pour contourner ce problème « une décision pour une traversée », il est possible de

permettre aux véhicules simulés de prendre plusieurs décisions partielles et séquentielles en mettant des lignes de « stop » ou des panneaux de « cédez le passage » virtuels dans le carrefour. Ainsi, le véhicule simulé peut se stocker et attendre un créneau acceptable à l'intérieur du carrefour mais par un artéfact du modélisateur.

AIMSUN a un paramètre particulier : le temps maximal de « cédez le passage ». Quand le conducteur ne peut pas trouver un créneau jusqu'au temps maximal de « cédez le passage », il devient impatient et commence à modifier son créneau critique linéairement en diminuant sa marge de sécurité jusqu'à 0. Initialement, le marge de sécurité est égale à deux fois le temps de réaction (un autre paramètre de la simulation). Grâce à cette propriété, on devient capable de modéliser des comportements comme « forcer le passage ».

En résumé, le modèle de traversée de carrefour d'AIMSUN est fondé sur un modèle d'acceptation de créneau. Selon les recherches présentées [Hidas, 2005, Jones et al., 2004], AIMSUN simule plus adéquatement les comportements des conducteurs en carrefour que les autres outils commerciaux. Nous avons cependant constaté que le modèle ne permet pas l'auto-stockage des véhicules dans le carrefour sans artéfact créé par le modélisateur. Le véhicule prend une décision pour toute la traversée d'un carrefour.

Pourtant, Brilon et Wu [Brilon and Wu, 2001] critiquent le modèle d'acceptation de créneau sur trois points :

- La détermination du créneau critique est un processus compliqué et appuyé sur des choix arbitraires. Les effets de ces choix sont incertains.
- Le modèle d'acceptation de créneau n'est pas adéquat pour simuler les comportements non normatifs e.g. forcer le passage, geste de courtoisie (inverser la priorité)
- L'acceptation de créneau ne peut pas être appliqué aux intersections qui incluent les piétons ou les cyclistes à cause de la complexité et de la variabilité des règles et des comportements.

Spek et al. [Spek et al., 2006] proposent d'ajouter les limites dues à la perception humaine au modèle d'acceptation de créneau. Ils se sont focalisés sur la perception de la vitesse d'un véhicule approchant. L'estimation de la vitesse et de la distance d'un véhicule dépendent de la vitesse de ce dernier. En particulier suivant la vitesse de ce dernier, l'estimation de la distance et de la vitesse est plus ou moins précise. Un véhicule à vitesse basse ne crée pas un changement clair du point de vue de l'observateur et empêche l'estimation appropriée de la vitesse. Ils proposent de calculer le créneau critique d'un conducteur en utilisant la vitesse et la distance perçues qui sont modélisées par des variables aléatoires. Ils ont montré que la vitesse perçue d'une voiture à l'approche a aussi un effet significatif sur la décision de traverser. Plus la vitesse du véhicule à l'approche augmente, plus les conducteurs ont tendance à accepter des petits créneaux. Cet effet est plus visible pour les conducteurs âgés.

2.1.4 De l'évaluation de la performance à l'évaluation de la sécurité

Dans la section précédente, nous avons présenté les différentes approches de la Simulation de Trafic à différents niveaux de détails (macroscopique-mésoscopique-microscopique). Essentiellement, l'objectif de ces différentes classes de modélisation est de simuler adéqua-

tement le flux de trafic. En terme d'évaluation de la performance (ou de l'écoulement), les modèles plus fins sont les modèles microscopiques qui fournissent le moyen d'examiner le flux en mettant l'accent sur les individus (les véhicules). Ces modèles plus détaillés donnent le moyen d'examiner les comportements des conducteurs à un niveau de granularité plus affiné et permettent de simuler une population hétérogène de façon plus réaliste (inspirée des conducteurs humains). Pour cette raison, l'approche soutenue dans cette thèse est l'approche microscopique.

Pour l'évaluation de la performance de l'écoulement, la modélisation des comportements « normatifs » en carrefour avec des modèles de poursuite et d'acceptation de créneau est suffisante. Pour l'évaluation de la sécurité, cette approche doit être révisée et nécessite la création d'un modèle plus complexe qui incorpore une variabilité représentative des interactions entre conducteurs [Archer and Kosonen, 2000b]. Cette variabilité comportementale peut être introduite grâce à la modélisation des processus de perception, de prise de décision et d'action et donc de permettre des comportements « moins-que-parfait » et la possibilité de créer différents types d'erreur de conduite [Archer and Kosonen, 2000a].

Par ailleurs, un rapport du département de l'administration fédérale des autoroutes aux États-Unis (FHWA) [Gettman and Head, 2003] compare les outils de simulation microscopique par rapport à leur capacité d'évaluation de mesures de sécurité routière. Ce rapport met en évidence le besoin d'amélioration nécessaire afin d'augmenter la prise en compte des mesures de sécurité routière dans tous les outils de simulation existants. Ces améliorations requises doivent être réalisées à la fois par des développements internes en terme de code source et externes en terme d'indicateurs d'évaluation (e.g. les décélérations) et de statistiques fournies.

Par conséquent, en tenant compte des critiques formulées dans la littérature, notre objectif est d'augmenter le niveau représentatif des modèles microscopiques de conducteur avec un modèle de *perception* plus réaliste en raison de son rôle majeur dans les interactions entre conducteurs. Cet examen détaillé de la perception pourrait permettre d'évaluer certains aspects de la sécurité routière. Pour ce faire, nous utiliserons des connaissances fournies par les Sciences Cognitives. Cette approche qui combine les techniques de modélisation de trafic et les connaissances de la cognition humaine est appelée l'approche *nanoscopique* [Archer and Kosonen, 2000a]. Elle apporte des améliorations aux modèles microscopiques avec des règles comportementales. L'approche nanoscopique a été soutenue par les projets ARCHISIM⁵ [Champion et al., 2001] et HUTSIM [HUTSIM, 2012].

2.2 Vers un modèle d'agent-conducteur

Les modélisations nanoscopiques et microscopiques de trafic s'inscrivent dans un contexte distribué et complexe qui peut être modélisé par des Systèmes Multi-Agents (SMA). De plus, les SMA peuvent être appliqués à la modélisation et la simulation des phénomènes sociaux. Dans cette section, nous allons étudier les travaux en SMA et en SC pour construire un modèle d'agent conducteur qui respecte les contraintes de la modélisation

5. ARCHISIM est un outil de simulation issu des recherches menées au Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations (LEPSiS).

microscopique de trafic mais qui fournit le moyen d'augmenter le niveau de détail des comportements simulés avec un modèle de perception réaliste.

2.2.1 Modélisation et simulation à base d'agent

La Simulation et Modélisation à Base d'Agent (SMBA) des phénomènes sociaux est à l'intersection de trois domaines scientifiques : les sciences sociales (la sociologie, la psychologie, etc.), les SMA (avec des concepts bien élaborés comme : agent, coordination, etc.) et la simulation informatique (différents techniques comme : événement discret, automate cellulaire, etc.) [Davidsson, 2002]. La SMBA explore l'utilisation du concept d'agent pour la simulation informatique des phénomènes sociaux.

Parmi les cas mentionnés dans les travaux de [Macal and North, 2008] et de [Klügl, 2009], nous présentons ci-dessous une liste de quelques cas où la SMBA offre des avantages particuliers :

- le système simulé se compose d'agents autonomes ;
- les agents (ayant différentes capacités) se comportent de façon hétérogène ;
- l'agent a une composante spatiale (il occupe un espace) qui influence ses comportements et interactions ;
- les individus modélisés (les agents) adaptent leurs comportements selon les changements de l'environnement et selon les relations dynamiques avec les autres individus ;
- le nombre d'agents et le nombre d'interactions entre les agents est important ;
- il y a au moins deux niveaux d'observation (macro-micro).

La modélisation et la simulation des phénomènes sociaux comme le trafic routier entrent dans le cadre désigné par les six points cités ci-dessus. Le trafic routier se compose d'une population hétérogène de conducteurs autonomes qui ont différents objectifs et capacités. Les conducteurs se déplacent dans un environnement dynamique qui influence leur comportement et leurs interactions avec les autres conducteurs.

Cette approche se focalise au niveau microscopique et modélise les interactions des agents entre eux et avec l'environnement. Les sorties de ces interactions microscopiques s'agrègent et produisent les phénomènes macroscopiques [Michel, 2007]. Ces phénomènes macroscopiques sont généralement non-prévus et émergent au cours de la simulation. Dans le cas d'un phénomène émergeant indésirable, le concepteur applique la méthode d'*essai-erreur* afin d'y remédier [Klügl, 2009]. Dans la simulation de trafic, l'écoulement est un phénomène macroscopique. Or, les données disponibles sont généralement de niveau macroscopique. Si les débits des flux simulés sont erronés, le modèle proposé doit être corrigé.

Durant les années 2000, l'utilisation des SMA dans le contexte de la simulation de trafic s'est accrue, voir par exemple les travaux de [Ehlert and Rothkrantz, 2001, Paruchuri et al., 2002, Champion, 2003, El Hadouaj, 2004]. Dans ces travaux, un véhicule réel est représenté par un agent virtuel et autonome. La nécessité d'adopter cette approche se révèle avec la nature distribuée et complexe du trafic et avec le besoin croissant de réalisme au niveau des interactions entre conducteurs. Dans cette section, nous allons d'abord introduire les principes des SMA et ensuite interroger l'application de cette approche au domaine de la simulation de trafic.

Les SMA constituent un domaine de recherche issu de l'Intelligence Artificielle et plus précisément de l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD). Il y a quatre concepts clés en SMA : *Agent*, *Environnement*, *Interaction* et *Organisation* [Demazeau et al., 2000].

Un SMA est composé de plusieurs agents. Il est possible de trouver différentes définitions d'*agent* dans la littérature en SMA. Un agent est « *une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui, dans un univers multi-agent, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents* » selon [Ferber, 1995]. Dans une autre définition, l'agent est désigné comme « *un système informatique situé dans un environnement dans lequel il est capable d'exécuter des actions autonomes afin d'atteindre ses objectifs de conception* » dans [Wooldridge and Jennings, 1995]. Nous pouvons déduire de ces définitions quelques propriétés importantes de l'agent comme l'autonomie, le fait d'être situé, la réactivité, la proactivité [Chaib-Draa et al., 2001].

Un SMA inclut des agents agissant sur un *environnement*. L'environnement fait partie des sujets de recherche traditionnelles en IA. Dans [Russell and Norvig, 2003], les caractéristiques principales de l'environnement sont spécifiées : *accessibilité*, *déterminisme*, *séquentialité*, *dynamisme* et *continuité*. Pour illustrer cette explication, Russell et Norvig examinent la conception d'un conducteur automatique de taxi. L'environnement d'un tel conducteur est partiellement accessible, non-déterministe, séquentiel, dynamique et continu. Comme il a été clairement spécifié dans [Russell and Norvig, 2003], ce type d'environnement correspond au cas le plus difficile. Pour cette raison, parfois, il peut falloir apporter des simplifications.

L'environnement est peuplé par des agents qui sont en *interaction*. Leurs interactions se font sur le mode de la concurrence, de la coopération ou de la coexistence [Chaib-Draa et al., 2001, Ferber, 1995]. Lorsque les actions de l'agent s'opposent, ils sont en concurrence ; lorsque les actions des uns facilitent celles des autres, ils coopèrent ; en l'absence d'interférence, les agents co-existent. La communication par envoi des messages est un moyen d'établir l'interaction, si les agents ont la capacité de communiquer explicitement. Dans le cas des agents non-communicatifs (purement situés), l'interaction se fait par une communication indirecte (ou implicite).

Un contrôle des interactions par la coordination peut être important dans le cas de plusieurs agents ayant des objectifs différents (parfois corrélés, parfois contradictoires). La coordination peut s'effectuer de façon réactive en s'appuyant sur la boucle de perception/action dans un environnement évolutif rendant difficile l'anticipation de la suite des actions [Ferber, 1995]. Pourtant, l'agent peut avoir un processus conscient de coordination pour lequel il dispose d'une capacité distincte.

Un des moyens d'établir et réguler l'interaction est de former une structure, une *organisation* déterminant le partage des rôles dans une société d'agents. Dans le cas de la simulation de trafic, la coordination par règlement est souvent utilisée pour éliminer les conflits potentiels entre les véhicules [Ferber, 1995]. Les agents sont dotés de règles de comportement qui imposent les règles de priorité fondées sur le code de la route. La nature opportuniste (ou courtoise) du comportement des conducteurs rend cette approche insuffisante. En effet, ils peuvent choisir d'exécuter une action sans tenir compte des règles du code de la route [Champion, 2003].

Dans la suite de cette section, nous allons d'abord caractériser l'environnement et les agents dans le contexte de la modélisation et simulation de trafic, puis nous examinerons la modélisation agent du comportement du conducteur.

2.2.1.1 Environnement

L'environnement est un concept général et représente les éléments qui sont aux alentours de l'agent, y compris l'espace physique, l'espace d'interaction, un ensemble de ressources, etc. Dans le contexte de la simulation, l'environnement peut contenir les objets actifs ou passifs avec lesquels les agents peuvent interagir. Dans [Klügl et al., 2005], on trouve une distinction entre l'environnement simulé qui fait partie du modèle et l'environnement de la simulation qui est un logiciel ou un outil avec lequel la simulation est exécutée. Cette section concerne plus spécifiquement l'environnement simulé dans le but d'améliorer le modèle d'interaction dans la représentation de la perception humaine.

[Weyns et al., 2007] ont défini l'environnement comme une abstraction explicite dans l'architecture générale du SMA, ayant des responsabilités distinctes de celles de l'agent. Ils se basent sur une étude de la littérature en SMA pour décrire le rôle de l'environnement selon trois niveaux :

1. le niveau basique : à ce niveau, l'environnement est le contexte de déploiement. Tous les outils de déploiement (base de données, graphes, etc.) sont à ce niveau.
2. le niveau d'abstraction : ce niveau cache les détails de bas niveau du contexte de déploiement. Les agents n'ont pas d'accès direct à la base de données ou au graphe, mais ils peuvent y accéder par l'intermédiaire de ce niveau d'abstraction. Par conséquent, un changement de bas niveau (e.g. enlever un nœud du graphe ou une table de la base de données) a peu d'impact sur l'agent.
3. le niveau d'interaction-médiation : ce niveau considère l'environnement comme une entité active car il soutient et contrôle les interactions entre les agents (A) et l'environnement (E) avec les rôles suivants :
 - régulation d'accès à des ressources partagées (A-E). Par exemple, deux agents ne peuvent pas occuper le même espace dans l'environnement. L'environnement est localement observable par les agents. Cette capacité est typiquement limitée par le contexte courant (spatial, social).
 - médiation des interactions entre les agents (A-E-A). Les agents qui partagent le même environnement sont gouvernés par les mêmes règles. Les règles dans ce modèle sont imposées par l'environnement (e.g. les lois physiques). L'environnement contraint la perception en restreignant le domaine de perception de l'agent par exemple.

Les responsabilités d'interaction-médiation supportées par l'environnement facilitent la conception de l'agent, en prenant en charge certaines fonctionnalités à la place de l'agent. À noter que, dans la définition de [Weyns et al., 2007], l'agent ne fait pas partie de l'environnement. L'environnement existe comme une entité explicite avec ses propres dynamiques.

Les auteurs proposent ce modèle non seulement pour mieux définir les rôles de l'environnement mais aussi comme une approche de conception à destination des modélisateurs.

Dans [Ferreira et al., 2008], cette approche est explorée afin d'améliorer le rôle de l'environnement dans la modélisation et la simulation de trafic. Les auteurs se focalisent sur la communication implicite qui se réalise via la perception dans l'environnement physique. Toutes les entités font partie de leur environnement. Les capacités de percevoir et d'agir distinguent les agents des objets. En outre, l'environnement est aussi un ensemble de lois environnementales gouvernant des interactions entre les entités.

Dans leur modèle, Ferreira et al. caractérisent les objets en tant que *perceptibles* ou à *interaction possible* (ou ni l'un ni l'autre). L'agent, qui est conçue comme une sous-classe d'objet, hérite de ces caractéristiques et possède, par ailleurs deux capacités : la perception et l'action. L'environnement est divisé en petites zones qui sont sous la responsabilité de *médiateurs*. Un agent perçoit une entité par l'intermédiaire de ces médiateurs. Ces derniers retournent une réponse à l'agent en tenant compte des caractéristiques perceptibles de l'entité et des lois dans la zone. La non-perception d'un véhicule derrière un poids-lourd peut être modélisée grâce à ces lois.

2.2.1.2 Agent situé

Dans le cadre de la modélisation du trafic, les agents-conducteurs possèdent un positionnement dans leur environnement spatial, le comportement de déplacement est fortement lié à l'environnement. C'est pourquoi ce travail concerne plus particulièrement les agents situés.

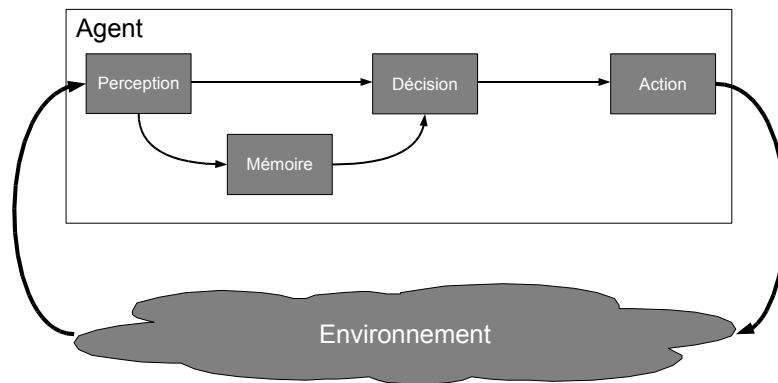


FIGURE 2.3 – Modèle Générique d'Agent Situé d'après [Weyns and Holvoet, 2004]

Les agents situés sont des agents plongés dans un environnement dans lequel ils sont capables de percevoir et d'agir. Le terme « situé » accentue la forte connexion de l'agent avec l'environnement dans lequel il agit et dont dépend le résultat de ses actions [Brooks, 1991, Ferber, 1995]. Dans les SMA situés, l'agent et l'environnement sont des parties complémentaires : d'une part, l'agent essaie de changer l'état actuel de l'environnement selon son état interne ; d'autre part, l'environnement est une source de données qui peut être invoquée par l'agent et fait évoluer son état actuel en fonction de l'effet des actions des agents et de sa propre dynamique.

Un modèle générique de l'agent situé est présenté dans [Weyns and Holvoet, 2004]. Il inclut quatre modules : Perception, Mémoire, Décision et Action (Fig. 2.3).

- La *perception* relie l'environnement à l'agent. L'objectif du module est d'informer l'agent de l'état de l'environnement. C'est une tâche plus importante dans un environnement dynamique et complexe. La sortie de ce module est un ensemble de percepts qui décrit l'état des entités dans l'environnement.
- La *mémoire* enregistre les informations afin d'apparier l'état interne de l'agent avec l'état de l'environnement. Ce module est important dans un modèle délibératif où l'agent compare les états de l'environnement afin d'anticiper son évolution et pour reconsidérer son intention ou modifier son plan si besoin.
- Le module de *décision* est le module de sélection d'action. L'entrée de ce module est l'ensemble des percepts et la connaissance actuelle de l'agent. Ainsi, l'agent délibère et sélectionne l'action appropriée.
- Le module d'*action* est celui qui accomplit l'action demandée par le module de décision grâce aux effecteurs. Suite à l'exécution de l'action, l'agent complète le cycle présent et en démarre un nouveau.

2.2.1.3 Architectures d'agent

Dans [Boissier, 2001], une classification des architectures d'agent est faite selon leur niveau de coordination : autonomes, interagissant, sociaux. Dans cette optique, les agents autonomes sont ceux qui ont une capacité de perception et d'action sur leur environnement (**A**gent-**E**nvironnement). Les agents interagissants étendent cette classe d'agent autonomes avec une propriété supplémentaire qui est la capacité d'interaction avec les autres agents (**A-E-I**nteraction). Si l'agent est purement situé, il interagit avec les autres grâce à sa capacité à percevoir l'environnement. Il collecte l'information des autres agents avec lesquels il partage le même environnement. Donc l'environnement a un rôle particulier comme médiateur de communication. À l'autre extrémité, dans le cas d'un agent interagissant purement communicatif, l'environnement perd son importance car l'agent n'agit pas sur ce dernier et le seul moyen d'établir l'interaction est par l'intermédiaire des messages envoyés. Enfin, les agents sociaux sont ceux qui ont la capacité de gérer leurs interactions dans une organisation (**A-E-I-O**rganisation).

Une autre classification est faite selon les différents types de raisonnement (réactif, délibératif, hybride). Les agents réactifs sont ceux qui couplent directement la perception avec l'action. Au contraire des agents délibératifs, les agents réactifs ne possèdent pas de représentation symbolique. Les agents délibératifs exécutent une délibération explicite pour choisir l'action adéquate afin d'atteindre un but (planification). Cette classification n'est cependant plus d'actualité car on trouve désormais dans la littérature des agents plus ou moins réactifs, plus ou moins délibératifs, rendant cette distinction non-pertinente.

Les architectures hybrides permettent de bénéficier des avantages des deux architectures précédemment présentées. Ils adoptent la capacité des agents réactifs à répondre aux stimuli et celle des agents délibératifs à déterminer des actions appropriées aux buts et aux plans. Certaines architectures à plusieurs niveaux, comme celles à base de tableau noir présentées dans [Ocelllo and Demazeau, 1994] ont des applications dans le cadre de la simulation de trafic.

Pour choisir une architecture appropriée, nous avons besoin d'un examen soigneux du modèle de conducteur visé. Pour cela, dans la section suivante, nous nous intéressons aux sciences cognitives (surtout aux modèles proposés par les psychologues) pour répondre à un certain nombre de questions dans le chapitre 3.

2.2.2 Modélisation de la conduite

2.2.2.1 La conduite, une activité multitâche

La conduite est une activité multitâche. Les sous-tâches composant cette activité requièrent différents niveaux de cognition et, pour cette raison, différentes temporalités. Tandis que le contrôle (ou l'orientation) de la trajectoire requiert juste quelques dixièmes de secondes, le changement d'itinéraire peut prendre des dizaines de minutes [Allen et al., 1971]. Le changement d'itinéraire nécessite de raisonner avec des symboles abstraits, un langage et une carte. Au contraire, l'orientation est une tâche basique et « sur-apprise ».

Selon le niveau de cognition, les sous-tâches de conduite sont regroupées en 3 niveaux : Stratégique, Tactique et Opérationnel [Allen et al., 1971]. Les sous-tâches stratégiques (respectivement opérationnelles) sont celles qui nécessitent un niveau élevé de cognition (resp. un faible niveau de cognition). Par ailleurs, les sous-tâches tactiques sont celles qui requièrent un niveau moyen de cognition et qui consistent à répondre aux différentes situations de trafic et d'itinéraire.

Les sous-tâches supérieures sont les combinaisons de sous-tâches inférieures. Par exemple, le changement de voie est la combinaison de l'orientation de la trajectoire et le contrôle de vitesse. En cas de besoin, une sous-tâche peut interrompre une sous-tâche supérieure mais pas inférieure.

Les sous-tâches tactiques peuvent être exécutées simultanément ou avec des intervalles de temps proches. Elles sont activées par l'identification de la situation. Par exemple, la sous-tâche de traversée de carrefour et la poursuite de véhicule peuvent être réalisées parallèlement en cas de présence d'un véhicule devant dans le carrefour.

En cas de présence d'une grande quantité d'information disponible, seule une partie de cette information peut être traitée à cause de la capacité limitée de conducteur. Ce fait mène parfois à la décomposition d'une décision compliquée en décisions plus simples [Allen et al., 1971]. Quand il y a une contrainte temporelle, cet effet est plus remarquable. L'exemple d'un conducteur à l'entrée d'un carrefour peut illustrer cette situation. Le conducteur qui tourne à gauche dans un carrefour en croix peut préférer traverser le carrefour en deux temps s'il trouve un point de stockage dans le carrefour. Au lieu de résoudre tous les conflits potentiels dès le début, il cherche d'abord un créneau jusqu'à la zone de stockage dans le carrefour. Ensuite, il cherche un deuxième créneau pour sortir du carrefour et arriver à sa voie de destination.

L'expérience est également une composante importante du modèle de conducteur. C'est avec l'expérience que le conducteur crée une représentation complète de la situation qui le mène vers des attentes précises. Celles-ci facilitent l'évaluation de la situation et la décomposition d'une décision, par exemple.

« Du fait du nombre réduit de paramètres le caractérisant, le comportement de conduite sur autoroute ou sur voies rapides impliquant une circulation en sens unique est le modèle

le plus décrit et le plus simulé, même si ce n'est pas le plus accidentogène. » [Donikian, 2004] Par ailleurs, il y a aussi des modèles de risque qui modélisent les comportements des conducteurs dans lesquels les conducteurs essaient de tenir la valeur de risque sous une certaine limite. Par exemple, [Van Der Molen and Botticher, 1988] proposent un modèle de risque analogue au modèle d'Allen concernant les trois niveaux d'activité dont chacun possède son module de perception. Les niveaux stratégique et tactique peuvent être vus comme deux agents ayant chacun un module de motivation, un module d'attente, un module de délibération et un module de décision. Le niveau stratégique donne au niveau tactique un plan. Au niveau tactique, en tenant compte des risques du plan stratégique et de sa perception, une tâche est sélectionnée pour être exécutée (dans leur application, le dépassement d'un camion) et une manœuvre est décidée (changement de la position ou de la vitesse). Le niveau opérationnel est chargé d'exécuter la manœuvre sauf si à ce niveau, un cas urgent est perçu (une menace apparue soudain) qui empêche cette exécution.

Ce modèle a été appliqué, par exemple, à la conduite sur une route à double sens pour simuler la décision de dépassement d'un camion. La décision est basée sur l'utilité attendue subjective (SEU) dont la quantification n'est pas évidente s'il s'agit de modéliser les autres comportements d'un conducteur comme la traversée de carrefour.

2.2.2.2 Modèle cognitif de conducteur

Dans la plupart des architectures en psychologie cognitive, l'activité des conducteurs est décrite avec le cycle perception-décision-action [Allen et al., 1971]. La perception est la capacité d'acquérir et de traiter l'information : le conducteur prend l'information à partir de l'environnement et utilise cette information pour la mise à jour de sa représentation de la situation actuelle et pour la prise de décision [Endsley, 1995]. Ces décisions pilotent les activités motrices (contrôle de vitesse, pilotage), en fonction de la capacité des effecteurs dans le contexte physique.

Dans un modèle simplifié de l'activité de conduite, nous considérons que le conducteur automobile est impliqué dans 7 tâches : Contrôle de l'Itinéraire, Identification de la Règlementsation, Traversée de Carrefour, Changement de Voie, Poursuite, Détection de Danger et Contrôle de Trajectoire

- Nous réduisons ici le niveau stratégique de la conduite [Allen et al., 1971] au Contrôle de l'Itinéraire (**CI**), qui utilise l'information des panneaux.
- La sous-tâche d'Identification de la Règlementsation (**IR**) consiste à prendre l'information sur les règles de trafic (e.g. la limitation de vitesse, les feux tricolores).
- La sous-tâche de Traversée de Carrefour (**TC**) a besoin de l'information visuelle des voies entrantes au carrefour afin de contrôler la vitesse et d'empêcher un accident potentiel.
- Quand le conducteur décide de changer de voie, la sous-tâche de Changement de Voie (**CV**) cherche directement ou par l'intermédiaire des rétroviseurs l'information utile au dépassement.
- La Poursuite (**P**) consiste à atteindre une vitesse stable en fonction des dynamiques externes (de trafic) et internes (de conducteur). Elle nécessite les informations sur le(s) véhicule(s) devant le conducteur [Brackstone and McDonald, 1999].
- Les informations nécessaires à la Détection de Danger (**DD**) sont localisées sur la

route et les trottoirs. Il s'agit d'être conscient des véhicules ou des différents obstacles possibles, et des piétons selon l'environnement (e.g. urbain ou autoroute).

- Le Contrôle de Trajectoire (**CT**) inclut la capacité de rester dans la voie. C'est la sous-tâche de plus bas niveau du modèle qui est « sur-apprise » et peut être exécutée sans attention consciente sauf dans les situations d'urgence. Cette tâche requiert des informations sur la surface de la route pour la détection de la courbure de la route et la déviation du véhicule de la trajectoire actuelle [Donges, 1978].

Sous-tâches	Allen
Contrôle de l'Itinéraire (CI)	S
Identification de Règlements (IR)	T
Traversée de Carrefour (TC)	T
Changement de Voie (CV)	T
Poursuite (P)	T
Détection de Danger (DD)	O
Contrôle de Trajectoire (CT)	O

TABLE 2.2 – Les sous-tâches de conduite et les niveaux hiérarchiques : Opérationnel (O), Tactique (T) et Stratégique (S).

Le modèle recherché devra être cohérent avec la décomposition hiérarchique de la tâche de conduite en trois niveaux : stratégique, tactique et opérationnel [Allen et al., 1971] (voir la section 2.2.2.1). Le niveau opérationnel inclut les cycles sensori-moteurs pour le contrôle de la trajectoire.

Le niveau tactique peut être vu comme un ensemble de décisions conscientes qu'un conducteur doit prendre pendant la conduite : accélérer/freiner en carrefour, dépasser un véhicule, changer de voie, arrêter la voiture en situation de danger etc. Le tableau 2.2 résume les caractéristiques essentielles des sous-tâches retenues selon le modèle d'Allen.

Par conséquent, un modèle d'agent situé multitâche peut correspondre à notre besoin. Les modèles d'agent-conducteur convergent vers un tryptique perception-décision-action. En section 2.3, nous allons d'abord présenter les travaux en SMA sur la décision et l'action. Ensuite, nous verrons la perception en détails en section 2.4.

2.3 Décision et Action en SMA

La connaissance actuelle sur la conduite nous a mené vers une décomposition en plusieurs sous-tâches. Chaque sous-tâche sera activée grâce aux paramètres ou fonctions internes de l'agent. Pour chaque sous-tâche, il y a un modèle de décision spécifique. Chaque tâche nécessite différentes informations. Ces connaissances nous ont mené vers la recherche d'un modèle de décision qui permette de modéliser le comportement des conducteurs.

2.3.1 Décision

La représentation des connaissances est un sujet important en IA depuis les années 1970. Par contre, la simulation de la représentation interne au cours d'une tâche humaine

complexe comme la conduite reste toujours ardue malgré les progrès dans ce domaine.

Une architecture d'agent été proposée par Brooks pour résoudre ce problème. Sa proposition pour créer un agent intelligent consiste à décomposer l'architecture en éléments autonomes. Les éléments correspondent aux différents comportements de l'agent. Ces comportements interagissants génèrent le comportement global de l'agent.

Dans son article [Brooks, 1991], il critique l'approche de l'époque. Ses critiques se concentrent sur l'ignorance des aspects perceptifs-moteurs des agents intelligents qui réduit les recherches sur la modélisation de la décision à une représentation abstraite de l'environnement. En ne considérant que les détails pertinents, la représentation s'éloigne de la réalité.

L'architecture qu'il propose est appliquée à la création de robots intelligents. Un comportement (activité, *skill*) est un patron d'interaction avec l'environnement. Les comportements de l'agent sont exécutés parallèlement dans une structure composée de plusieurs couches. Les comportements ont différents besoins de perception et peuvent produire différentes actions. L'activité de la couche supérieure peut supprimer l'entrée de la couche inférieure et l'activité de la couche inférieure peut inhiber la sortie de la couche supérieure. Il défend la faisabilité d'une intelligence sans représentation explicite.

Un ensemble d'autres travaux se fondent également sur une décomposition en modules ayant une certaine indépendance les uns des autres et présentant une forme d'autonomie décisionnelle.

L'architecture de subsomption est décrite comme étant un ensemble de petits agents réactifs dans [Drogoul and Ferber, 1992]. A cause de la complexité des connections inter-couches, cette approche peut facilement atteindre ses limites. Une autre architecture réactive (sans représentation interne) est l'architecture MANTA [Drogoul and Ferber, 1992]. Dans cette architecture également, le comportement d'agent est un ensemble de tâches. Chaque tâche a un poids (une importance relative selon l'état interne de l'agent), un seuil et un niveau d'activation (calculé quand la tâche passe de l'état inactif à l'état actif). A chaque pas de temps, l'agent perçoit l'environnement (collecte les stimuli), calcule le niveau d'activation de chaque tâche et s'il est supérieur au seuil, cette tâche est exécutée. Grâce au « Behavior Reinforcement », cette architecture prend en compte les expériences passés en modifiant le poids de la tâche. Cela rend les tâches les plus fréquemment exécutées par un agent, les plus favorables à une activation la fois suivante.

Un modèle décomposé en « sous-agents » a été proposé par Donikian et Arnaldi [Donikian and Arnaldi, 1994] pour simuler le déplacement d'un agent, illustré sur une simulation de conduite. Dans ce modèle, la décision est décomposée en plusieurs automates dont chaque état est un agent expert qui propose une action. Ces agents sont activés par un autre agent superviseur. Dans cette architecture hiérarchique, le superviseur agrège les actions proposées par tous les agents experts et décide de l'action finale. De même, dans [Hanon et al., 2006], les auteurs proposent un modèle de navigation à base de comportements pour peupler un monde virtuel de piétons autonomes. Partant du constat de Minsky qui dit que l'esprit humain est un assemblage de nombreuses entités simples dont les interactions font émerger des comportements complexes, ils se sont intéressés à des approches orientées « comportements ».

[Hanon et al., 2006] donne un panorama des travaux existants sur la sélection d'action à base de comportements en deux grandes familles selon la classification proposée par

Pirjanian [Pirjanian, 1999] : l'arbitrage et la fusion de commandes. Tandis que les méthodes d'arbitrage sélectionnent un ou plusieurs comportements en prenant le contrôle de l'agent, la fusion choisit une action en prenant en compte les différentes propositions. Les auteurs mettent l'accent sur l'approche par vote de préférence distribué dont les origines proviennent de la simulation de trafic routier [Sukthankar et al., 1998].

Ce principe de décomposition en plusieurs comportements de plus bas niveau qui s'exécutent en parallèle correspond bien à la décomposition en sous-tâches présentées en section 2.2.2.2. Toutefois, comme la décision n'est pas notre sujet principal d'étude, nous opterons pour une simplification au niveau des sous-tâches activées et du mécanisme de sélection d'action. De plus, pour modéliser le comportement de traversée de carrefour, nous reprendrons le mécanisme de coordination multi-agent fondé sur la théorie des jeux développé par Champion [Champion, 2003] et repris par Doniec [Doniec, 2006]. Ce modèle est à l'intersection des SMA et du domaine de la simulation de trafic, il sera examiné en détail au chapitre 4.

2.3.2 Action

La théorie de l'influence et de la réaction [Ferber and Müller, 1996] nous permet de décrire la nature de l'action et de l'interaction dans un système multi-agent situé. Dans un tel SMA, les agents agissants sont plongés dans un environnement. Avant cette théorie, l'action était généralement traitée avec l'événement issu de celle-ci, ce qui n'est pas appropriée pour un système multi-agent où les agents agissent et interagissent simultanément et dans lequel l'événement est le résultat de toutes ces actions et interactions.

En effet, il y a une différence entre ce que l'agent veut faire et ce qui est réalisé. Cette théorie souligne cette différence en définissant deux concepts : les influences et les réactions. L'influence est ce qui vient de l'intérieur de l'agent et la réification d'une intention de modifier l'écoulement des événements ou de soutenir cet écoulement. La réaction est la somme des influences des agents en considération de l'état actuel de l'environnement et des lois physiques. Un changement de l'état de l'environnement provient des influences des agents et des réactions à ces influences selon les lois environnementales. Donc l'environnement a un rôle particulier dans cette approche. Par exemple, si un conducteur essaye d'arrêter sa voiture avec un taux de freinage fort, la voiture glisse dans le cadre des lois physiques. L'influence consiste à arrêter la voiture avec telle décélération, la réaction est le glissement.

Dans la suite de ce travail, nous nous plaçons dans le contexte d'agents qui ne raisonnent pas sur l'adéquation entre l'effet attendu et le résultat effectif de leurs actions. Nous prendrons l'hypothèse d'agents qui perçoivent leur environnement à chaque pas de la simulation, sans raisonner ou apprendre relativement au résultat de leurs actions.

2.4 Un intérêt particulier pour la perception

La perception est au cœur de la thèse à cause de son rôle majeur dans les interactions entre conducteurs. Malgré son rôle important, la perception a été peu étudiée dans le contexte de la simulation de trafic où les conducteurs simulés sont omniscients (capables

de percevoir tous les éléments dans l'environnement). Pourtant, la perception constitue un des sujets des recherches en cognition humaine et elle est traitée aussi en SMA.

Donc dans cette section, nous allons d'abord encadrer notre sujet du point de vue des recherches en sciences cognitives dans le contexte de conduite. Puis, nous allons exposer les modèles de perception en SMA qui nous ont permis d'étudier différents aspects de la perception.

2.4.1 Perception visuelle en Psychologie

A partir de l'ancienne culture grecque, les philosophes se sont intéressés à la perception. Avec l'évolution de la science, notamment, la psychologie a approfondi la recherche sur ce sujet.

Au 20ème siècle, le psychologue américain Gibson a proposé la théorie écologique de perception [Gibson, 1979]. Il définit le concept d'« affordance » qui signifie le fait pour un objet particulier d'offrir l'opportunité d'agir et le fait pour l'environnement d'offrir l'opportunité de s'adapter. Par exemple, une chaise *afforde* l'action de s'asseoir selon les capacités d'action de celui qui perçoit (e.g. un bébé ne peut pas s'asseoir sur un tabouret). Initialement, cette approche associant une action et un objet est basée sur la perception directe de l'environnement et n'inclut pas l'interprétation mentale par l'attitude cognitive de celui qui perçoit. Donc, cette approche peut être considérée comme un approche ascendante de l'environnement vers l'homme.

En contrepartie, la théorie constructiviste (indirecte) de la perception a été défendue par Richard Gregory [Gregory, 1997]. Auparavant, Hermann von Helmholtz (1821 - 1894) est la première personne qui a introduit que la perception visuelle est une inférence inconsciente. Selon von Helmholtz, la perception humaine est indirectement liée aux objets. Elle est inférée à partir des données fragmentaires, souvent difficilement pertinentes et signalées par les yeux. Donc dans cette théorie, la perception visuelle nécessite l'inférence à partir des connaissances du monde pour donner un sens aux signaux sensoriels, à l'encontre de la théorie écologique de Gibson qui explique le fonctionnement de la perception visuelle comme directe à partir des informations disponibles et qui, au lieu de la connaissance et de l'inférence, parle d'« affordances » donnant la signification des objets aux patrons de stimulations sans recours à la connaissance mémorisée ou aux processus intelligents [Gregory, 1997]. Selon Gregory, l'approche écologique a des difficultés à apporter une explication satisfaisante aux illusions visuelles et à la perception d'un objet nouveau (e.g. les tablettes numériques).

Pour les constructivistes la connaissance est nécessaire pour la vision car l'image de la rétine est ambiguë (par exemple pour la taille, la forme et la distance des objets) et plusieurs propriétés cruciales pour le comportement ne peuvent pas être captées par les yeux comme le poids, la chaleur, etc. Selon von Helmholtz, les ambiguïtés sont résolues et les propriétés non-visuelles des objets peuvent être inférées avec la connaissance issue d'une inférence inconsciente à partir de ce qui a été capté et de la connaissance des objets.

Dans une autre recherche, [Gregory, 1980] décrit la perception comme un mécanisme de production d'hypothèses. Le fonctionnement de ce mécanisme est expliqué en faisant l'analogie avec la science. Parfois, notre cerveau peut créer deux hypothèses contradictoires

comme dans le cas de cube de Necker (voir Figure 2.4).

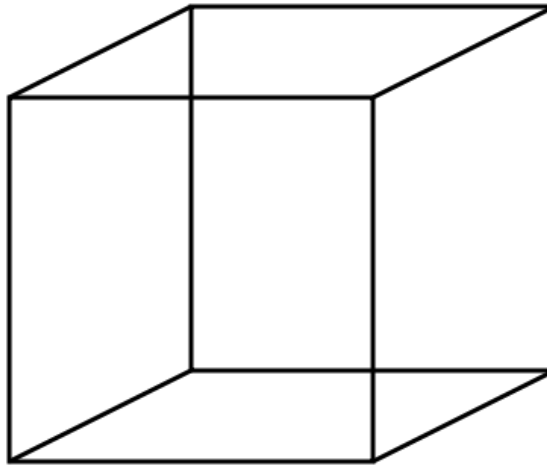


FIGURE 2.4 – Deux interprétations distinctes de la même image sont possibles.

Par ailleurs, la psychologie cognitive représentant le courant actuellement dominant de cette évolution de la recherche met en évidence une autre approche de la perception en faisant une synthèse partielle des approches précédentes. Une partie des travaux existants dans le domaine de la psychologie cognitive sera présentée en section suivante.

2.4.2 Perception en Psychologie Cognitive

La psychologie cognitive traite des processus mentaux qui ont un rapport avec l'activité de connaissance (activité cognitive) : son acquisition, son stockage, sa transformation et son utilisation [Gaonac'h, 2006]. La perception constitue la première étape dans le traitement de l'information consistant à élaborer la signification à attribuer aux sensations, qui repose sur la réalisation d'un ensemble d'opérations effectuées à partir des signaux en provenance des différentes modalités sensorielles [Godefroid, 2008]. La perception peut être découpée en trois étapes : l'étape sensorielle, l'étape de structuration et l'étape du traitement cognitif. Les deux premières étapes correspondent aux analyses des caractéristiques des signaux générés par les capteurs (les yeux dans le cas de la perception visuelle) et à la structuration des signaux se rapportant à un même matériel. L'étape du traitement cognitif est celle au cours de laquelle les informations qui viennent d'être structurées sont traitées et interprétées dans la mémoire de travail. Dans la thèse, l'approche adoptée est celle de la psychologie cognitive [Godefroid, 2008].

En psychologie cognitive, les être humains ont une capacité limitée de traitement d'information, ils peuvent traiter une petite partie de ce qui existe dans le domaine de perception. Grâce à l'orientation de l'attention, un sous-ensemble du domaine de la perception est sélectionné. Donc, selon ce point de vue, deux questions importantes sont à examiner : « Qu'est-ce qui détermine ce à quoi on porte attention ? » et « Qu'est-ce qui se passe dans le cerveau quand on fait attention à quelque chose ? ».

Les processus de traitement de l'information peuvent être exécutés en parallèle ou en série. Quand la recherche réalisée est liée à une propriété d'objet (e.g. la couleur), le sujet peut trouver l'objet correspondant au critère avec un traitement parallèle (ou préattentif). Par exemple, quand on demande à un sujet de trouver un item rouge parmi des items verts, il pourra, tout de suite, le trouver et la taille de l'ensemble des items verts ne modifie pas la durée de cette recherche grâce à l'effet « pop-out » de l'item rouge. Toutefois, généralement, la recherche ne dépend pas d'une seule propriété et requiert l'intégration de plusieurs propriétés [Treisman and Gelade, 1980]. Le goulot d'étranglement de l'attention (c.à.d. la capacité de la perception) est dû à ce traitement en série.

Le déploiement de l'attention visuelle est expliqué par le paradigme de recherche visuelle. Selon ce paradigme, dans le monde réel, les sujets cherchent les entités cibles dans un ensemble de distracteurs. Wolfe [Wolfe, 1994] propose un modèle de recherche guidé. D'après ce modèle, la recherche d'une cible est le résultat de deux processus essentiels : bottom-up et top-down. Le processus bottom-up est orienté donnée ou stimulus, une entité attire l'attention selon ses propriétés comme la luminance, la couleur, l'orientation, la vitesse, la direction, etc. Le processus top-down est orienté but ou objectif, le sujet prête attention à un sous-ensemble d'entités liées à son but actif.

Le théorie du cycle perceptif de Neisser [Neisser, 1976] combine les deux processus. Les humains créent successivement les schémas basés sur ce qui a été perçu de l'environnement pour accomplir leur tâche active. Ce schéma spécifie les focus d'attention et dirige l'exploration de l'environnement pour mettre à jour les informations actuelles. L'exploration échantillonne l'environnement, prend les informations disponibles et finalement, les nouveaux échantillons modifient les schémas le cas échéant. Le cycle continue ainsi de suite.

Par ailleurs, la mémoire et l'attention sont en forte relation et la limite de mémoire restreint le nombre des objets auxquels il est possible de faire attention [Cowan, 2001, Marois and Ivanoff, 2005]. Dans ce qui suit, on présente les différents types de mémoire traités en psychologie cognitive. Toutefois, dans la suite de notre travail, nous ne cherchons pas à modéliser la mémoire, si ce n'est par la capacité de la mémoire de travail.

Dans la littérature, les recherches en psychologie cognitive distinguent différents types de mémoire. La figure 2.5 va nous permettre d'expliquer grossièrement les relations entre la perception, l'attention et les différents types de mémoire. La mémoire sensorielle réalise l'acquisition parallèle des données brutes, l'attention sélectionne les informations qui seront représentées dans la mémoire à court terme stockant les données plus longtemps par rapport à la mémoire sensorielle, ces données étant traitées par les étapes suivantes de la cognition. La mémoire à long terme peut être vue comme une bibliothèque des expériences passées qui sont encodées et récupérées en cas de besoin. Par ailleurs, il y a aussi la mémoire de travail qui contient une représentation mentale instanciée par les schémas qui se trouvent dans la mémoire à long terme et les données existant dans la mémoire à court terme.

Dans la suite, les ressources cognitives limitées et les processus d'attention seront définis avec l'objectif d'ajouter ces notions, sous une forme implémentable, au modèle de conducteur.

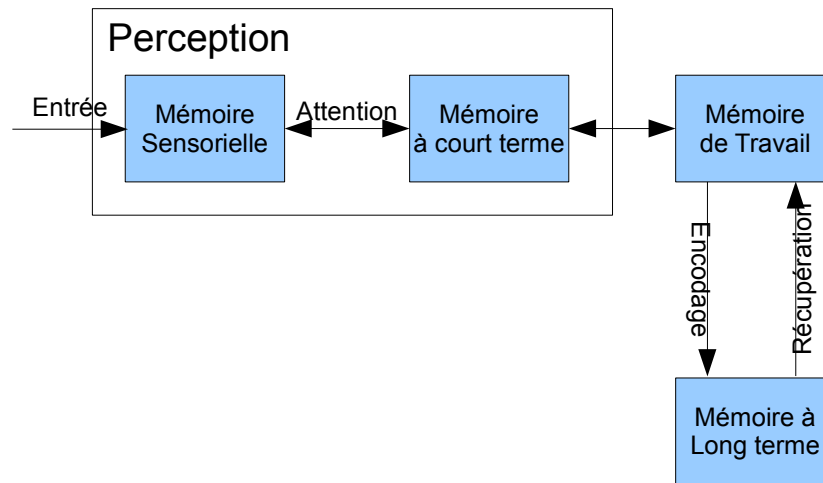


FIGURE 2.5 – La perception, la mémoire et l’attention.

2.4.2.1 Ressources cognitives limitées

La description usuelle du conducteur avec une perception illimitée est inapproprié au vu de la connaissance actuelle démontrant que l’être humain a une capacité limitée de perception [Miller, 1956, Sperling, 1960, Cowan, 2001, Marois and Ivanoff, 2005]. [Marois and Ivanoff, 2005] présente les limitations majeures des traitements d’information visuelle durant le flux à partir de l’acquisition jusqu’à l’action. Une de ces limitations survient avec le nombre limité des stimulus qui peuvent être retenus dans la mémoire à court terme.

Bien qu’il n’y ait pas de limite concernant les processus automatiques exécutés parallèlement, l’humain est limité sur la quantité de données auxquelles il peut faire attention [Schneider and Shiffrin, 1977]. Cette capacité de la mémoire à court terme est estimée de l’ordre de 7 [Miller, 1956] ou 4 [Cowan, 2001] informations, et influence ainsi le nombre d’objets traités dans la mémoire de travail. Si l’intention actuelle nécessite une quantité importante de données, des éléments perceptifs doivent être sélectionnés (le mot « percept » est adopté pour décrire un élément perceptif). Le processus de sélection des percepts est donc un processus avec ressources limitées. Par ailleurs, l’attention et la mémoire à court terme sont en relation proche. Elles partagent cette même limite de « monitoring » [Marois and Ivanoff, 2005]. Par exemple, la capacité de poursuite des cibles en mouvement aléatoire parmi des distracteurs est limitée par un nombre fini de cibles.

2.4.2.2 Processus d’attention

Il y a deux modalités importants de l’attention humaine : bottom-up et top-down. Le traitement bottom-up de l’information visuelle est conduit par les propriétés d’un stimulus : les données saillantes attirent l’attention [Itti and Koch, 2001]. Quand on demande à un sujet de trouver une cible avec une orientation ou une couleur particulière (e.g. un bâton horizontal) parmi un nombre d’objets (e.g. des bâtons verticaux), cette cible attire

l'attention du sujet rapidement et indépendamment du nombre d'objets présents [Baluch and Itti, 2011].

De ce point de vue, [Itti and Koch, 2001] propose un modèle informatique de la « carte de saillance » fondé sur le contraste des propriétés de luminosité, de couleur et d'orientation pour expliquer les fixations de regard du sujet. La carte de saillance se construit par la combinaison de ces propriétés. L'attention est orientée vers les positions où la valeur de saillance est élevée. Lorsque l'être humain effectue une recherche par rapport aux propriétés visuelles de bas niveau (e.g. couleur, orientation), ce modèle est capable d'expliquer la fixation de regard, donc l'attention visuelle de l'individu. Par contre, les individus peuvent avoir des objectifs différents, plus ou moins complexes qui poussent à interpréter et voir différemment l'image présentée.

L'autre modalité de l'attention, le traitement top-down de l'information visuelle est dirigé par l'objectif : les humains mobilisent leur attention sur quelques éléments dans l'environnement afin d'atteindre les buts imposés par leurs tâches [Baluch and Itti, 2011, Tatler et al., 2011]. Par conséquent, l'information est déterminée selon sa pertinence par rapport à l'objectif à atteindre.

Toutefois, l'objectif et la situation dans laquelle l'être humain se trouve, spécifient ses focus d'attention top-down qui est un sous-ensemble de l'environnement perçu, et qui contient potentiellement les informations pertinentes. Les focus sont issus des associations apprises entre les types des scènes et les zones spatiales qui ont été regardés quand la même tâche a été engagée dans la même situation (un conducteur regarde à droite si la route tourne à droite) [Baluch and Itti, 2011]. Les focus des différents individus pour la même tâche sont généralement les mêmes [Tatler et al., 2011]. Par exemple, dans un environnement virtuel de conduite, Shinoda et al. [Shinoda et al., 2001] demandent aux participants de détecter le panneau de stop pendant la conduite dans un milieu urbain. Dans ces expériences, les conducteurs ont plus tendance à détecter un panneau de stop (qui apparaît pendant un certain intervalle de temps et après disparaît) à proximité des carrefours (45%) par rapport en section courante (6%). Pour les conducteurs, un panneau de stop à proximité des carrefours est plus probable qu'au milieu de la route. Ce résultat montre que les conducteurs ont appris que les panneaux de stop se trouvent probablement autour du carrefour et donc, ils concentrent leurs regards vers ces régions de l'environnement [Tatler et al., 2011].

Une autre discussion concernant l'attention visuelle est présentée dans [Bosse et al., 2009]. Tandis qu'une approche définit l'attention visuelle comme une distribution sur les zones de l'environnement, une deuxième la définit comme un partage sur les objets. Ces objets ont plusieurs propriétés comme la forme, la vitesse, la couleur. La localisation ou l'emplacement d'un objet est une propriété particulière parmi les autres. Une troisième approche définit l'attention visuelle comme la combinaison de deux autres. L'attention orientée environnement mobilise l'attention sur une zone d'environnement où l'on s'attend à un événement et l'attention orientée objet prépare à quelque chose qui viendra sur les objets déjà visibles. Donc l'attention est orientée par l'environnement et les objets dans la zone de perception. Cette approche est cohérente dans le contexte du trafic. Les conducteurs mobilisent leur attention sur une zone d'environnement pour un type d'information attendue quand il s'agit du processus top-down. Par contre, les attentes peuvent être erronées et dans ce cas, le mécanisme bottom-up peut faire prendre conscience

aux conducteurs des événements ou informations non-anticipées.

L'environnement routier présente une multiplicité d'information visuellement accessible mais les conducteurs ne peuvent faire attention qu'à une petite partie des informations disponibles [Hugues and Cole, 1986]. Dans le contexte de la conduite, Hugues et Cole ont décrit deux processus de l'attention visuelle : la conspécuité d'attention est bottom-up, conduite par les stimuli (la saillance), tandis que la conspécuité de recherche est top-down et conduite par la tâche (la pertinence).

La plupart des auteurs considèrent que l'activité de conduite est dominée par les processus top-down d'attention [Shinoda et al., 2001, Martens and Fox, 2007]. Ce phénomène est plus visible quand un événement demande une décision qui requiert des informations pour sa résolution [Hugues and Cole, 1986]. Dans ces situations, les conducteurs cherchent spécifiquement les informations nécessaires avec une stratégie de recherche qui est conduit vers les zones de l'environnement contenant probablement ces informations.

La perception apparaît comme un équilibre entre ces deux processus de prise d'information. Une information top-down peut empêcher l'acquisition d'une donnée saillante, bottom-up (se concentrer sur des piétons peut empêcher de voir un cycliste très saillant). Inversement, une information saillante peut créer le même effet sur une information pertinente top-down et peut empêcher l'acquisition de cette dernière (regarder un accident de l'autre côté de la route et ne pas voir le véhicule devant soi).

2.4.2.3 Perception, sous-tâches et performance

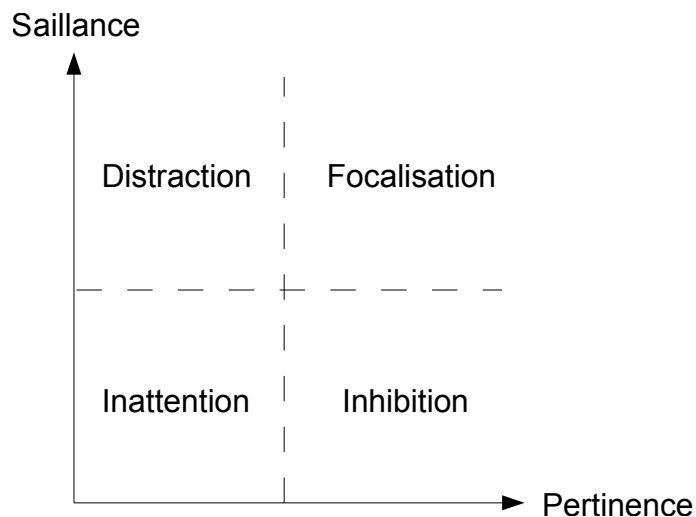


FIGURE 2.6 – L'état de l'individu par rapport au type d'informations acquises.

Dans les modèles cognitifs, selon le niveau de saillance et de pertinence de l'information acquise, l'état du sujet peut être décrit selon quatre types [Gaonac'h, 2006] (voir Figure 2.6) :

- *La focalisation* : Si l'information est saillante et pertinente, le sujet est focalisé entièrement sur son activité. Cela maximise la performance du sujet pour la réalisation de la tâche.
- *L'inhibition* : Si l'information est pertinente mais pas assez saillante, il doit d'abord inhiber toutes les informations plus saillantes mais non pertinentes. Dans ce cas la performance du sujet est plus lente.
- *La distraction* : Si l'information est saillante mais non-pertinente, elle capture involontairement l'attention du sujet. Le sujet ne peut pas contrôler l'orientation involontaire de l'attention sur l'objet. Il peut commettre des erreurs transitoires.
- *L'inattention* : Si l'information est non-saillante et non-pertinente par rapport à l'activité en cours, cet état peut conduire à des erreurs importantes et durables. Ces informations sont traitées de façon involontaire comme dans les cas où le sujet est inattentif et absorbé par ses pensées. Seul un signal très saillant, un message d'erreur peut mettre fin à cet état.

Nous voulons proposer un modèle de perception qui peut inclure tous les états du conducteur dans une situation normale de conduite automobile. Cependant, l'inattention n'est pas modélisée à ce stade de nos travaux.

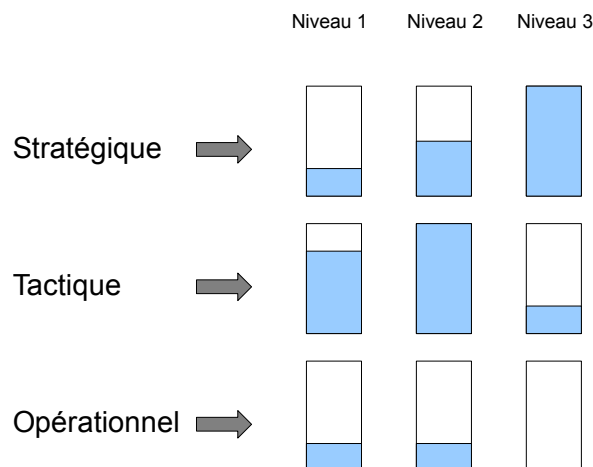


FIGURE 2.7 – Relation entre les niveaux de la conscience de la situation et les différents modes de conduite selon [Matthews et al., 2001]. Niveau 1 : perception, Niveau 2 : compréhension, Niveau 3 : anticipation.

Matthews et al. présentent leur travail [Matthews et al., 2001] de couplage de la théorie de la conscience de la situation en psychologie cognitive, énoncée par Endsley [Endsley, 1995], et composée de trois niveaux *perception des éléments dans la situation actuelle, compréhension de la situation actuelle, projection de la situation dans le futur* avec les sous-tâches à 3 niveaux (Stratégique-Tactique-Opérationnel) de la conduite pour évaluer la capacité des outils d'aide à la conduite et proposer des améliorations possibles sur ces outils.

La sous-tâche stratégique (le contrôle d'itinéraire) sert à décider le point de destination et quelques points spécifiques intermédiaires. Dans les tâches de ce niveau, tandis que les

processus de perception jouent en général un rôle limité (contrôle de l'itinéraire), les processus de compréhension et surtout de projection sont inclus pour évaluer la situation, prévoir les embouteillages futurs et évaluer les alternatives.

Les sous-tâches tactiques comportent des objectifs court-termes (e.g. traversée de carrefour, changement de vitesse). Ces sous-tâches requièrent une bonne perception des indices importantes et une bonne compréhension de la situation. D'un autre côté, une petite part des ressources est consacrée à la projection des événements sur un intervalle de temps court dont l'objectif est de prévoir les danger potentiels à court-terme.

Au niveau opérationnel, les sous-tâches sont les routines de la conduite (e.g. le contrôle de la trajectoire) qui ne requièrent pas une capacité élevée ni pour la perception ni pour la compréhension ni pour la prédiction car tous s'exécutent (en général) automatiquement. La perception pour une sous-tâche de ce niveau assure juste que ces tâches fonctionnent adéquatement. En outre, dans le cas où les processus automatiques envoient un message d'erreur (e.g. un pneu crevé), les processus de compréhension sont activés.

Ce travail de [Matthews et al., 2001] nous donne l'occasion de focaliser notre attention sur les sous-tâches où la perception a un rôle majeur : les sous-tâches du niveau tactique.

2.4.3 Perception en SMA

Alors que le processus décisionnel a fait l'objet de nombreux travaux, la perception (et aussi le « sensing ») a été relativement peu étudiée dans le cadre des SMA. Et pourtant la perception dans le contexte des agents situés à ressource limitée avait été abordée dès les premiers travaux traitant des agents autonomes.

2.4.3.1 Perception par des agents à ressource limitée

Le travail de [Chrisman and Simmons, 1991] modélise la perception quand les ressources physiques limitées (e.g. le processeur de vision) ne permettent pas à un agent situé (e.g. un robot) de traiter tous les aspects de l'environnement, ou quand une perception totale de l'environnement est impossible à cause des contraintes imposées par l'environnement (e.g. un mur non transparent).

L'agent doit décider *que percevoir* et *quand percevoir* pour effectuer son plan. Comme toutes les autres opérations, la perception requiert une ou des ressources. Dans cette approche, la perception possède un coût et intervient dans le processus de planification et la sélection d'action : si elle réduit le coût d'action, elle est réalisée. Pour rendre informatiquement faisable leur approche, les auteurs proposent l'utilisation d'une politique statique de perception arborescente qui détermine la séquence de perception et d'action pour une tâche donnée.⁶

Le travail de [Kinny et al., 1992] aborde des questions théoriques et pratiques à propos du contrôle optimal de raisonnement des agents situés avec des ressources computationnelles limitées. La recherche met le focus sur la détection des changements importants

6. Si, pour une tâche ou une sous-tâche donnée, un agent choisit toujours le même processus de perception pour la partie *perception* du cycle *perception-action*, on dit que cet agent utilise une politique statique de perception.

dans l'environnement qui rendent invalides les décisions précédentes. Dans le cas de changements importants, l'agent doit remettre en cause son plan, ce qui est une tâche coûteuse. D'autre part, la capture des informations (le « sensing ») est aussi une tâche qui crée une charge supplémentaire si elle se répète avec une fréquence haute. Avec une politique statique de perception ayant une période uniforme, ils proposent un compromis entre le coût et la pertinence de perception en attribuant un coût à chaque perception.

Dans leurs expériences, le coût de perception a été modélisé par un coût temporaire qui retarde le mouvement de l'agent. Avec différentes valeurs de paramètres (la fréquence de perception, le coût temporaire de perception, la vitesse de changement de l'environnement), le compromis consiste à trouver la fréquence optimale de rafraîchissement des percepts qui maximise la moyenne du nombre de tâches réalisées (le rendement de l'agent).

Dans le cas où la perception a un coût, leurs résultats empiriques donnent :

- Plus la perception est coûteuse, moins l'agent est rentable pour tous les taux de changement de l'environnement ;
- Pour un taux de changement et un coût de perception donnés, une fréquence optimale de perception maximisant le rendement de l'agent existe et la perception très fréquente ou très rare réduit le rendement de l'agent pour toutes les valeurs du taux de changement de l'environnement ;
- Plus le taux de changement de l'environnement augmente, plus la fréquence optimale de perception augmente ;
- Plus le coût de perception croît, plus la fréquence optimale de perception décroît.

Sous l'hypothèse que le taux de changement et le coût de perception ne changent pas brusquement, la politique statique de perception où l'agent applique toujours le même processus pour une tâche donnée, est rentable [Chrisman and Simmons, 1991]. Par contre, dans le cas inverse où les grandeurs de ces paramètres ne peuvent pas être anticipées, cette hypothèse n'est pas correcte et un mécanisme de perception plus dynamique et adaptative est nécessaire.

2.4.3.2 Perception adaptative

D'après [So and Sonenberg, 2009], ces premiers travaux [Kinny et al., 1992, Chrisman and Simmons, 1991] sur la perception pour les agents situés déterminent un protocole d'acquisition fondé sur deux ensembles de paramètres : les paramètres de dynamisme et ceux de sélectivité. Tandis que le dynamisme définit la fréquence de perception (*quand percevoir*), la sélectivité définit les focus d'attention sur un sous-ensemble des données disponibles dans l'environnement, nécessaires pour l'agent (*que percevoir*).

Dans leurs travaux, So et Sonenberg [So, 2007, So and Sonenberg, 2009] discutent la possibilité d'améliorer l'architecture BDI⁷ (Belief-Desire-Intention) [Rao and Georgeff, 1991] d'agent à ressource limitée avec un modèle de conscience de la situation. Leur modèle s'inscrit pleinement dans le cadre de la théorie de la conscience [Endsley, 1995].

7. Les agents BDI ont des croyances, qui sont créées à partir des informations perçues jusqu'à un instant t ; des désirs, qui sont choisis à partir des intentions et des croyances actuelles; des intentions, qui sont décidées en considérant les croyances, les désirs et les intentions actuelles et un plan, qui permet d'atteindre les intentions.

L'objectif de [So, 2007] est de minimiser le recours à la délibération. L'agent doit trouver un compromis entre délibérer et agir. Quand il y a peu de changements dans l'environnement, l'agent peut continuer à appliquer son plan. Par contre, s'il y a un changement qui influence son intention actuelle ou l'exécution de son plan. Il doit être assez réactif pour répondre à ce changement et reconsidérer son plan et son intention. Pour cette raison, il est nécessaire qu'un contrôleur de haut-niveau (Meta-level controller) traite la délibération comme une des options pour le pas de temps suivant. Les options sont une action pour atteindre l'intention ou la délibération qui est un raisonnement sur le besoin de réviser l'action actuelle pour la remplacer par une autre. La décision entre la délibération et l'action est issue de la comparaison des valeurs d'utilité attendues des deux options. Malgré les travaux théoriques, les calculs d'utilité requièrent encore une bonne quantité de travail pour une application.

La proposition dans [So, 2007] est d'utiliser la conscience de la situation comme le mécanisme de contrôleur de haut-niveau. La reconsidération de l'intention est utile quand il y a un changement dans le modèle mental de l'agent qui rend l'intention actuelle non-pertinente ou non-atteignable, à la suite d'un changement perçu dans l'environnement.

Leur proposition consiste à créer un modèle qui permet de procéder de façon bottom-up et top-down. Dans le processus top-down, en considérant les buts, les plans applicables et l'état de l'environnement, le contrôleur de haut-niveau (la conscience de la situation) sélectionne une des trois options à appliquer parmi $\{percevoir - deliberer - agir\}$, $\{deliberer - agir\}$ et $\{agir\}$. Dans le processus bottom-up, le contrôleur de haut niveau surveille l'occurrence des situations dans l'environnement. Ces situations sont prédéfinies dans la représentation mentale d'agent et elles peuvent modifier l'exécution d'un plan ou pousser l'agent à reconsidérer son intention. Dans le cas où la surveillance bottom-up ne détecte pas de changement, le contrôleur de haut-niveau ignore la phase de délibération et impose à l'agent de suivre le plan.

Par ailleurs, dans un autre travail, So et Sonenberg [So and Sonenberg, 2009] cherchent la réponse au problème des agents BDI avec une intention et recherchant uniquement les seules informations pertinentes. Ils discutent de la possibilité d'améliorer cette architecture avec un modèle de perception active [Weyns et al., 2004]. Leur modèle de perception active est fondé aussi sur la théorie de la conscience de la situation [Endsley, 1995]. La proposition est de créer un modèle qui permet à la fois la perception bottom-up et la perception top-down. Tandis que la perception bottom-up correspond à un processus réactif (orienté donnée), la perception top-down est un processus délibératif (orientée but). Dans ce cadre, un agent qui est conscient de la situation doit savoir permuter entre ces deux processus. Le processus top-down cherche les informations pertinentes afin d'exécuter le plan prédéterminé et le processus bottom-up essaye d'identifier les situations qui surviennent et qui peuvent empêcher la réalisation de l'intention.

En résumé, ils proposent un mécanisme bottom-up pour identifier et anticiper les situations qui peuvent survenir et empêcher l'exécution du fonctionnement de l'agent. D'un côté, leur point de vue initial n'est pas différent de ceux de [Kinny et al., 1992, Chrisman and Simmons, 1991] qui est de ne pas occuper la capacité limitée de l'agent avec des informations et des délibérations inutiles. D'un autre côté, ils veulent conserver la réactivité de l'agent en tenant compte des informations qui peuvent être pertinentes. Donc même dans le processus bottom-up, les informations ne sont pas complètement

orientées données. La perception bottom-up joue un rôle correcteur en poussant l'agent à reconsidérer son intention quand il y a un changement dans l'environnement qui est indirectement lié à l'intention courante. Pourtant dans les modèles psychologiques, les percepts apportés par le processus bottom-up ne doivent pas forcément avoir un lien avec une intention de l'agent. Un percept bottom-up peut être vu juste pour ses propriétés environnementales sans aucune utilité, appelé dans ce cas « distracteur » (voir Figure 2.6).

Dans [So and Sonenberg, 2009], les situations à traiter par le processus bottom-up sont limitées par les situations prédéfinies dans la représentation mentale de l'agent. D'autre part, les zones d'intérêt sont limitées par les focus de l'agent où l'agent s'attend à trouver une de ces situations prédéfinies. Pourtant, la limitation des ressources perceptives n'est pas prise en compte explicitement dans le modèle, alors que la perception constitue une tâche coûteuse pour les agents à ressource limitée. Parallèlement, quand il s'agit de modéliser la perception humaine, la capacité limitée de perception doit être pris en considération, ce qui n'est pas possible avec ce modèle.

Le modèle de la conscience de la situation a été repris par Gehrke [Gehrke, 2008] afin de proposer un modèle d'évaluation de la conscience de la situation des systèmes autonomes. Un des critères proposés est l'évaluation du modèle de pertinence de l'information acquise. Dans l'environnement, il y a une multiplicité d'informations mais seulement une partie de celles-ci peut être traitée par l'agent à cause de sa capacité limitée. Pour les humains, la capacité cognitive est limitée au profit de la compétence de concentrer son attention.

Selon Gehrke, la pertinence d'une information peut être calculée par rapport à l'utilité attendue de cette information. Donc, l'agent calcule l'utilité attendue d'une information en prenant en considération : la probabilité de la réalisation d'un événement selon sa connaissance actuelle et l'utilité de cette information pour toutes les actions possibles. Pour le calcul de cette utilité, Gehrke propose l'utilisation de réseaux (ou diagrammes) de décision, mais fait immédiatement la critique de ce modèle : la conception d'un réseau de décision est souvent difficile à cause des difficultés à attribuer des probabilités aux nœuds. Selon notre connaissance, il n'y a pas de travail sur la collecte de données pour la création d'un tel réseau de décision et pour le calcul des probabilités appropriées dans le contexte de la simulation de trafic au niveau tactique.

ACT-R (Adaptive Control of Thought-Rational) [Anderson et al., 2004] est une autre architecture cognitive et se compose d'une mémoire déclarative qui stocke les faits, d'une mémoire procédurale qui stocke les productions, autrement dit, le savoir-faire (e.g. comment conduire), d'un module sensori-moteur et d'une unité centrale (un système de production) qui associe les informations provenant de tous les modules. L'unité centrale exécute les règles de production qui permettent d'atteindre le but selon les états actuels des autres modules.

Dans la dernière version de cette architecture, la restriction à propos des règles de production orientées but a été enlevée. Cette modification, donc, permet de déclencher quelques règles de production indépendantes du but actif quand les conditions sont présentes [Schoelles and Gray, 2003]. Par ailleurs, le processus bottom-up d'attention a été intégré afin de rendre conscient de la présence d'une tâche additionnelle. Pour tester la capacité de changement de tâche du modèle, [Schoelles and Gray, 2003] simulent le comportement d'un opérateur humain qui exécute une tâche essentielle et une tâche se-

concomitante. La tâche secondaire est déclenchée par un événement auditif. L'architecture ACT-R est capable de changer la tâche active comme un opérateur humain quand un tel événement se réalise.

Avec l'architecture ACT-R, il est possible d'expérimenter l'effet d'une deuxième tâche cognitive comme l'utilisation de téléphone portable sur la tâche primaire de poursuite d'un véhicule. Dans [Salvucci, 2002], des tests sans et avec la tâche secondaire sont réalisés, et l'impact de la deuxième tâche sur le positionnement du véhicule sur la voie, le temps de freinage et la distance intervéhiculaire sont examinés. L'existence de la deuxième tâche crée nettement des freinages brusques. Cependant, si on affine le modèle du conducteur même la conduite seule est une activité multi-tâche, par exemple en cas de la traversée de carrefour, une deuxième tâche de poursuite influence l'exécution de la tâche primaire de traversée.

2.4.3.3 Perception sélective

Le modèle d'attention sélective proposée par Macedo [Macedo, 2010a, Macedo, 2010b] est une approche également destinée à concentrer la perception vers ce qui est supposé pertinent. Ayant utilisé les différentes valeurs retournées par les sous-modules d'attention (orienté surprise, nouveauté, incertitude, complexité, etc.), le module de décision, intégré dans une architecture de type BDI, calcule un niveau de pertinence/intérêt pour toutes les entrées d'information parmi lesquelles il sélectionne quelques informations pour lesquelles il alloue les ressources de l'agent (les ressources de raisonnement, traitement, visualisation, communication). Donc, il traite l'attention sélective dans le cadre de la capacité mobilisée par les modules cognitifs.

[Macedo, 2010b] a mis le focus sur un sous-module d'attention orienté « surprise » grâce auquel l'agent mobilise ses ressources sur les aspects de l'environnement qui le surprennent. Ceci a été appliqué dans l'objectif de réduire la quantité d'informations fournies par un système d'information. Seules les informations qui surprennent le conducteur sont supposées utiles pour lui. L'utilité d'une information (événement) est calculée par rapport au niveau de surprise créé. Le niveau de surprise est calculé selon la probabilité de réalisation d'un événement du point de vue du conducteur en prenant en compte l'historique de l'événement.

Ce modèle est bien adapté au problème de départ qui est d'aider à l'acquisition d'information par l'agent sans créer une surabondance des données. Les événements et les informations considérées sont les informations utiles pour la planification de trajet. Pour les tâches du niveau tactique, on ne peut pas appliquer cette approche. Dans la situation de traversée de carrefour, la probabilité de mouvement d'un autre conducteur ne peut pas être calculée selon l'historique. Le conducteur doit rester vigilant jusqu'à ce que l'autre ne constitue plus un danger pour lui.

Dans les travaux présentés en SMA, la perception est traitée pour maximiser le nombre d'informations pertinentes et/ou minimiser l'utilisation de ressources des agents. Par contre, notre approche consiste à modéliser la perception des conducteurs qui peuvent acquérir des informations non-pertinentes et parfois mobilisent toutes les ressources disponibles. Donc, les modèles qui ont pour objectif de maximiser le nombre des informations pertinentes ne correspondent pas à notre but initial.

Plus généralement, la question du « que percevoir » en terme de perception a été peu abordée dans les travaux de simulation à base d'agents des phénomènes sociaux, surtout en trafic. En effet, dans le cycle d'exécution de la boucle « perception-décision-action », la perception est généralement limitée à son sens passif, de réception des stimuli externes par les capteurs physiques et/ou virtuels de l'agent. Dans la perception passive, l'agent acquiert autant de données que possible pendant la phase d'acquisition. Cette approche ne requiert pas de raisonner sur les besoins d'information [So and Sonenberg, 2009]. Le processus de perception est pourtant complexe dès lors que l'on considère les actions à réaliser pour :

- d'une part, passer des données brutes perçues à leur interprétation ;
- d'autre part, prendre en compte le double aspect de la perception, qui comprend à la fois la réception d'événements et la prise d'information.

C'est sur ce dernier point que nous nous sommes focalisés. Les deux facettes du processus correspondent respectivement à la perception passive, avec la détection de signaux par les capteurs (réels ou simulés) pour les agents artificiels, ce qui correspond à la réception involontaire d'événements sensoriels pour les humains, et la perception active, qui est la perception dirigée par la décision, et dans laquelle l'état de certains éléments de l'environnement est volontairement détecté. Donc, nous avons été conduits vers une recherche d'un modèle plus général de la perception qui est capable d'intégrer ces deux aspects de la perception.

2.4.3.4 Perception active

Selon Ferber [Ferber, 1995], le système de perception active reçoit à la fois :

1. l'information à partir des capteurs ;
2. les attentes et buts à partir de l'état interne de l'agent.

Donc, la perception active n'est pas la compréhension directe de l'état actuel de l'environnement. Elle inclut un processus d'interprétation des données brutes. Un agent situé perçoit son environnement par l'intermédiaire de ses capteurs. Dans un contexte de simulation, les capteurs sont l'interface entre l'agent et les entités dans l'environnement. D'abord, les données brutes sont acquises des autres entités. Puis l'agent interprète ces données selon son état interne.

Le modèle d'agent de dialogue proposé par Chimir et al. [Chimir et al., 2005] intègre un cycle qui prend en compte les deux processus de perception (active, *top-down*, et passive, *bottom-up*). Ce cycle, basé sur les travaux de Neisser sur la modélisation de la perception humaine, comprend un ensemble de schémas d'anticipation qui préparent à la réception d'événements sensoriels et guident l'exploration de l'environnement [Chimir et al., 2005].

Le modèle comprend l'interprétation d'un événement sensoriel (un fragment de l'environnement) quand il établit une correspondance avec un schéma d'anticipation. Cette recherche de correspondance est appelé par les auteurs : l'exploration perceptive. Celle-ci dépend de l'état actuel de l'environnement et des expériences passées. Inversement, un événement sensoriel qui représentera aussi une expérience passée dans le futur, modifie légèrement les schémas d'anticipation. Donc, le focus dans ce modèle a été mis sur la relation des processus perceptifs avec la mémoire à long terme. Chimir et al. proposent

un premier pas vers l'implémentation du modèle de Neisser. Ils discutent de la nécessité de modéliser le comportement du système avec des diagrammes comportementaux.

Dans le modèle proposé par Weyns [Weyns et al., 2004], la perception active est supervisée par l'objectif courant de l'agent. Elle permet à l'agent de percevoir ce qui lui est nécessaire pour ses buts courants. Cela minimise l'utilisation des ressources et maximise l'acquisition d'information utile. Le besoin d'information est dépendant de l'état actuel et des sous-tâches actives de l'agent. La perception active est intégrée à l'architecture de l'agent situé avec trois sous-modules (voir Fig 2.8) :

1. **Acquisition** : Dans leur travail [Weyns et al., 2004], Weyns et al. ont défini les focus et la sélection des focus. La sélection des focus permet à l'agent d'orienter sa perception vers un (des) type(s) d'information spécifique(s). Les focus sont imposés par le module de décision. Par exemple, un focus d'odorat rend l'agent sensible aux stimuli du type odeur. Ces focus sont utilisés par les agents qui cherchent différents phéromones dans leur voisinage [Weyns et al., 2005a].

Dans le même contexte, les lois de perception déterminent les entités que l'agent est capable de percevoir dans son voisinage. Si un agent A interroge son entourage dans un rayon de 50 mètres tandis que la visibilité est réduite à 25 mètres à cause du brouillard, la loi de perception empêche la perception des objets qui sont à plus de 25 mètres.

Ce module donc prend la « photo » de l'état actuel de l'environnement restreint par les lois de perception imposées par l'environnement (voir Fig 2.8) et les focus sélectionnés par le module de décision de l'agent. Il produit une représentation r . Une loi de perception est une expression qui restreint la représentation de l'agent selon les exigences du domaine modélisé. Par exemple, un obstacle (e.g. un mur, un poids lourd) peut empêcher (ou dégrader) la perception des autres objets.

2. **Interprétation** : Ce module extrait les percepts p à partir de la représentation r grâce aux descriptions. Cette transformation sert à faire émerger l'information et produit un ensemble des percepts dont chacun est composé d'expressions logiques. Dans cette étape de la perception, une représentation complexe de l'environnement est traduite en expressions qui peuvent être comprises et prises en compte dans le raisonnement de l'agent. Tandis qu'une description peut servir à détecter les objets séparément, une autre description peut permettre d'assembler ces objets et de les interpréter (e.g. comme un peloton de véhicules).
3. **Filtrage** : Selon un ensemble de filtres, l'agent sélectionne un sous-ensemble des percepts qui correspond aux critères spécifiques de sélection. Ces critères sont imposés par le module de décision auquel le module de perception fournit les percepts filtrés. Donc, le filtrage permet de ne garder que les percepts pertinents par rapport à l'intention courante de l'agent.

Ce modèle présente l'intérêt de représenter le processus de perception à la fois dans son ensemble et de façon plus détaillée. De plus, il définit les concepts importants à propos de la perception d'un agent autonome. C'est pourquoi nous l'avons retenu comme cadre général pour notre proposition de perception active présentée au chapitre suivant.

Rigolli et Brady [Rigolli and Brady, 2005] ont proposé un modèle de la perception pour résoudre le problème de perception omnisciente. Dans leur modèle, au lieu de percevoir

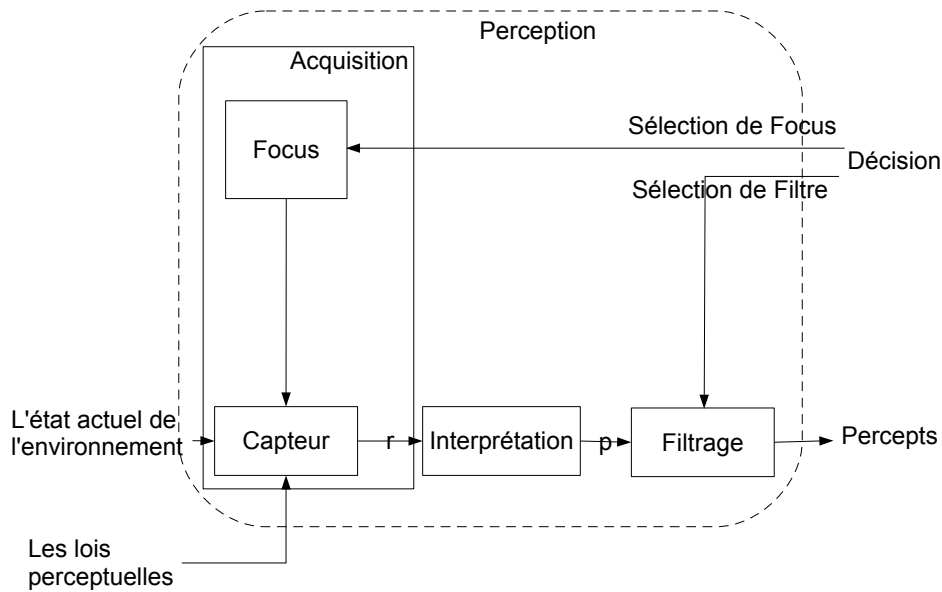


FIGURE 2.8 – Module de perception d'après Weyns [Weyns et al., 2004]

l'environnement tel quel et de prendre une décision, l'agent-conducteur d'abord interprète l'environnement grâce à un ensemble de paramètres perceptifs et produit un environnement subjectif. Puis, il décide en prenant en compte cette interprétation qui contient la description de l'environnement de son point de vue. L'hétérogénéité de la population de conducteurs est ainsi réalisée par l'intermédiaire de la perception bien que le raisonnement reste le même pour tous les agents.

Leur modèle est illustré en simulation de trafic pour une situation de changement de voie. Leur hypothèse de départ est qu'un conducteur raisonne en fonction de termes qualitatifs comme « très lent », « pas suffisamment proche », etc. Et les paramètres de perception (différents seuils) permettent d'évaluer la situation et d'imposer ces termes qualitatifs sur lesquels le raisonnement de l'agent s'appuie. Cette proposition peut être utilisée dans le cadre du module d'interprétation du modèle de perception active.

2.4.4 Perception en Réalité Virtuelle

La perception est également étudiée dans le domaine de la réalité virtuelle. Dans ce domaine, les travaux sur la perception sont focalisés sur la simulation des mouvements des yeux des agents autonomes humanoïdes. L'objectif des travaux est d'améliorer l'impression de réalité des utilisateurs. [Peters and O'Sullivan, 2003, Courty et al., 2003] proposent des modèles d'attention bottom-up pour simuler les mouvement des yeux en mode de regard spontané (quand il n'y a pas de tâches actives).

[Chopra-Khullar and Badler, 1999] proposent un modèle qui intègre les processus bottom-up et top-down. Quand un agent adopte une intention, deux listes sont acti-

vées pour les deux processus. La première liste (IntentionList pour top-down) stocke les lieux ou les objets qui doivent être regardés selon les demandes de l'intention courante. La deuxième liste (PerceptList pour bottom-up) stocke les objets dans le domaine de vue périphérique de l'agent. Le passage d'une liste à l'autre est effectué avec une variable aléatoire qui n'est pas détaillée. Si les deux listes sont vides, le mode de regard spontané est activé.

Un autre modèle qui se trouve à l'intersection de deux domaines, la simulation de conduite et la réalité virtuelle, a été proposé par [Herviou, 2006]. Ce modèle envisage d'augmenter la perception des conducteurs virtuels pour un simulateur de conduite (pour l'apprentissage) afin d'augmenter l'immersion des utilisateurs (élèves). Herviou combine les processus top-down et bottom-up avec une mémoire artificielle qui stocke la représentation de la situation. En cas de changement imprévu dans la partie de l'environnement qui n'est pas couverte par les focus d'attention de l'agent, le processus bottom-up permet de le prendre en compte et modifie les focus avec un système de « priming ». La mémoire virtuelle modélisée n'est pas limitée de façon réaliste en terme de nombres d'entités perçues. La fonction d'omission des percepts n'a pas été modélisée, en contrepartie, les percepts sont mis à jour quand ils sont perçus de nouveau par l'agent. Les percepts périmés peuvent conduire à des accidents. Toutefois, le réalisme de ces accidents n'a pas été examiné. Néanmoins, les résultats observés et simulés n'ont pas été comparés du point de vue de la simulation de trafic. La validité des interactions entre le sujet et l'agent simulé ou entre deux agents simulés n'a pas été examinée.

2.5 Conclusion

Les mouvements des véhicules peuvent être décrits en utilisant les modèles microscopiques appropriés ; des modèles de loi de poursuite, de changement de voie et l'acceptation de créneau sont les modèles généralement utilisés et combinés dans les outils de simulation. La loi de poursuite et le changement de voie décrivent respectivement les mouvements longitudinaux et latéraux d'un véhicule, tandis que le modèle d'acceptation de créneau décrit la décision de traversée de carrefour.

Différents types de lois de poursuite existent dans la littérature [Gazis et al., 1959, Gipps, 1981, Kesting et al., 2009]. Ces modèles décrivent et illustrent la régulation de la vitesse par les conducteurs pendant la conduite en file. Pour simuler le changement de voie et la traversée de carrefour, le modèle d'acceptation de créneau est largement utilisé. Ces modèles fournissent des résultats réalistes au niveau macroscopique. Par contre au niveau microscopique, ils ne permettent pas de comprendre et de modéliser les comportements du conducteur au milieu du carrefour (au centre de l'intersection).

Pour étudier le carrefour et le centre du carrefour, il est nécessaire de prendre en compte finement les comportements des conducteurs. Néanmoins, dans la grande majorité de recherches au domaine du trafic, ce point n'a pas été pris en considération et quand cela a été fait, le comportement des conducteurs est réduit à un comportement normatif [Archer and Kosonen, 2000a], par exemple le respect du code de la route.

Pourtant, on trouve des travaux sur le comportement en carrefour dans la littérature. Toutefois, dans la plupart, le comportement au centre de carrefour (i.e. la zone de conflit)

n'est pas suffisamment pris en compte pour évaluer la sécurité routière. Par exemple, un véhicule autonome simulé ne peut pas s'arrêter dans la zone de conflit dans la plupart des modèles de résolution de conflit [Brilon and Miltner, 2005], car il existe une règle qui est « je rentre dans un carrefour si je peux en sortir sans m'arrêter ». Mais le comportement des conducteurs n'est pas toujours normatif. Par exemple, dans [Bjorklund and Aberg, 2005], les résultats des plusieurs tests effectués en carrefour (en T et en croix) montrent que dans au moins 20% des cas, les conducteurs ont tendance de ne pas respecter la règle de « priorité à droite ».

La plupart des simulations de trafic ne traitant pas les interactions dans la zone de conflit, la prise en compte de ces interactions est faite par une sorte de superviseur du carrefour qui gère les conflits. Le superviseur est représenté par des artefacts, soit par les panneaux de signalisation virtuels dans la zone de conflit afin de permettre le stockage dans le centre du carrefour, soit par un policier virtuel afin de limiter le nombre des véhicules présents simultanément dans la zone de conflit. Dans les deux cas, les comportements des conducteurs simulés ne reflètent pas la situation réelle et non-normative.

Par ailleurs, la simulation microscopique pourrait être utilisée pour étudier les situations accidentogènes. Dans la littérature, on trouve des études sur la corrélation entre l'accident et le créneau critique (le seuil des créneaux acceptables). Quelques approches étudient les comportements individuels dans ces simulations microscopiques [Archer and Kosonen, 2000b]. Archer et al. spécifient le besoin d'un modèle plus détaillé qui relève la nécessité de la simulation nanoscopique. En ajoutant la dimension SMA à cette approche, nous nous inscrivons dans le cadre de la simulation à base d'agent de trafic routier.

Dans ce chapitre, nous avons introduit des notions importantes dans le cadre de notre objectif, extraites des domaines des SMA et des SC qui permettent de présenter le modèle d'agent-conducteur adopté dans le chapitre suivant. Le modèle d'agent fournit une base pour implanter le modèle de perception proposé. Les travaux en SC vont contribuer aux choix pour la création du modèle de perception inspirée des processus de perception humaine. Le modèle de [Weyns et al., 2004] sera une base pour notre modèle de perception grâce aux filtres et aux focus définis. Les processus bottom-up, top-down et la capacité limitée en terme de nombre d'objets perçus de la perception humaine seront modélisés dans ce cadre.

Chapitre 3

Modèle d'Agent pour la Simulation de Trafic et Modèle Conceptuel de Perception

Dans le contexte applicatif de la simulation de trafic, notre contribution porte sur la modélisation du comportement de perception de l'agent-conducteur [Ketenci et al., 2010b]. Nous commençons par la présentation de quelques notions pour argumenter les choix effectués dans le modèle d'agent proposé qui nous permettront de modéliser la perception du conducteur. Suite à l'explication du modèle général, nous allons présenter notre modèle de perception active et humaine.

3.1 Principes pour un agent conducteur

Pour spécifier le modèle approprié, nous avons pris le parti de présenter les principaux concepts en répondant à quelques questions.

3.1.1 Coordination ou compétition ?

Les conducteurs agissent dans un environnement commun. Si leur relation est fondamentalement une relation de co-existence, il arrive cependant qu'ils entrent en concurrence, en fonction de la situation. Il est alors généralement de leur intérêt de se coordonner afin d'éviter l'interblocage ou l'accident.

Si on résume le but d'un conducteur en une phrase, c'est d'atteindre son point de destination avec une vitesse confortable et sans accident. Au niveau stratégique, le trajet de l'agent est généralement défini avant sa réalisation. Donc, le plan global de l'agent existe déjà au moment du déplacement.

Au niveau tactique au sens d'Allen [Allen et al., 1971], il y a une multiplicité de tâches dont chacune nécessite un raisonnement différent. Les tâches engagées par l'agent déterminent en partie la nature de sa relation avec les autres agents. Tandis que les objectifs de deux agents qui se déplacent sur la même voie sont compatibles, les objectifs d'agents arrivant, au même instant et de sens opposés, à un carrefour peuvent être contradictoires.

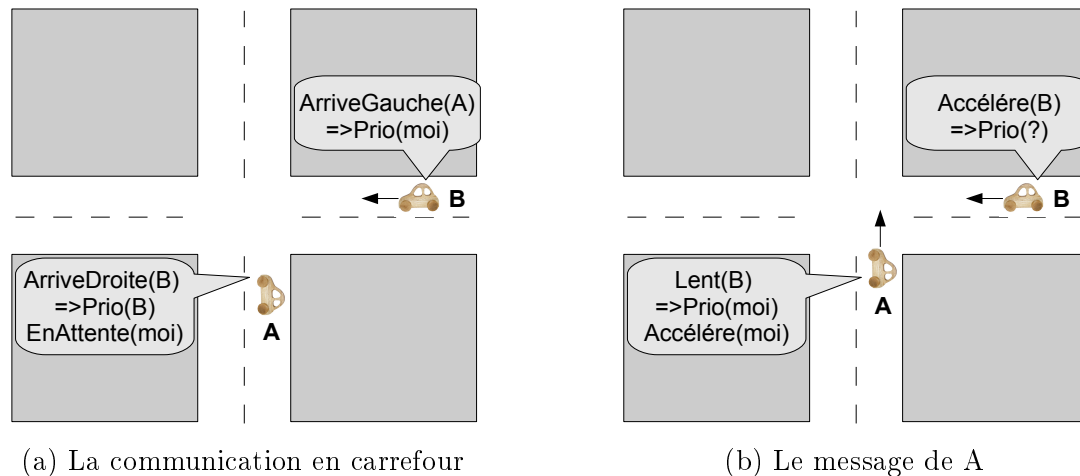


FIGURE 3.1 – Un scénario de communication

Dans ce dernier cas, la résolution de conflit peut être modélisée par la résolution d'un jeu, comme dans [Champion, 2003]. Donc selon la sous-tâche active, la façon qu'ont les agents de se percevoir varie.

3.1.2 Est-ce que les conducteurs communiquent entre eux ?

La communication explicite entre les agents dans un SMA est établie par les envois/réceptions de messages. Les conducteurs ne peuvent pas communiquer explicitement en général (sauf par gestes). L'autre type de communication entre conducteurs est implicite, elle se fait par l'intermédiaire d'un artéfact (e.g. le klaxon, le clignotant, l'appel de phare) ou via l'environnement (voir l'exemple ci-dessous). La communication implicite se réalise par l'intermédiaire de la perception et de l'action. L'agent perçoit la position, la vitesse et éventuellement d'autres propriétés perceptibles des autres agents, délibère sur l'action à exécuter, prend une décision et l'exécute. Finalement, son action crée une entrée perceptive pour les autres.

Le besoin d'information dépend de la tâche. Dans le cas d'une traversée de carrefour, l'agent souhaite traverser le carrefour aussi vite qu'il peut et en évitant l'accident. Il repère les véhicules avec lesquels il pourrait entrer en conflit. Dans le cas de la « poursuite » (des véhicules qui se suivent), il ne cherche à percevoir que le(s) autre(s) véhicule(s) devant lui. En cas de changement de voie, il perçoit également les agents sur sa voie de destination.

On présente ici un exemple qui illustre un cas de communication qu'on peut rencontrer pendant la conduite. Lorsque deux véhicules s'approchent du carrefour (voir la figure 3.1a), en régime de priorité à droite, le véhicule B qui vient de droite avec une vitesse basse a la priorité. A étant à l'arrêt sur la voie sud attend depuis longtemps à l'entrée du carrefour. En calculant le temps d'arrivée de B au carrefour, A décide de forcer le passage et montre son intention en redémarrant et déplaçant son véhicule (voir figure 3.1b). B peut répondre au conducteur A en ralentissant. Cette décélération montre l'acceptation de B, et A ayant vu la décélération de B continue son trajet. Au contraire, B peut continuer à conduire à sa vitesse actuelle ou accélérer pour montrer qu'il ne cède pas le passage à A. Dans ce cas,

A peut choisir de ne pas continuer son mouvement et attendre jusqu'au passage de B ou malgré tout, il peut continuer à forcer le passage. Dans cet exemple, ce sont les actions d'accélération/décélération qui constituent des actes de communication.

3.1.3 Est-ce que les agents conducteurs sont réactifs ?

Les comportements des conducteurs sont issus de raisonnements à différents niveaux. Par exemple au niveau stratégique, tant que tout fonctionne de façon routinière, on suit toujours le même trajet (e.g. pour aller à notre travail). Par contre, si on arrive pour la première fois dans une ville inconnue, on exécute un processus plus difficile car moins familier. On cherche le trajet sur internet et on collecte les données afin de former une carte de la ville ou on utilise nos téléphones « intelligents » pour récupérer les coordonnées de GPS. Mais une fois qu'on a planifié, le plan peut être remis en cause si on rencontre une contradiction.

La conduite aussi constitue une tâche difficile. Au début de l'apprentissage, on confond les pédales de débrayage, frein, accélération, utiles aux tâches opérationnelles. Grâce à la pratique, on améliore nos capacités et la conduite devient une répétition simple de tâches automatiques surtout pour les tâches au niveau opérationnel.

Parfois, la complexité de la situation peut mener à des difficultés. Ces situations complexes et nouvelles poussent le conducteur à délibérer et modifier les mécanismes de raisonnement, perception et exécution. Un conducteur expérimenté a un modèle plus complet de la conduite avec les bonnes relations de priorité entre les tâches et aussi entre les objets perçus. Il s'agit d'une évolution de la représentation interne de l'agent.

Malheureusement, on n'a pas assez de connaissance pour modéliser la représentation mentale d'un conducteur. On ignore la représentation interne explicite dans notre modèle de simulation de conducteur suivant en cela l'idée de Brooks [Brooks, 1991] selon laquelle la représentation interne n'est pas une partie indispensable d'une créature intelligente. Au lieu de construire une représentation explicite de conducteur comme proposée dans [Chimir et al., 2005, Bellet et al., 2009] avec des schémas de conduite ou d'anticipation (*qui sont encodés dans la mémoire à long terme, activés dans la mémoire de travail et instancié avec la réalité* [Bellet et al., 2009]), on soutient l'idée de faire émerger un état interne à partir des interactions entre les modules des sous-tâches actives du modèle de conducteur.

Toutefois, notre objectif n'est pas de modéliser l'évolution interne de l'agent à l'échelle de l'apprentissage de la conduite. Nous cherchons à comprendre l'effet d'un modèle de la perception humaine sur le comportement général. Donc on travaille sur un modèle de conducteur qui essaye de réaliser ses tâches routinières.

La sous-tâche au niveau stratégique est la planification de l'itinéraire, dans notre modèle de conducteur. La planification est un sujet de recherche important en SMA et aussi en modélisation de trafic (voir [Balmer et al., 2004] pour un exemple qui lie les deux). Dans le milieu urbain, la planification d'itinéraire est faite en modifiant un patron de plan sur plusieurs jours jusqu'à ce que le conducteur trouve un état d'équilibre. Une fois qu'il atteint cet état d'équilibre, l'agent exécute toujours le même plan sauf en cas de phénomène imprévu (e.g. forte congestion, fermeture d'une route, accident, etc.). Cette tâche est effectuée avant le trajet. Pour un véhicule à l'entrée du carrefour, la planification

de l'itinéraire ne fait pas partie des tâches à exécuter. Pour cette raison, les comportements du conducteur au niveau stratégique ne sont pas abordés dans notre travail.

On s'intéresse à la modélisation des comportements du conducteur en carrefour qui est un milieu accidentogène. A l'égard de cet objectif, le focus est mis sur la zone d'intersection et donc sur le comportement des conducteurs aux niveaux tactique ou/et opérationnel où le conducteur se comporte de façon plutôt réactive.

3.1.4 Conclusion

Un modèle à plusieurs comportements représentant des sous-tâches tactique et opérationnelles va nous permettre de modéliser le comportement de conducteur en carrefour (la zone à laquelle on s'intéresse). Du fait de la nature de la tâche de conduite, la communication directe ne sera pas considérée dans notre modèle, et ne supportera pas les actions de coopération ou coordination entre les agents-conducteurs.

La perception qui sera au cœur du modèle va prendre la responsabilité de la communication indirecte. Elle va alimenter le module de décision qui contient les sous-tâches composant l'activité de conduite.

Dans la section suivante, nous allons présenter le cadre du modèle d'agent-conducteur.

3.2 Modélisation d'agent-conducteur

Dans la littérature, on trouve un certain nombre de travaux qui essaient d'améliorer les modèles microscopiques de trafic avec le concept d'agent [Sukthankar et al., 1998, Ehlert and Rothkrantz, 2001, Champion et al., 2002, Rigolli and Brady, 2005, Ferreira et al., 2008]. L'approche est généralement fondée sur le triptyque de perception-décision-action.

Ici, il faut souligner que notre objectif n'était pas de proposer un nouveau modèle d'agent en soi. Par contre, il est nécessaire d'adapter les modèles existants d'agent-conducteur pour nous permettre de modéliser la perception humaine et limitée.

Notre modèle d'agent est inspiré par le modèle d'agent « reflex » avec un état interne présenté dans [Russell and Norvig, 2003] et formé de quatre activités simples (*update – state, rule – match, rule – action, update – state*). Ce modèle nous offre la base de ce qui a été décrit en section 3.1.4. Nous avons modifié ce modèle d'agent réactif afin d'implanter notre modèle de perception humaine :

- (1) $percepts_1 \leftarrow Perception(etat_{env})$
- (2) $sousTachesActives \leftarrow Activation(percepts, etat_{int})$
- (3) $percepts_2 \leftarrow Perception(sousTachesActives)$
- (4) $action \leftarrow Decision(percepts_2, sousTachesActives)$
- (5) $etat_{env} \leftarrow ExecutionAction(action)$
- (6) $etat_{int} \leftarrow MisJourEtat(action)$

On distingue l'état interne et la représentation interne de l'agent. Au contraire de la représentation interne, l'état interne ne génère pas des nouvelles connaissances (e.g. révision de croyances dans l'architecture de BDI). Dans notre cas, il se met à jour à

chaque perception. L'état interne se compose de deux ensembles d'attributs. Le premier ensemble comprend les paramètres statiques de l'agent comme les caractéristiques (e.g. le forme de l'agent, l'itinéraire, etc.). Par ailleurs, l'agent a un ensemble de variables (comme ses coordonnées, sa vitesse, etc.) qui sont utilisées pour prendre une décision et qui peuvent être perçues par les autres agents. Donc, ce dernier contient des attributs qui peuvent être mis à jour.

La première activité (1) correspond à un « scanning » de l'environnement. Les *percepts*₁ générés par l'activité (1) sont utilisés pour activer une sous-tâche de décision.

La deuxième activité (2) active une (des) sous-tâche(s) de décision en tenant compte l'état interne et *percepts*₁. Par exemple, quand un agent-conducteur détecte un carrefour, il calcule la distance entre le carrefour et ses coordonnées (i.e. les variables de l'agent). Si la distance est inférieure à un seuil (i.e. le paramètre de l'agent), l'agent active la sous-tâche de traversée de carrefour.

Lorsqu'une sous-tâche de décision est activée, elle demande les informations nécessaires au module de perception. L'activité (3) apporte ces informations nécessaires (*percepts*₂) aux sous-tâches actives.

L'activité (4) consiste à calculer l'action à réaliser en tenant compte de *percepts*₂ et des sous-tâches actives. Finalement, l'activité (5) (et respectivement l'activité (6)) exécute l'action et modifie l'état de l'environnement (et resp. l'état interne de l'agent).

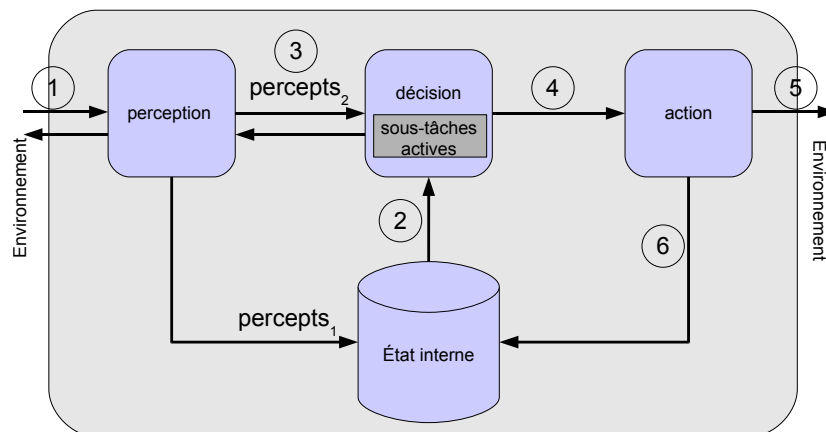


FIGURE 3.2 – Modèle global d'agent-conducteur avec l'état interne et le triptyque perception-décision-action

3.2.1 Action

Dans notre modèle, l'agent se renseigne d'abord sur l'état actuel de l'environnement et des autres entités. Ensuite, il prend une décision selon l'information collectée et il exécute l'action issue de cette décision.

Ce cycle se réalise à chaque pas de temps de façon synchrone par tous les agents. Les changements créés par les actions des agents sont traités un par un mais affichés à la fin de chaque pas de simulation par l'environnement de simulation. Dans l'environnement

réel d'un conducteur, les entités évoluent de façon asynchrone. Par conséquent, chaque conducteur raisonne sur des percepts qui peuvent ne plus représenter l'état actuel de son environnement si celui-ci a évolué depuis sa perception. Il s'agit d'une problématique connue en simulation (voir par exemple [Helleboogh et al., 2007]) que nous ne traitons pas dans les travaux présentés ici.

Les restrictions qui peuvent être mises par l'environnement (e.g. les lois physiques) ne sont pas considérées dans notre modèle. Cela peut conduire à des situations irréalistes comme l'interférence de deux véhicules. De plus, quand un agent conducteur voit un autre agent-conducteur très près devant lui, il peut décider d'arrêter son véhicule quelque soit la décélération nécessaire. Il n'y a donc pas d'accident dans notre simulation, par contre on rencontre des décélérations très fortes liées à des situations accidentogènes. Ces décélérations seront utilisées comme indicateur de « presque-accident » (voir chapitre 5 pour les détails).

3.2.2 Décision

Nous suivons l'approche d'Allen [Allen et al., 1971] (voir section 2.2.2.2) et décrivons la tâche de conduite grâce à un ensemble limité de sous-tâches, qui peuvent être exécutées en parallèle (e.g. la poursuite de véhicule et positionnement en ligne). Ces sous-tâches peuvent être décrites comme des processus cognitifs (e.g. dépassement, détection d'obstacle) qui contribuent à la tâche de conduite. Elles peuvent être déduites à partir des connaissances psychologiques sur les comportements de conduite. Ainsi, la conduite est vue comme une activité multi-tâches.

Chaque sous-tâche possède un coût perceptif et toutes ne sont pas actives en même temps. Cela montre l'importance de savoir à un instant précis, quelles sous-tâches sont actives et quelles autres ne le sont pas. Cette approche qui distingue tâches actives et inactives n'est pas limitée à la conduite et peut s'adresser a priori à toutes les tâches de locomotion, incluant piétons, deux roues, animaux ou robots.

Dans notre modèle, l'activation des tâches dépend à la fois de l'état interne de l'agent et des percepts, car les sous-tâches en conduite peuvent être activées par les deux types de données. À l'approche du carrefour, à partir d'un certain temps ou distance du carrefour, la sous-tâche de traversée de carrefour est activée. La poursuite d'un véhicule est activée en cas de présence d'un véhicule de devant.

Le module de décision réalise l'activation des sous-tâches selon les percepts et les paramètres de l'agent. Il exécute les sous-tâches actives dont chacune possède un mécanisme de décision différente. Chaque sous-tâche est examinée afin de modéliser le mécanisme de décision des conducteurs pour cette tâche.

Plusieurs modèles de poursuite de véhicule sont disponibles dans la littérature [Gipps, 1981, Gazis et al., 1959, Kesting et al., 2009]. D'autre part pour la traversée de carrefour, tandis que les modèles d'acceptation de créneau sont largement utilisés dans les outils de simulation de trafic actuel, nous avons préféré utiliser un mécanisme de coordination multi-agent fondé sur les jeux [Champion, 2003]. Le choix de cet algorithme de coordination correspond à la poursuite de travaux antérieurs dans le cadre de la collaboration entre le LEPSiS et le LAMIH. Ces choix et l'explication de la mise en œuvre de chaque décision se feront en détail dans le chapitre 4.

Finalement, le module de décision sélectionne l'action à exécuter parmi la liste des alternatives retournées par les sous-tâches actives. Dans la section 2.3.1, nous avons présenté différents travaux sur la possibilité de modéliser la sélection d'action d'un agent ayant plusieurs sous-tâches distinctes (comportements). En laissant ce sujet ouvert pour de futures recherches, le niveau d'abstraction qu'on a adopté comme cadre de notre objectif nous a allégé pour cette étape (voir le chapitre 4). Ainsi, on réduit la décision au contrôle longitudinal de l'accélération (positive ou négative) du véhicule sur un trajet. Ainsi, chaque sous-tâche active calcule une valeur d'accélération. Parmi ces valeurs, l'accélération la plus contraignante est choisie par l'agent satisfaisant ainsi toutes les sous-tâches.

3.2.3 Perception

Nous reprenons l'hypothèse mentionnée dans certains travaux [Parker and Stradling, 2001] (d'après [Rigolli and Brady, 2005]) (voir la section 2.4.3.4) que ce ne sont pas les mécanismes de raisonnement qui sont différents mais ce sont les interprétations différentes de la situation qui conduisent l'agent aux différentes décisions. Actuellement (en simulation de trafic), les différents comportements sont créés à l'aide de différents mécanismes de décision ou les différents paramètres du même mécanisme de décision, mais il est possible d'obtenir également des comportement différents avec les mécanismes de perception car, de toute façon, l'agent interprète l'environnement. Par exemple, les agents peuvent interpréter qualitativement les données de perception (e.g. « lent », « rapide » pour un véhicule) comme dans [Rigolli and Brady, 2005] avec un module d'interprétation explicite, ce qui sera discuté au chapitre 6. Par ailleurs, les agents prennent en compte une partie de l'information existante, ce qui correspond déjà à une interprétation.

Dans notre modèle, selon les percepts acquis, l'agent évalue l'environnement et sur cet environnement interprété, il fonde son raisonnement. L'acquisition des percepts est influencée par la situation dans laquelle l'agent se trouve. Par exemple, sur une autoroute où il n'y a pas de carrefour, l'agent n'applique pas un raisonnement de traversée de carrefour et donc ne cherche pas les autres agents avec lesquels il est potentiellement en conflit. Donc, la perception est liée aux besoins de sous-tâches actives, donc au module de décision. Et ces sous-tâches sont activées par le module de perception en fonction des paramètres (e.g. distance à partir du carrefour) de l'état interne.

Le modèle global ayant été exposé, nous allons maintenant détailler le modèle de perception en deux parties. Dans cette section, les bases du modèle cognitif de perception (le modèle qualitatif) et le cadre multi-agent seront présentés. Dans la section 3.3, nous allons présenter notre proposition de modèle de perception.

Nous allons maintenant nous interroger sur la perception des conducteurs afin de proposer un modèle cohérent avec les recherches en psychologie cognitive présentées dans la section 2.4.2. Le modèle de perception doit prendre en considération les processus principaux de la perception visuelle et la limite perceptive humaine. Notre objectif est de permettre une implantation informatique pour la simulation de trafic dans les situations où ces processus et la limite perceptive ont une importance particulière.

perceptives, le nombre de percepts pris en compte est limité par un seuil. Puisque les sous-tâches de perception liées aux sous-tâches *permanentes* de conduite apportent des percepts avec un coût négligeable ou constant (au niveau opérationnelle), donc les sous-tâches *obligatoires* de perception ne sont pas influencées par la limite des ressources perceptives. Par conséquent, dans notre modèle, seules les sous-tâches de perception *optionnelles* qui apportent des percepts aux sous-tâches *temporaires* de décision subissent le filtrage de cette limite des ressources perceptives.

3.2.3.2 L'importance des percepts

Une hypothèse simplificatrice à propos du coût perceptif de la tâche de conduite fait référence à la mémoire à court terme. Nous considérons que chaque percept, quel que soit la sous-tâche, utilise la même quantité de mémoire perceptive. Ainsi, chaque percept a le même coût en terme de ressource perceptive. Par exemple, quand la sous-tâche de Traversée de Carrefour (**TC**) est activée, le conducteur prend l'information du focus spatial associé : les voies entrantes (voir Tableau 3.1). L'information pertinente inclut la position et la vitesse des véhicules et les conflits potentiels. On suppose que le coût perceptif de cette sous-tâche dépend du nombre de percepts pertinents, à savoir le nombre de véhicules en conflit potentiel avec le conducteur. Cette méthode est simplificatrice car elle ne prend pas en compte la complexité de la situation : il s'agit d'un raisonnement quantitatif uniquement. Nous discuterons de possibilités différentes au chapitre 6.

Des règles sont nécessaires pour trier les percepts et sélectionner les plus pertinents. D'abord, un tri est nécessaire afin d'identifier les percepts top-down les plus pertinents pour les sous-tâches actives. En parallèle, la saillance bottom-up des percepts est calculée pour trouver les percepts les plus saillants. Finalement, un seuil sur les percepts triés filtre la liste et fait passer les percepts les plus importants dans la mémoire à court terme. Dans une situation où il y a trop d'information, certains percepts pertinents peuvent ne pas être traités par le module de décision. Cela peut conduire à des accidents ou des « presque-accidents ». C'est cohérent avec l'idée qu'un modèle du comportement du conducteur doit être capable aussi de modéliser les erreurs humaines.

L'importance d'un percept est calculé dans notre modèle par deux facteurs : la pertinence top-down pour la sous-tâche et la saillance bottom-up qui ne dépend pas de la sous-tâche. Le calcul de pertinence d'un percept dépend des caractéristiques de la sous-tâche à laquelle le percept est lié [Baluch and Itti, 2011]. La saillance de l'objet représente sa capacité à attirer l'attention. Selon la plupart des modèles informatiques, la saillance dépend du contraste créé par l'objet grâce à ses caractéristiques environnementales comme la luminance, la couleur et le mouvement [Itti and Koch, 2001]. L'implantation de ces facteurs est discutée dans le chapitre suivant.

Chaque sous-tâche est associée à un focus spécifique d'attention, à la fois spatial (où regarder) et en terme de stimuli attendus (quoi regarder) (voir Tableau 3.1). Les sous-tâches au niveau opérationnel se font de façon routinière et la sous-tâche au niveau stratégique se fait une seule fois. Pendant la tâche de conduite, les activités de ces deux niveaux nécessitent peu de ressources perceptives jusqu'à ce qu'il y ait un événement non routinier (voir la section 2.4.2). Par contre, les activités tactiques requièrent une forte vigilance et compréhension de la situation.

Sous-tâches	focus
Contrôle de l'Itinéraire (CI)	la carte et les signes routières
Identification de la Règlementation (IR)	les panneaux de trafic, les feux tricolores
Traversée de Carrefour (TC)	les voies entrantes, les véhicules
Changement de Voie (CV)	la voie de destination, les miroirs
Poursuite (P)	le trajet devant, le véhicule
Détection de Danger (DD)	les routes, les trottoirs
Contrôle de Trajectoire (CT)	la route

TABLE 3.1 – Exemples de sous-tâches de conduite avec les focus associés.

Dans la section 2.4.3.4, nous avons dressé un panorama des modèles de perception avec nos critiques. Les défauts des modèles existants à créer un modèle de perception humaine (à la fois active, passive et limitée) nous a mené à adapter un modèle global de perception active dans le cadre de notre objectif. Celui-ci est fondé sur les modules de la perception active de Weyns [Weyns et al., 2004].

Le modèle de Weyns a été proposé dans le cadre du développement d'un modèle d'agent intelligent de transport de marchandises dans un entrepôt ou une usine [Weyns et al., 2005b]. L'objectif de la perception active étant de maximiser le nombre d'informations pertinentes et de minimiser le nombre d'informations non-pertinentes. Or cette approche peut apparaître peu réaliste s'il s'agit de simuler la perception humaine. Par exemple, dans le contexte d'une situation de carrefour encombré, cette procédure permet l'accès à toutes les informations sur tous les objets présents dans la zone considérée et susceptibles d'interagir avec l'agent. Or, il a été montré en psychologie [Miller, 1956] que la charge cognitive influence les prises de décision de l'opérateur humain : celui-ci ne serait capable de traiter qu'un volume limité d'informations à la fois [Miller, 1956, Marois and Ivanoff, 2005].

Le modèle de perception active nous a toutefois donné un cadre théorique que nous avons utilisé dans notre proposition. La section 3.2.4 est consacrée à la modélisation de l'environnement qui est le deuxième aspect essentiel du SMA situé.

3.2.4 L'environnement

L'environnement a plusieurs responsabilités selon les trois niveaux qui ont été présentés en section 2.2.1.1. Ayant l'objectif d'améliorer les processus perceptifs internes de l'agent, les processus externes de la perception qui peuvent être effectués par l'environnement n'ont pas été pris en compte. Donc, l'environnement n'a pas été modélisé comme une entité active avec des responsabilités d'interaction-médiation.

Toutefois, les responsabilités au niveau d'abstraction (le niveau décrit dans [Weyns et al., 2007]) ont été modélisées. Dans notre modélisation, l'environnement permet à l'agent de percevoir et d'agir. Donc, pour qu'un agent perçoive une autre entité, il doit passer par l'intermédiaire de l'environnement. D'abord, il envoie une requête à l'environnement et se renseigne sur l'état actuel des autres agents. Ensuite, il prend une décision selon les informations collectées et il exécute l'action issue de cette décision.

Dans le cadre de notre objectif, nous nous concentrons sur la communication implicite par l'intermédiaire de l'environnement. Comme dans [Ferreira et al., 2008], on prend l'environnement⁸ à un instant t .

A l'instant t , le système est composé d'un ensemble E d'entités. Ces entités sont de différents types, certaines d'entre elles étant des agents (e.g. les voitures), d'autres des objets (e.g. les feux tricolores). Nous appelons $A = \{a_1, \dots, a_i, \dots, a_n\}$ avec $A \subseteq E$, l'ensemble des agents du système à t .

En section 4.2, on présente les différentes composantes de l'environnement.

3.3 Perception humaine et limitée

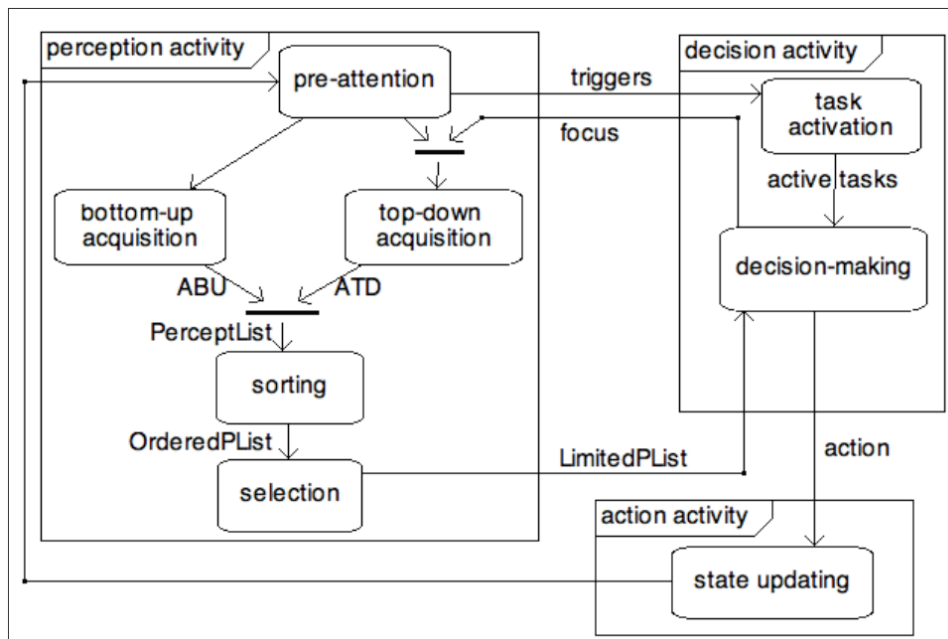


FIGURE 3.4 – Les sous-modules de la perception : Préattention, Acquisition Bottom-up, Acquisition Top-Down, Tri et Sélection.

Les décisions des agents sont prises à chaque pas de temps. A chaque pas de temps, ils perçoivent leur environnement, et leurs décisions sont fondées sur leurs percepts.

Dans le modèle proposé, le module de perception est composé de quatre sous-modules (voir Figure 3.4) : Pré-attention, Acquisition (Bottom-up et Top-Down), Tri et Sélection. Le sous-module de préattention prend l'état actuel de l'environnement et permet à déclencher une (ou des) sous-tâches de la décision selon certaines prémisses dans le sous-module de décision : l'activation des tâches.

Les sous-modules d'Acquisition exécutent deux processus parallèles : top-down et bottom-up. Selon les sous-tâches actives, le module de décision impose les focus à la

8. Les lois physiques qui existent dans la définition originale de l'environnement de Ferreira n'ont pas été prises en compte.

sous-tâche d'acquisition top-down (orientée focus) qui acquiert les informations demandées par les focus. L'acquisition top-down attribue aux entités perçues (percepts) leurs valeurs de pertinence selon le critère du calcul de pertinence de la sous-tâche à laquelle elles sont liées. En parallèle, l'acquisition bottom-up (non-orientée) acquiert autant d'informations que possible en leur attribuant des valeurs de saillance. Suite à cette phase, les sous-modules de tri top-down et bottom-up classent séparément les deux listes retournées par les deux types d'acquisition selon un critère top-down et un critère bottom-up. Le sous-module d'intégration prend les deux listes, les fusionne et les trie. Ce tri est fait en comparant la priorité des percepts des différentes tâches et en comparant la combinaison des valeurs de pertinence et saillance des percepts de la même tâche selon un critère de combinaison fc . Finalement, le sous-module de sélection joue le rôle de la mémoire limitée de l'être humain qui est modélisée par une limite sur le nombre d'objets perçus.

L'interprétation est traitée comme le module qui traduit des données brutes perçues sous une forme compréhensible par le module de décision. C'est la phase d'extraction de l'information à partir des données. Dans l'environnement réel, cette étape joue un rôle plus important que dans l'environnement virtuel. Ce type d'activité existe en robotique et en traitement d'image, pour extraire l'information à partir d'une image. Ce module a perdu de son importance et n'a pas pris place dans notre modèle puisque les percepts possèdent directement une sémantique (une voiture, etc.). Par contre, dans tous les cas, l'agent interprète l'environnement selon ses informations perçues qui correspondent à un sous ensemble des informations existantes. Pour la modélisation de la perception du conducteur, une amélioration possible en ce sens est proposée par [Rigolli and Brady, 2005], présentée dans la section 2.4.3.4.

L'être humain dirige son regard vers une zone de l'environnement ou un objet grâce aux saccades (*i.e.* le mouvement des yeux) et aux mouvements de tête. Pendant un intervalle de temps où il se concentre sur ses activités internes, il perçoit peu ou pas les autres entités. Nous ne tenons pas compte de ce phénomène pour diminuer le nombre de paramètres du modèle. Nous supposons l'agent capable d'acquérir des données parallèlement : l'agent est supposé capable de percevoir simultanément les entités dans les différentes parties de l'environnement.

En outre, l'attention de l'agent est orientée vers les zones de l'environnement dans lesquelles il s'attend à trouver les entités qui peuvent l'intéresser. La perception est non seulement orientée vers certaines zones de l'environnement mais aussi vers un certain type d'entités. Ces aspects sont implantés par les focus.

Pour définir plus précisément notre modèle, nous utilisons les notations suivantes. Les valeurs prises par certaines parties du modèle sont susceptibles de changer en fonction du temps, cependant cette dépendance n'apparaît pas dans les notations afin de les alléger. Nous postulons donc que les notations suivantes sont dépendantes de t , le moment où la perception est réalisée. L'implantation de chaque composant sera expliquée en détail avec les choix effectués dans le chapitre 4.

Du point de vue d'un agent du système,

- $E_p = \{e_1, \dots, e_j, \dots, e_k\} \subseteq E$ représente l'ensemble des entités qui forment l'environnement perceptible par l'agent à t . A noter qu'un agent a_i peut percevoir un autre agent a_j comme une entité de son environnement ;
- si S est l'ensemble de ses sous-tâches (ou comportements), $S_+ \subseteq S$ est l'ensemble

des comportements actifs de l'agent à t (les comportements correspondent aux sous-tâches de conduite dans le modèle d'Allen [Allen et al., 1971]).

Nous modélisons le processus de perception de la façon suivante. Chaque agent a_i perçoit son environnement en quatre étapes :

1. une étape de préattention, qui capture la photo de l'environnement et permet d'activer les sous-tâches de décision ;
2. une étape d'acquisition, qui sélectionne des sous-ensembles d'éléments de l'environnement en utilisant des focus ;
3. une étape de tri, qui définit un ordre de priorité sur chacun de ces sous-ensembles ;
4. une étape de sélection des n résultats les mieux classés parmi les percepts issus de l'étape de tri.

3.3.1 Préattention

Cette étape enregistre une image de l'état de l'environnement, qui servira de base aux processus d'acquisition. Également, les sous-tâches de décision sont activées selon quelques prémisses simples stockées par le module de décisions. Par exemple, un agent-conducteur s'approchant du carrefour active sa sous-tâche de traversée de carrefour à partir d'une certaine distance et une voiture sur la section courante active son comportement de poursuite s'il y a une voiture devant lui sur sa voie à une certaine distance. Ces activations sont décidées à partir de l'image présentée par le sous-module de préattention.

3.3.2 Acquisition

Definition 1 (Percept). *Un percept p est la représentation d'une entité e de l'environnement E , tel qu'elle est perçue par l'agent.*

L'acquisition permet de détecter l'environnement pour tous les types d'informations. L'acquisition réalise deux processus distincts : une acquisition de données top-down et une autre bottom-up. L'ensemble acquis par ce processus est formé des deux ensembles de données acquises par ces deux différents processus. Les données acquises sont des éléments de l'environnement. Les ensembles résultant de ces processus sont donc des sous-ensembles de l'environnement perceptible E_p .

$$\text{Acquisition} : 2^S \times 2^E \rightarrow 2^E \times 2^E$$

$$\text{Acquisition}(S_+, E_p) = (\text{AcquisitionTopDown}(S_+, E_p), \text{AcquisitionBottomUp}(E_p))$$

3.3.2.1 Acquisition Top-Down

L'objectif de l'étape d'acquisition top-down est de percevoir les percepts pertinents pour la prise de décision. L'acquisition top-down met ainsi en œuvre une sélection des éléments de l'environnement en utilisant des focus dirigés par les comportements actifs.

Definition 2 (Focus). *Un focus est un « filtre », une fonction de sélection parmi les éléments de E selon des critères liés aux sous-tâches (comportements) : un focus f_i s'applique de E dans l'ensemble 2^E des parties de E .*

L'agent a un ensemble de comportements actifs, qui imposent leurs focus. Chaque comportement actif $s \in S_+$ produit un ensemble de focus $F = \{f_i | f_i(E_p) \in 2^E\}$ tel que les entités sélectionnées soient utiles pour la prise de décision liée à ce comportement. Les critères de sélection peuvent être liés à une zone géographique de l'environnement, à un certain type d'information, etc. Par exemple, la sélection pour la sous-tâche d'Identification de Règlements peut concerner les éléments de type « panneaux de signalisation » dans l'environnement devant et à droite de l'agent dans un rayon de 50 mètres. Chaque comportement possède donc ses propres critères de sélection, qui peuvent varier en fonction de l'état actuel connu de l'environnement, les buts de l'agent, mais également en fonction des expériences passées.

Utilisation des Focus : Les focus définissent un sous-ensemble de données potentiellement pertinentes vis-à-vis des comportements actifs. Lorsque plusieurs focus sont demandés par les comportements de l'agent, l'objectif est d'obtenir tous les éléments appartenant aux sous-ensembles de E_p définis par ces focus. Par exemple, l'objectif est de sélectionner les panneaux de signalisation devant et à droite de l'agent dans un rayon de 50 mètres, ainsi que les véhicules, piétons ou deux-roues autour de l'agent dans un rayon de 25 mètres. Le résultat de l'application de plusieurs focus doit donc être l'union des éléments sélectionnés par ceux-ci.

L'acquisition top-down effectue la prise d'information des entités correspondant à ces focus et retourne un ensemble d'entités. Nous appellerons *ATD* l'ensemble d'entités acquises par application des focus définis comme nécessaires par l'agent pour sa prise de décision.

L'acquisition top-down réalise également l'attribution des valeurs de pertinence aux entités pour la prise de décision. Or, l'évaluation de la pertinence peut différer selon les sous-tâches, chacune d'elles ayant ses propres critères de pertinence. Pour la suite, nous posons ceci : la valeur de pertinence $r(e_i)$ d'une entité e_i est fonction des valeurs de pertinence $r_S(e_i)$ provenant de critères associés aux sous-tâches actives.

Les valeurs de pertinences accordées par les sous-tâches aux entités perçues peuvent être différentes. Ce phénomène nous mène à la décomposition d'une entité à plusieurs percepts en fonction des différents besoins associés à des sous-tâches distinctes. Par exemple, du point de vue d'un agent, un véhicule devant n'est pas un percept très pertinent pour le changement de voie. Son rôle est de créer le désir de changer de voie quand il empêche le véhicule derrière lui d'atteindre sa vitesse désirée. Tandis que le même véhicule devant a une pertinence élevée dans une loi de poursuite afin d'empêcher un accident.

Par conséquent, une entité peut apparaître plusieurs fois dans des percepts différents. Les percepts créés à partir des entités issues de l'acquisition top-down sont classés selon les valeurs de pertinence. Donc le résultat *ATD* contient la liste des percepts top-down auxquels sont attribués leurs niveaux de pertinence.

$$\begin{aligned}
& AcquisitionTopDown : 2^S \times 2^E \rightarrow 2^E \\
& AcquisitionTopDown(S_+, E_p) = \bigcup_{\{f_i \in F\}} f_i(E_p) = ATD
\end{aligned}$$

3.3.2.2 Acquisition Bottom-Up

Comme expliqué précédemment, certains percepts peuvent être acquis indépendamment des besoins décisionnels de l'agent. En cas d'événement imprévu, l'acquisition bottom-up peut jouer un rôle correcteur (e.g. un piéton qui traverse au feu rouge). Néanmoins, il peut aussi jouer le rôle de distracteur (e.g. un panneau de publicité). En conclusion, l'effet de ce processus est de percevoir les percepts saillants selon leurs propriétés environnementales (e.g. couleur, taille, vitesse...). Ce processus d'acquisition ne dépend donc pas de focus associé ; il retourne un ensemble d'entités comme le processus d'acquisition précédent. Nous appellerons *ABU* l'ensemble des entités bottom-up acquises par l'agent.

La deuxième étape d'acquisition consiste à attribuer des valeurs de saillance aux entités acquises. Le processus bottom-up ne dépend pas des objectifs de l'agent mais des propriétés environnementales de l'entité perçue. Nous notons $s(e_i)$ la valeur de saillance de l'entité perçue e_i .

Les percepts créés à partir des entités issues de l'acquisition bottom-up sont classées selon les valeurs de saillance $s(e_i)$. Le résultat est *PBU*, la liste des percepts bottom-up ordonnés selon leur niveau de saillance.

$$\begin{aligned}
& AcquisitionBottomUp : 2^E \rightarrow 2^E \\
& AcquisitionBottomUp(E_p) = ABU
\end{aligned}$$

3.3.3 Tri

Suite à la phase d'acquisition, nous avons deux listes de percepts : les percepts perçus de façon bottom-up (*ABU*) et les percepts perçus de façon top-down (*ATD*). Il peut y avoir des entités communes qui apparaissent dans les deux listes construites en parallèle. Pour calculer le niveau d'attention globale, il s'agit d'intégrer les éléments issus des deux processus, donc de « fusionner » les deux listes, ce qui constitue le premier pas de cette étape. L'intégration de ces listes est la prémisse du tri importante pour la phase suivante qui est la phase de filtrage par la mémoire limitée de l'agent.

Les percepts sont assemblés dans une liste qui est l'union de deux listes sans rechercher la double apparition des mêmes éléments. Dans cette liste, les percepts sont caractérisés par leurs valeurs de pertinence et saillance :

$$PerceptList = \{\langle p, r(p), s(p) \rangle \mid p \in ATD \uplus ABU\}$$

Nous considérons pour la suite que :

- il est possible de donner une valeur de saillance à toute entité d'un percept de $ATD \cup ABU$;
- une valeur de pertinence faible mais non nulle est attribuée aux éléments de *ABU* n'appartenant pas à *ATD* ;

- nous disposons d'une fonction de combinaison fc qui fournit la valeur d'importance du percept p_i en fonction de $r(e_i)$ et $s(e_i)$.

Le deuxième pas est le tri des percepts afin de sélectionner les plus importants. Dans notre modèle, nous avons attaqué deux questions ouvertes dont les réponses peuvent être différentes selon l'approche.

La première question concerne comment combiner les valeurs de saillance et de pertinence afin d'évaluer l'importance des percepts. Nous définissons la fonction de combinaison fc qui sera implanté par le concepteur selon les besoins du modèle. Dans notre contexte de simulation, nous avons implanté la fonction de combinaison comme un produit simple des deux valeurs (voir Section 4 pour les détails).

La deuxième question concerne comment combiner les sous-tâches. Quand plus d'une sous-tâche est activée à la fois, les percepts distincts attachés aux différentes sous-tâches peuvent avoir les mêmes valeurs de pertinence. Ce problème concerne l'importance relative des sous-tâches à la prise de décision. En effet, ce problème dépend plus de la conception de la partie décisionnelle que de la conception de la partie de perception. Le choix peut dépendre de l'application. Dans notre contexte de simulation, nous avons défini un ensemble de sous-tâches actives pendant la traversée de carrefour et les priorités parmi ces dernières (voir Section 4 pour les détails).

Le résultat de l'étape de tri est une liste ordonnée des percepts selon fc :

$$OrderedPList = \text{sort}(PerceptList, fc)$$

3.3.4 Sélection

La dernière étape du processus de perception avant la prise de décision a pour objet de modéliser la mémoire perceptive limitée de l'être humain. Il s'agit donc de limiter le nombre de percepts en fonction de la capacité de l'agent. Cette limite ne permet à l'agent de prendre en compte que quelques éléments de l'environnement. Bien que la capacité de la mémoire dépende aussi de la complexité des autres tâches effectuées (*e.g.* l'action en cours, la complexité de la décision à prendre) et des propriétés de l'agent (*e.g.* la familiarité avec la situation), nous procédons pour la suite à une simplification qui consiste à considérer uniquement le nombre n de percepts mémorisés⁹.

La liste *LimitedPList* issue de cette étape fournit les données de perception au module de décision.

$$\begin{aligned} Selection &: 2^P \times \mathbb{N} \rightarrow 2^P \\ Selection(OrderedPList, n) &= LimitedPList \end{aligned}$$

avec

- $LimitedPercepts \subseteq PerceptList$;
- $\text{card}(LimitedPList) \leq n$.

9. La levée de cette simplification sera discutée au chapitre 6 Perspectives.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre modèle d'agent qui permet de modéliser la perception humaine et limitée. Le modèle est fondé sur une sélection de quelques travaux en Sciences Cognitives. Les deux processus d'attention perceptive (les processus bottom-up et top-down) ont été modélisés. La modélisation de processus top-down de traitement d'information utilise le modèle de perception active de Weyns [Weyns et al., 2004] recevant les informations pertinentes pour atteindre le but courant. Nous avons ajouté un processus bottom-up de perception en parallèle dont l'objectif est de simuler la perception involontaire de l'environnement. Les sorties de ces deux processus sont intégrées et la capacité de perception limitée a été modélisée par un seuil qui limite le nombre d'entités perçues accédant au module de décision.

Ce passage d'un modèle psychologique à un modèle informatique inclut quelques simplifications fortes. Par exemple, la limite de perception qui est assimilée à un nombre d'entités perçues peut être discuté.

En section 3.3, nous avons décrit le modèle pour une application générale. L'implantation de ce modèle dans le contexte du trafic va impliquer de nouvelles simplifications. Au chapitre suivant, l'application de ce modèle sera examinée avec les choix effectués pour l'implantation (e.g. les critères top-down, la fonction d'intégration, etc.).

La complexité théorique du modèle de perception est présentée en Annexe (voir Annexe B.1).

Chapitre 4

Réalisation d'un Outil de Simulation et Implantation du Modèle de Perception

Au chapitre précédent, le modèle de perception a été présenté de façon générale et théorique. Ce chapitre est consacré à l'implantation et à l'adaptation de ce modèle au contexte du trafic. Cette implantation a été faite dans le cadre d'un outil de simulation qui a été réalisé pendant ma thèse. Donc, dans la première section de ce chapitre, nous allons présenter notre outil de simulation : SAPIEN¹⁰ et dans la section 4.2, nous allons présenter le modèle de l'environnement.

L'implantation d'un modèle requiert souvent des simplifications et des choix. Dans la section 4.3, nous allons exposer comment le modèle d'agent-conducteur pour une simulation de trafic a été implanté. Nous allons examiner séparément les choix effectués pour le module de décision et pour le module de perception.

Puis, à travers une application, nous allons illustrer le fonctionnement du modèle de perception active et humaine dans le cas de la traversée de carrefour. Cette application permettra d'exposer la situation que nous allons tester au chapitre 5.

4.1 Objectif de SAPIEN et choix du moteur de simulation

L'outil de simulation réalisé devait répondre à divers objectifs liés aux recherches en cours et à l'étude des situations accidentogènes, dont celles incluant les interactions conducteurs-piétons. Le traitement de ces interactions et la simulation des problèmes décrits par la phrase « j'ai regardé mais je n'ai pas vu le piéton » est envisageable en étendant le modèle proposé de perception. Par contre, il n'existait pas d'outil de simulation adapté à cet objectif. Donc, afin de pouvoir répondre à ces recherches en cours, il a été décidé au sein du LEPSiS de développer un prototype de simulation. C'est dans ce cadre que nous avons développé notre environnement de simulation de trafic sous la direction de Jean-Michel Auberlet. Le travail effectué a été amélioré par l'ajout d'un modèle de piéton qui a été développé par Laure Bourgois et finalement, l'outil de simulation a été

10. Simulation d'Agent-Piéton dans leur ENvironnement

appelé SAPIEN.

L'axe principal guidant les recherches autour de SAPIEN est de pouvoir mettre l'utilisateur au cœur de l'évaluation a priori du système de transport. En effet aujourd'hui, les outils de simulation devraient pouvoir jouer un rôle majeur en tant qu'outil d'aide à la décision, en permettant de réaliser des évaluations d'impact a priori de toute modification du système de transports ou pour le moins en favorisant le pré-prototypage de ces modifications (l'étude d'un aménagement par exemple).

Le cadre conceptuel retenu pour SAPIEN est une modélisation suivant le paradigme des systèmes multi-agents. Ainsi SAPIEN doit permettre la mise au point de modèles de déplacements des usagers (conducteurs, piétons) au niveau individuel (on parle d'échelle microscopique au niveau spatial et d'échelle nanoscopique au niveau des comportements), afin :

- d'alimenter des simulateurs de trafic, qui pour la plupart sont des simulateurs d'écoulement (de performance) microscopique (AIMSUN, VISSIM, PARAMICS, DYNAMSIM...) afin de permettre des études plus fines (nanoscopiques versus tout microscopique) de certains points du réseau simulé ;
- d'enrichir le peuplement de mondes virtuels afin de rendre plus crédibles les entités autonomes dans les scènes virtuelles en particulier lors des expérimentations sur simulateur de conduite (le sujet devant interagir avec des véhicules et/ou des piétons simulés).

Les champs d'application visés en priorité par la plate-forme sont ceux pour lesquels existe une problématique du partage, par les usagers, du même espace (surface) de déplacements (exemples : les carrefours, les zones de rencontres, les plateaux traversiers...).

Dans ce cadre, au cours de ma thèse, j'ai développé la partie « conducteur » de la plateforme SAPIEN, en reprenant partiellement et en étendant le modèle existant dans un outil précédent (ARCHISIM) avec un module de perception humaine. D'une part, cette amélioration a permis d'affiner la granularité du modèle microscopique de conducteur en tenant compte de processus perceptifs humains. D'autre part, cette approche fournit la possibilité de peupler l'environnement virtuel avec des agents autonomes qui sont capables d'exposer des différents comportements grâce au module de perception proposé.

En parallèle des objectifs métiers visés par les recherches menées au LEPSIS, l'élaboration et la mise au point de SAPIEN ainsi que le choix d'architecture logiciel visent également à fédérer une communauté universitaire issue de l'informatique et des systèmes multi-agents et s'intéressant de près ou de loin aux problématiques des transports terrestres¹¹. C'est l'une des raisons qui nous ont conduit à retenir REPAST¹²[REPAST, 2010] étant une plateforme logicielle libre de simulation Multi-Agents comme support au développement de SAPIEN.

REPAST est un outil de simulation dans lequel les notions importantes pour une simulation (e.g. temps, espace, visualisation) sont intégrées alors que ces notions doivent

11. Le processus de création de SAPIEN a continué avec l'audit du code par un observateur externe. SAPIEN a été qualifié au sein de l'IFSTTAR comme logiciel de recherche. L'objectif final de ce processus est de déposer SAPIEN avec une licence appropriée à l'Agence pour la Protection des Programmes (APP) et de permettre de développer le code autour d'une communauté de SMA-Transport en mettant le code source sur un site de développement de logiciels libres.

12. The REcursive Porous Agent Simulation Toolkit

souvent être codées dans les autres outils orientés agent (e.g. JADE). De plus, REPAST bénéficie d'une importante communauté d'utilisateurs animée par une liste de diffusion très réactive. Cette communauté a montré son intérêt pour la simulation de trafic avec la rédaction de rapports [North, 2010] et l'organisation de workshops [Abbas, 2012].

Enfin, REPAST est multi-plateforme (Windows, Mac, Linux), il est compatible avec de nombreux langages (e.g. JAVA et C), intègre de nombreux outils libres (SQL, MatLab, Weka, iReport, Pajek, Terracotta) et peut s'interfacer avec des systèmes d'information géographique (SIG). Par ailleurs, SAPIEN étant développé sur un « plug-in » (REPAST), il pourrait lui-même être vu comme un plug-in, et donc plus facile d'accès que des applications « stand-alone » (indépendantes).

4.2 Représentation du réseau routier

Dans ce cadre, le besoin principal est de créer l'environnement simulé, autrement dit le réseau d'écoulement commun aux véhicules. Les agents véhicules sont attachés à ce réseau. Grâce à leurs coordonnées sur le réseau, les agents peuvent percevoir leur voisinage. Suite à la perception de celui-ci, les agents prennent leurs décisions et exécutent leurs actions sur l'environnement.

Pour créer le réseau routier, on s'est inspiré du formalisme XML « EuroRoadS » [EuroRoadS, 2012] qui fournit un modèle de réseau routier définissant ses caractéristiques et une méthode pour relier les attributs et les caractéristiques au réseau. Dans ces schémas, l'environnement est représenté par un graphe orienté (voir Figure 4.1).

Les arcs représentent les routes. Chaque route contient au moins une voie et chaque voie a une largeur et un sens qui est défini par rapport au sens de l'arc. Ces spécifications à propos de la création des arcs et des routes sont décrits par un fichier XML. Les agents-véhicules (ou conducteurs) sont attachés à un point kilométrique sur une voie d'un arc.

Dans notre réseau, les carrefours sont des points géométriques (à 3 coordonnées). Ils délimitent les arcs et donc désignent les sommets de ces derniers. Nous avons hérité du type « junction » à partir du schéma XML d'EuroRoadS. Ainsi, chaque nœud représente un carrefour dans le réseau d'écoulement. Les coordonnées de ces nœuds sont saisis dans un fichier XML.

La géométrie d'un carrefour est désignée par les attributs des arcs qui se croisent à ce carrefour. Les voies entrantes et sortantes ainsi que leur sens de circulation possible délimitent le nombre de mouvements possibles dans le carrefour. Avec SAPIEN, nous avons implanté deux carrefours en croix, l'un dans le cadre du projet SICAP¹³ et l'autre, le carrefour à Reggio Calabria en Italie dans le cadre de ma thèse (voir section 5.1).

L'environnement peut être peuplé avec différents agents comme des véhicules, des piétons et des feux tricolores. Pour tester notre modèle de perception, nous allons nous concentrer sur un environnement restreint contenant seulement des agents-conducteurs.

Ci-après, nous allons voir les détails de notre modèle d'agent-conducteur.

13. Simulation de traversée de Carrefour par des Piétons, projet soutenu par la Fondation Sécurité Routière

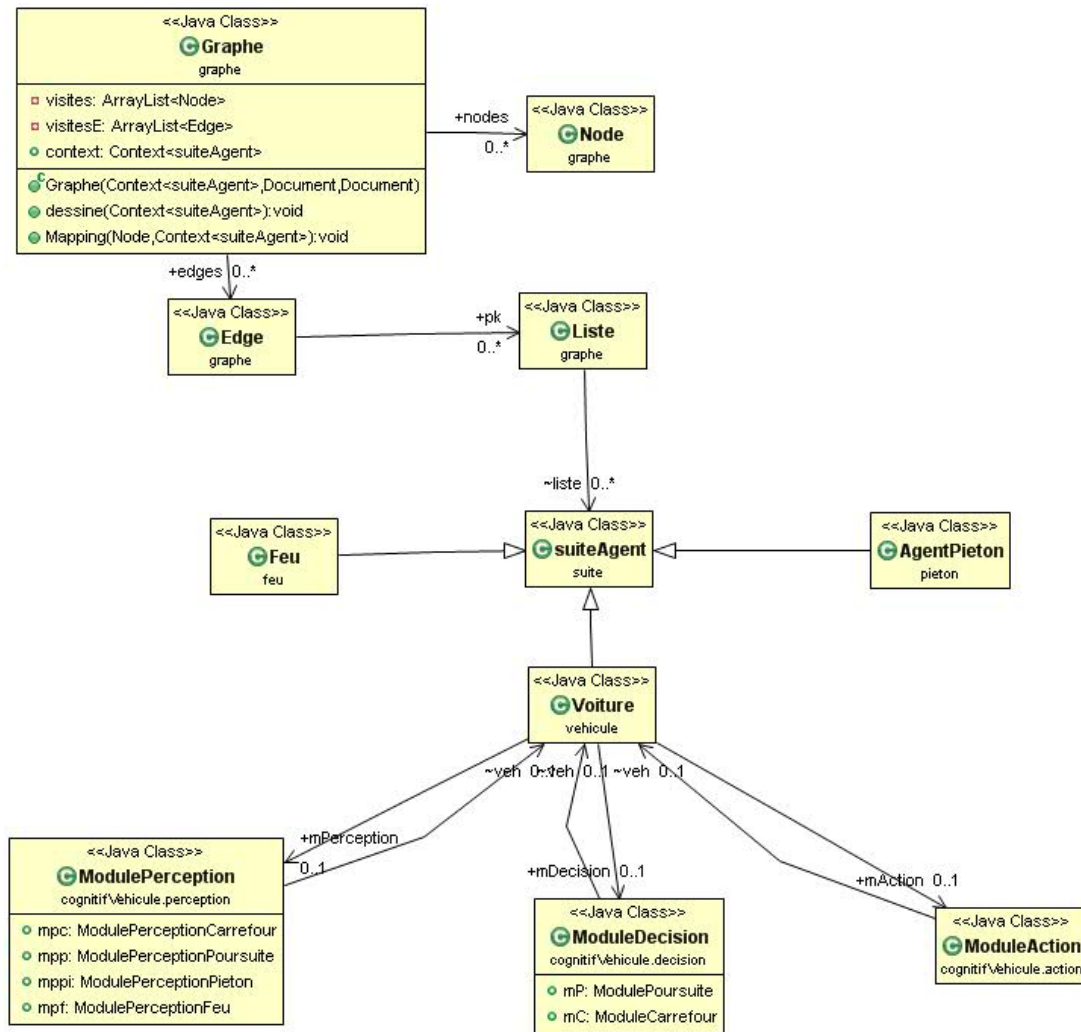


FIGURE 4.1 – La structure du graphe utilisé et les différents types d'agents inclus. La classe `suiteAgent` est la superclasse de tous les agents. Un `suiteAgent` est accroché à l'arc (`Edge`) par l'intermédiaire de `Liste`.

4.3 Agent-Conducteur

Avec notre outil de simulation, nous voulons examiner l'influence de notre modèle de perception humaine sur le comportement des conducteurs en carrefour où la tâche de conduite est relativement difficile à cause de la multiplicité des informations nécessaires pour traverser le carrefour. Au regard de cet objectif, nous avons modélisé le comportement du conducteur dans un domaine restreint et nous utilisons quelques paramètres prédéfinis pour modéliser le comportement des conducteurs au niveau opérationnel, tactique et stratégique.

L'environnement modélisé contient des routes avant et après le carrefour (sur une distance égale à 400 mètres pour le carrefour simulé, voir le chapitre 5). Les agents-conducteurs établissent avant de démarrer leur plan stratégique (relatif à leur destination). Les entrées des véhicules dépendent du débit de la route sur laquelle les véhicules sont générés. Donc, la date de création et le trajet de chaque véhicule sont imposés par les données de trafic du carrefour modélisé (les débits d'entrée et la matrice d'origine/destination observés). Ainsi, chaque véhicule a *un temps de création* dans la scène et des *point d'entrée et sortie*.

4.3.1 Décision

Dans notre modèle, nous avons implémenté deux tâches qui correspondent aux tâches des conducteurs à l'approche et à l'intérieur d'un carrefour : la poursuite et la traversée de carrefour. Chacune requiert un certain nombre de paramètres selon le carrefour à tester (urbain, signalisé...etc). La décision issue de l'application de ces deux sous-tâches contrôle l'accélération longitudinale du véhicule sur le trajet.

L'agent peut engager plusieurs sous-tâches en même temps. En carrefour, selon ses perceptions, il active la sous-tâche de « traverser le carrefour » et/ou la sous-tâche de « poursuite ». Il calcule une valeur d'accélération (ou décélération quand elle est négative) en exécutant les sous-tâches activées et finalement, il choisit et applique l'accélération la plus contraignante (la plus faible).

4.3.1.1 Sous-tâche de poursuite

Concernant le comportement en conduite en file, l'agent cherche à atteindre sa « vitesse désirée » qui est un des paramètres de notre modèle, à moins qu'un autre conducteur devant lui ne l'en empêche. L'interaction entre deux agents consécutifs a été implantée selon une loi de poursuite. Nous avons choisi le modèle « Intelligent Driver Model » [Kesting et al., 2009] (Voir Section 2.1.3.1).

4.3.1.2 Sous-tâche de traversée de carrefour

Comme nous l'avons vu en section 3.2.2, nous avons adopté un modèle multi-agent pour modéliser la traversée de carrefour des conducteurs.

Concernant le comportement en carrefour, il s'agit d'un problème ayant précédemment fait l'objet de différents travaux dans le domaine multi-agent [Champion, 2003, Doniec,

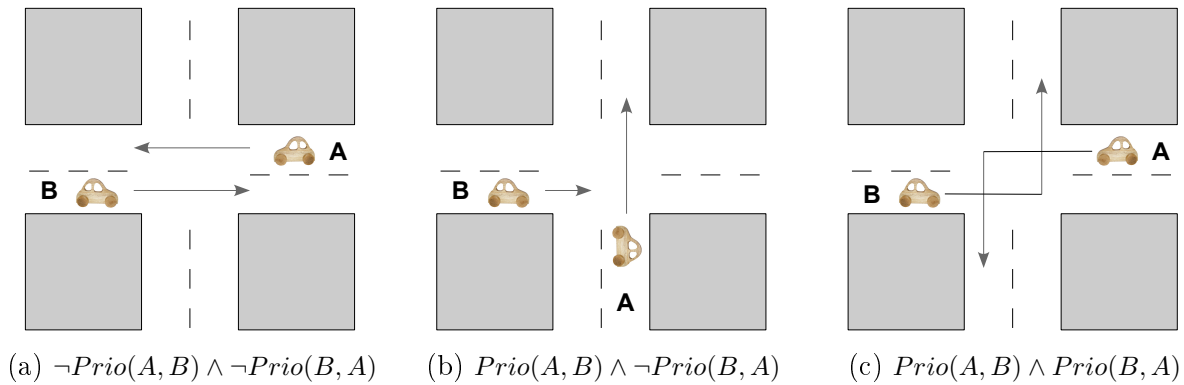


FIGURE 4.2 – Types de jeu dans l'algorithme de Champion

2006, Mandiau et al., 2008]. Champion a proposé un algorithme influencé par la théorie des jeux. Il définit trois types de relation (Voir Fig. 4.2) par rapport au code de la route dont chacune correspond à une matrice de jeu, la décision étant de type GO/STOP.

Les jeux se forment de plusieurs relations (donc plusieurs matrices) à deux joueurs (entre le sujet et un adversaire). Ces matrices contiennent les valeurs d'utilité (les gains). La somme des utilités permet de calculer le gain de l'action « aller ». L'utilité associée à la décision de « stopper » est toujours nulle. Si le gain « aller » est supérieur à 0, le conducteur avance, sinon il freine pour s'arrêter.

Dans la réalité, le code de la route (comme pour d'autres normes écrites) n'est pas toujours respecté en raison de l'absence de sanction prévisible (e.g. un policier ou un radar) [Doniec, 2006]. Les buts, les motivations et les désirs de chaque individu émergent et établissent de nouvelles règles spécifiques pour évaluer la situation, en cas d'absence d'autorité [Bjorklund and Aberg, 2005]. Dans [Doniec, 2006], cette approche est définie sous le nom de « comportement opportuniste » et les règles de décision sont exposées dans [Doniec et al., 2008]. Nous allons nous inspirer de ces algorithmes [Champion, 2003, Doniec, 2006] pour l'implantation de notre modèle.

4.3.1.3 Règles de comportement

Pendant la phase d'implantation durant ma thèse, j'ai étudié l'évolution de l'algorithme de Champion et j'ai remarqué qu'avec les règles comportementales dans le cadre du « comportement opportuniste », la matrice de jeu $Prio(A, B) \wedge Prio(B, A)$ n'est jamais utilisée pour le calcul de gain. Quand un telle situation se produit, la décision est divisée en deux jeux tel que $Prio(A, B) \wedge \neg Prio(B, A)$ ou $\neg Prio(A, B) \wedge Prio(B, A)$ pour traiter séparément les deux conflits à l'entrée et à la sortie du carrefour.

Par ailleurs, la matrice du jeu de $\neg Prio(A, B) \wedge \neg Prio(B, A)$ qui représente le cas où il n'y a pas de conflit entre deux véhicules et qui donne le même gain (ou coût) à deux « adversaires » qui ne sont pas des vrais adversaires. Cette matrice a un rôle dans le système d'équation originale pour minimiser le nombre de situations insolubles (à 3, 4 ou 5 joueurs). Néanmoins, si une de ces matrices n'est jamais utilisée (celle de $Prio(A, B) \wedge Prio(B, A)$), leur système d'inéquations [Champion, 2003] devient non-fonctionnel et on n'est pas obligé d'utiliser cette dernière matrice qui ne représente pas un cas de conflit.

Finalement, l'algorithme de Champion [Champion, 2003] a été réduit à un seul type de jeu qui est représenté par une seule matrice (et son inverse) qui est celle de $Prio(A, B) \wedge \neg Prio(B, A)$ (et $\neg Prio(A, B) \wedge Prio(B, A)$).

Si on reprend le cadre illustré dans [Doniec, 2006], il y a 3 règles à respecter pour une voiture x qui vient d'une route secondaire et qui a un stop devant elle :

- x doit s'arrêter au moins trois secondes,
- x doit laisser la priorité aux flux principaux sur la voie prioritaire,
- x ne doit pas entrer dans le carrefour, s'il n'est pas sûr d'en sortir.

Selon l'algorithme de Champion, x serait dans le cas $\neg Prio(x, y) \wedge Prio(y, x)$ contre un véhicule y qui est dans le flux principal. Cette situation mène à des durées d'attentes extrêmement longues. Pour y remédier, il a proposé différents types de priorité qui recouvrent les règles du code de la route. [Doniec, 2006] a présenté et illustré ces concepts de priorité par rapport à la vitesse, l'impatience et l'engagement dans le carrefour :

- la priorité par rapport à l'impatience : si le temps d'attente à l'entrée du carrefour dépasse un seuil, le conducteur n'a plus de patience et il se considère comme prioritaire par rapport aux autres ;
- la priorité par rapport à la vitesse : si le temps au conflit d'un conducteur non-prioritaire est inférieur au temps au conflit d'un conducteur prioritaire, alors il se voit comme prioritaire ;
- la priorité par rapport à l'engagement : si un conducteur est déjà engagé sur la zone de conflit, il devient prioritaire.

Dans un autre travail, [Doniec et al., 2008] a présenté formellement les règles de « comportements opportunistes » (non-normatifs) des conducteurs qui étendent les priorités par rapport au code de la route (e.g. priorité à droite). Dans mon travail, j'ai réduit le code de la route à la gestion de la patience de l'agent, un agent qui n'est pas prioritaire à l'entrée du carrefour sera plus patient qu'un agent qui est prioritaire dans cette situation.

Pour expliquer ces règles, nous devons d'abord introduire les notions élémentaires décrits dans le Tableau 4.1.

Prédicat	Description
$Impatient(x)$	Vrai si le véhicule x est en attente sur une voie prioritaire ou en attente depuis 3 sec devant le signe stop
$FaibleVitesse(x)$	Vrai si la vitesse de x est inférieure à 5 m/s (18 km/h)
$Acc(x)$	Vrai si l'accélération de x est positive
$Loïn(x, y)$	Vrai si le temps au conflit de x est supérieur à celui de y supposant qu'ils vont conserver leurs vitesses actuelles
$PeutAtteindre(x, y)$	Vrai si le temps au conflit de x est inférieur à celui de y supposant que x va atteindre à son accélération maximale

TABLE 4.1 – Prédicats élémentaires qui permettent de définir des règles comportementales plus complexes.

Par exemple, un signe « stop » rend l'agent plus patient vis-à-vis du temps perdu à l'entrée du carrefour, et il ne force pas le passage jusqu'à un certain seuil d'impatience.

Suite au dépassement de ce seuil d'impatience, l'agent x force ou ne force pas le passage selon les 2 règles suivantes :

$$\begin{aligned} & \text{Impatient}(x) \wedge \text{FaibleVitesse}(x) \wedge \text{PeutAtteindre}(x, y) \\ & \quad \rightarrow \text{Prio}(x, y) \wedge \neg \text{Prio}(y, x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Impatient}(x) \wedge \text{FaibleVitesse}(x) \wedge \neg \text{PeutAtteindre}(x, y) \\ & \quad \rightarrow \neg \text{Prio}(x, y) \wedge \text{Prio}(y, x) \end{aligned}$$

Si l'agent x est impatient et a une vitesse supérieur à 5 m/s, on exécute un autre ensemble de priorités, dont voici deux exemples, les relations étant présentées dans leur intégralité en Annexe (voir Annexe A.1) :

$$\begin{aligned} & \text{Impatient}(x) \wedge \neg \text{FaibleVitesse}(x) \wedge \text{Loin}(x, y) \\ & \quad \rightarrow \neg \text{Prio}(x, y) \wedge \text{Prio}(y, x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Impatient}(x) \wedge \neg \text{FaibleVitesse}(x) \wedge \neg \text{Loin}(x, y) \wedge \text{FaibleVitesse}(y) \wedge \text{Acc}(y) \wedge \text{PeutAtteindre}(y, x) \\ & \quad \rightarrow \neg \text{Prio}(x, y) \wedge \text{Prio}(y, x) \end{aligned}$$

Si l'agent x n'est pas impatient, il n'a pas tendance à se considérer comme prioritaire et à forcer le passage. Pourtant, selon la distance au conflit, la vitesse et l'accélération instantanée de l'adversaire y , l'agent x peut choisir de passer avant l'agent y . Par exemple :

$$\begin{aligned} & \neg \text{Impatient}(x) \wedge \neg \text{FaibleVitesse}(x) \wedge \neg \text{Loin}(x, y) \wedge \text{FaibleVitesse}(y) \wedge \text{Acc}(y) \wedge \neg \text{PeutAtteindre}(y, x) \\ & \quad \rightarrow \text{Prio}(x, y) \wedge \neg \text{Prio}(y, x) \end{aligned}$$

Et dans les situations où l'agent x n'est pas impatient, il se considère comme non-prioritaire quand :

$$\begin{aligned} & \neg \text{Impatient}(x) \wedge \text{FaibleVitesse}(x) \wedge \text{Loin}(x, y) \\ & \quad \rightarrow \neg \text{Prio}(x, y) \wedge \text{Prio}(y, x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \neg \text{Impatient}(x) \wedge \neg \text{FaibleVitesse}(x) \wedge \text{Loin}(x, y) \\ & \quad \rightarrow \neg \text{Prio}(x, y) \wedge \text{Prio}(y, x) \end{aligned}$$

$$\neg \text{Impatient}(x) \wedge \text{FaibleVitesse}(x) \wedge \neg \text{Loin}(x, y) \wedge \text{FaibleVitesse}(y) \wedge \text{Acc}(y) \wedge \text{PeutAtteindre}(y, x)$$

$$\rightarrow \neg Prio(x, y) \wedge Prio(y, x)$$

$$\begin{aligned} \neg Impatient(x) \wedge \neg FaibleVitesse(x) \wedge \neg Loin(x, y) \wedge FaibleVitesse(y) \wedge Acc(y) \wedge PeutAtteindre(y, x) \\ \rightarrow \neg Prio(x, y) \wedge Prio(y, x) \end{aligned}$$

L'intérêt d'étudier les situations de carrefour réside dans la nécessité pour les agents de coordonner leurs actions pour éviter les interblocages et les accidents en présence de situations compétitives. Nos travaux s'appuient sur les algorithmes de [Mandiau et al., 2008] et [Doniec et al., 2008] : le conducteur simulé prend en compte tous les joueurs à l'approche du carrefour, et décide à chaque pas de temps d'avancer ou de s'arrêter selon son évaluation des priorités par rapport aux autres joueurs en tenant compte des règles de priorité présentées plus haut. Chaque relation binaire est représentée par une matrice de gain. Dans les travaux précédents, quatre types de relation ont été définis donc quatre matrices différentes. Nous n'utilisons que 2 matrices $Prio(x, y) \wedge \neg Prio(y, x)$ et son complémentaire $\neg Prio(x, y) \wedge Prio(y, x)$. Le gain (ou le coût) final pointe la décision de GO ou de STOP. Cette décision GO/STOP est ensuite traduite en accélération. Cette traduction est faite en utilisant le même modèle d'accélération que dans la loi de poursuite.

La présentation de ces règles était indispensable à l'exposition de nos résultats au chapitre suivant. Un des indicateurs que nous avons utilisé est le nombre de situations accidentogènes. Ces situations accidentogènes peuvent être dues au modèle de perception ou au modèle de décision. Pour identifier le nombre des situations accidentogènes dues à la décision, la performance de la simulation est testée aussi avec une perception complète de l'environnement. Les résultats de ces simulations seront examinés en détail au chapitre 5.

4.3.2 Perception par un Agent Conducteur

Un modèle de perception dans le contexte de la simulation de trafic n'est pas un sujet suffisamment étudié et généralement il est pris dans un sens passif et unidirectionnel. L'agent perçoit l'environnement, ainsi que tous les autres agents et les artefacts grâce à ses « capteurs ». L'objectif de la perception est de percevoir autant de données que possible et de les transmettre au module de décision. A partir de cet ensemble de données brutes, l'agent choisit l'information utile afin de réaliser ses buts actuels. Donc la perception va de l'environnement vers le module de décision et elle est réduite à une simple interface entre les deux.

Néanmoins, un agent est créé pour un (ou plusieurs) objectif(s). Nous supposons qu'il a au moins un but et quelques tâches à accomplir afin d'atteindre son but. La perception a ainsi un rôle actif dans l'architecture de l'agent. Elle est le médiateur entre l'agent et l'environnement et répond aux nécessités du but courant. Pour cette raison, on ne peut pas la considérer comme un module passif et unidirectionnel. Cette question est examinée en détail dans [Wykowska and Schubo, 2012].

Dans le contexte du trafic, les connaissances de l'agent conducteur lui permettent de sélectionner les zones de l'espace de circulation qui contiennent probablement les informations pertinentes vis-à-vis à l'intention courante. Ainsi, le module de décision oriente

la perception afin d'acquérir les informations relatives à un sous-ensemble de l'environnement. Par opposition aux approches traditionnelles, cet aspect de la perception correspond à une perception dirigée du module de décision vers l'environnement (voir Fig. 3.4). Dans cette approche, l'agent est capable de percevoir activement son environnement de façon dépendante du but.

La perception vise à fournir une liste de percepts, i.e. les valeurs des attributs de certaines entités visibles dans l'environnement. Cette liste sera utilisée pour la décision et l'action. Dans la simulation à base d'agent, les percepts sont les données à propos des autres entités. Nous avons défini l'environnement simulé comme un ensemble d'entités (e.g. voitures) (voir section 3.2.4). Chaque entité a un ensemble de propriétés et un état décrit par ses propriétés.

Dans l'environnement simulé, toutes les entités peuvent être a priori perçues par l'agent, mais il serait plus réaliste de simuler un domaine de vision qui est restreint par les obstacles dans l'environnement (e.g. impossible de percevoir derrière les murs). Dans notre environnement simulé, nous n'avons pas tenu compte des entités mobiles ou fixes en tant qu'obstacle qui empêche la perception (e.g. bâtiments, arbres, poids lourds et véhicules légers). Dans l'état actuel, notre modèle est construit sur l'hypothèse que ce qui est vrai doit être connu par l'agent. À chaque pas de simulation, l'agent perçoit des entités dans l'environnement : celles qui sont perçues prennent leur place dans le modèle de décision et celles qui ne sont pas perçues ne sont pas considérées.

Dans ce modèle, les obstacles perceptifs créeraient des changements brusques et temporaires de décision. Par exemple, en s'approchant du carrefour, un agent x perçoit un autre agent y qui arrive au carrefour en venant de la voie droite, et il le considère comme prioritaire. Quelques pas de temps après, un abri bus à l'entrée de carrefour empêche la perception de y par x et x se voit comme prioritaire. Après l'abri de bus, x voit encore une fois y et considère y encore une fois comme prioritaire. Pour empêcher ces changements brusques, temporaires et non crédibles (car x doit savoir normalement que y n'a pas disparu), nous avons choisi de ne pas modéliser les obstacles perceptifs. Ce choix pourra être remis en cause si la mémoire et l'anticipation sont introduites dans le modèle.

Par ailleurs, il serait possible de simuler une succession d'acquisitions selon le mouvement de la tête et des yeux. Pour cela, un modèle quantitatif de perception est nécessaire. Actuellement, au sein du LEPSIS, des expérimentations sur ce sujet¹⁴ sont en cours et ses résultats pourront sans doute être intégrés dans notre modèle, à moyen terme.

Par conséquent, nous nous sommes intéressés à la simulation des focus et de la capacité limitée de l'être humain. Dans la section suivante, nous présentons les choix effectués pour appliquer le modèle de perception exposé dans le chapitre 3. Nous avons prêté une attention particulière à l'implantation du modèle de façon à pouvoir améliorer les critères et les fonctions présentés ci-dessous lors de futures recherches.

4.3.2.1 Perception Top-down

Parmi toutes les entités perceptibles, seule une partie a une relation directe avec le but courant de l'agent. Le processus top-down oriente les focus de perception vers les parties

14. Dans le cadre de la thèse de Sophie Lemonnier à l'IFSTTAR [Lemonnier, 2012]

de l'environnement qui potentiellement contiennent les entités ayant une relation avec le processus de décision.

Dans le contexte de la simulation de trafic, l'agent-conducteur veut atteindre sa destination sans avoir accident. Pour ce faire, l'agent définit un ensemble des zones de conflit potentiel vers lesquelles il dirige ses focus de perception. Pour les conducteurs, ces zones sont définies spatialement et pour certains types d'entités (e.g. véhicules, piétons, panneaux, etc.).

Dans ces zones, la perception des entités pertinentes pour la tâche de conduite (e.g. les autres véhicules, les piétons, les feux tricolores) sont utilisées pour détecter les conflits potentiels. Notamment pendant la traversée de carrefour, l'agent-conducteur détermine les conflits potentiels sur sa trajectoire en utilisant l'information du réseau routier. Ensuite, il oriente son attention vers ces zones (e.g. les voies entrantes) à partir desquelles les nouveaux agents peuvent venir et entrer en conflits.

Chaque agent oriente son attention afin de réaliser l'*acquisition* des entités avec lesquelles le(s) conflit(s) peu(ven)t se produire. L'ensemble de focus se traduit ici par un type d'entités, les véhicules, et des zones géographiques où des conflit peuvent survenir. Dans un premier temps, l'agent définit l'ensemble C des conflits potentiels c_i qu'il a détecté sur son trajet. Ensuite, l'agent trie les conflits selon la distance $d(c_i)$ entre sa position actuelle et le conflit c_i . Un conflit plus proche sera plus prioritaire pour l'agent. Donc, la distance a été choisie comme le premier critère pour le calcul de pertinence des percepts top-down :

$$\forall (c_i, c_j) \in C^2, c_i \leq c_j \iff d(c_i) \leq d(c_j)$$

où \leq entre les conflits désigne la relation d'ordre de priorité.

Chaque conflit c_i dans C est défini par les entités impliquées dans le conflit, leur ensemble étant noté $E(c_i) \subseteq E_p$ (voir section 3.3). L'agent acquiert donc un ensemble d'entités *ATD* appartenant aux zones de conflits potentiels. Le conflit d'appartenance est ici une donnée contextuelle importante pour le tri des percepts formés à partir des entités issues du processus top-down.

Toutes les entités dans $E(c_i)$ ne sont pas également impliquées : plus ils sont proches de la zone de conflit, plus ils sont pertinents pour prendre une décision sur la traversée de carrefour. Donc, l'agent attribue une valeur de pertinence $r(e_j, c_i)$ à toute entité e_j impliquée dans un conflit c_i inclut dans C . À l'aide de cette valeur, un deuxième tri est exécuté pour les entités participant à chaque conflit. La pertinence de chaque $e_j \in E(c_i)$ par rapport à c_i est inversement proportionnelle au temps $t(e_j, c_i)$ entre l'entité et la zone de conflit :

$$r(e_j, c_i) = \frac{1}{t(e_j, c_i) + 1}$$

Par conséquent, le calcul de pertinence (top-down) des percepts e_j est basée sur les valeurs de $r(e_j, c_i)$. Comme le résultat de la perception est divisé sur la base des conflits potentiels, une entité peut apparaître plusieurs fois si elle est impliquée dans plusieurs conflits, avec une valeur de pertinence différente.

4.3.2.2 Perception Bottom-up

Dans certaines situations, la perception des percepts saillants mais moins pertinents interfère dans le processus et empêche la perception des percepts plus pertinents mais moins saillants. Dans notre modèle, un processus bottom-up peut orienter l'attention vers les entités peu ou pas pertinentes.

Nous avons effectué une implémentation simplifiée de ce processus de perception bottom-up. L'ensemble ABU issu de l'*acquisition* bottom-up est réduit à l'ensemble ATD issu de l'acquisition top-down. Le calcul de saillance (bottom-up) attribue une valeur de saillance aux percepts correspondants. Donc, le processus bottom-up simulé consiste à prendre en compte la saillance des entités environnementales perçues pour les percepts pertinents afin d'atténuer l'effet de la pertinence (top-down) et de simuler un processus automatique et inconscient.

Afin de simuler ce processus automatique et indépendant du but, nous avons ajouté pour chaque agent un attribut relatif à chaque entité perçue e_j : la valeur de saillance $s(e_j)$ dépend de la taille apparente de l'entité $s_1(e_j)$ et de sa vitesse relative $s_2(e_j)$ du point de vue de l'agent a .

$$s(e_j) = s_1(e_j) \cdot s_2(e_j)$$

Le processus bottom-up apparaît donc ici uniquement en tant que « bruitage » du processus de perception volontaire : il peut remettre en cause le tri issue du processus top-down (voir partie suivante), mais en aucun cas il n'ajoute des percepts non-pertinents. Il s'agit d'une simplification dont nous discuterons dans le chapitre 6.

4.3.2.3 Tri des percepts issus des deux processus de perception

L'intégration de la perception consciente (top-down) et non-consciente (bottom-up) est effectuée par le calcul d'une valeur d'importance pour chaque entité e_j perçue dans le contexte d'un conflit. La valeur d'importance dépend du conflit considéré, i.e. une entité peut avoir différentes valeurs de pertinence dans les contextes de différents conflits. La valeur d'importance est la combinaison de deux valeurs retournées par les deux processus de perception : $s(a, e_j)$ et $r(e_j, c_i)$.

La méthode d'intégration des valeurs de saillance et de pertinence n'est pas facile à déterminer. Nous remarquons d'abord que les unités de saillance et de pertinence ne sont pas comparables. Dans notre implantation, la fonction fc qui combine les deux est réduite au produit scalaire de la saillance (indépendante du conflit) et de la pertinence (dépendante du conflit). Puisque la pertinence r dépend du conflit, on a fc qui dépend aussi du conflit :

$$\forall c_i \in C, \forall e_j \in E(c_i), fc(c_i, e_j) = s(e_j) \cdot r(e_j, c_i)$$

Selon cette valeur d'importance, l'agent trie (*PerceptList*) les entités impliqués dans les conflits :

$$\forall c_i \in C, \forall (e_j, e_k) \in E(c_i)^2, \\ e_j \leq e_k \iff fc(c_i, e_j) \leq fc(c_i, e_k)$$

La liste (*OrderedPList*) de percepts contient donc des entités contextualisées par les conflits dans lesquels elles apparaissent. Une même entité e_j peut apparaître plusieurs fois dans la liste, avec des valeurs différentes d'importance.

4.3.2.4 Sélection ou Mémoire limitée

Afin de simuler la capacité limitée de la perception, le nombre de percepts qui accèdent au module de décision est limité selon un seuil (n) (dont nous étudierons la valeur au chapitre 5).

La liste triée des conflits C est ainsi raccourcie pour obtenir une liste limitée des conflits C_B telle que le nombre des entités dans C_B reste sous la limite n .

$$\sum_{c_i \in C_B} \text{card}(E_B(c_i)) \leq n,$$

avec $E_B(c_i)$ l'ensemble limité (*LimitedPList*) des entités prises en compte dans le conflit c_i . Comme la limite est sur les percepts (entités perçues) et non sur les conflits, la limitation peut causer la division d'un conflit en un sous-ensemble des percepts transmis au module de décision et un sous-ensemble de percepts non-transmis. Nous estimons que c'est une conséquence qui n'est pas irréaliste, la surcharge de la perception humaine peut mener à négliger des données qui auraient pu avoir un impact sur la décision de l'agent.

4.3.3 Fonctionnement général du modèle d'agent-conducteur

Ayant défini les notions importantes, nous pouvons expliquer les détails du fonctionnement de l'agent-conducteur. Les comportements de l'agent-conducteur diffèrent selon la position de celui-ci sur le réseau, soit en section courante, soit en carrefour.

Concernant le comportement en section courante, la vitesse de l'agent tend vers la vitesse désirée, à moins que les autres conducteurs ne l'en empêchent. L'interaction entre deux agents consécutifs a été implantée selon une « loi de poursuite » usuelle en simulation de trafic, comme expliqué en section 4.3.1.

L'intérêt du carrefour réside dans la nécessité pour les agents de coordonner leurs actions pour éviter les interblocages et les accidents en présence de situations de compétition. Nos travaux s'appuient sur l'algorithme expliqué à la section 4.3.1 : le conducteur simulé sélectionne un certain nombre de joueurs à l'approche du carrefour, et décide à chaque pas de temps d'avancer ou de s'arrêter selon son évaluation des priorités par rapport aux autres joueurs sélectionnés pour le jeu. La décision GO/STOP est ensuite traduite en une accélération grâce à la loi de poursuite. Par ailleurs, la loi de poursuite est toujours active pour gérer l'interaction du conducteur avec le véhicule de devant, même dans le carrefour. Le véhicule de devant varie selon le mouvement dans le carrefour (tourne-à-gauche, tourne-à-droite ou aller tout droit).

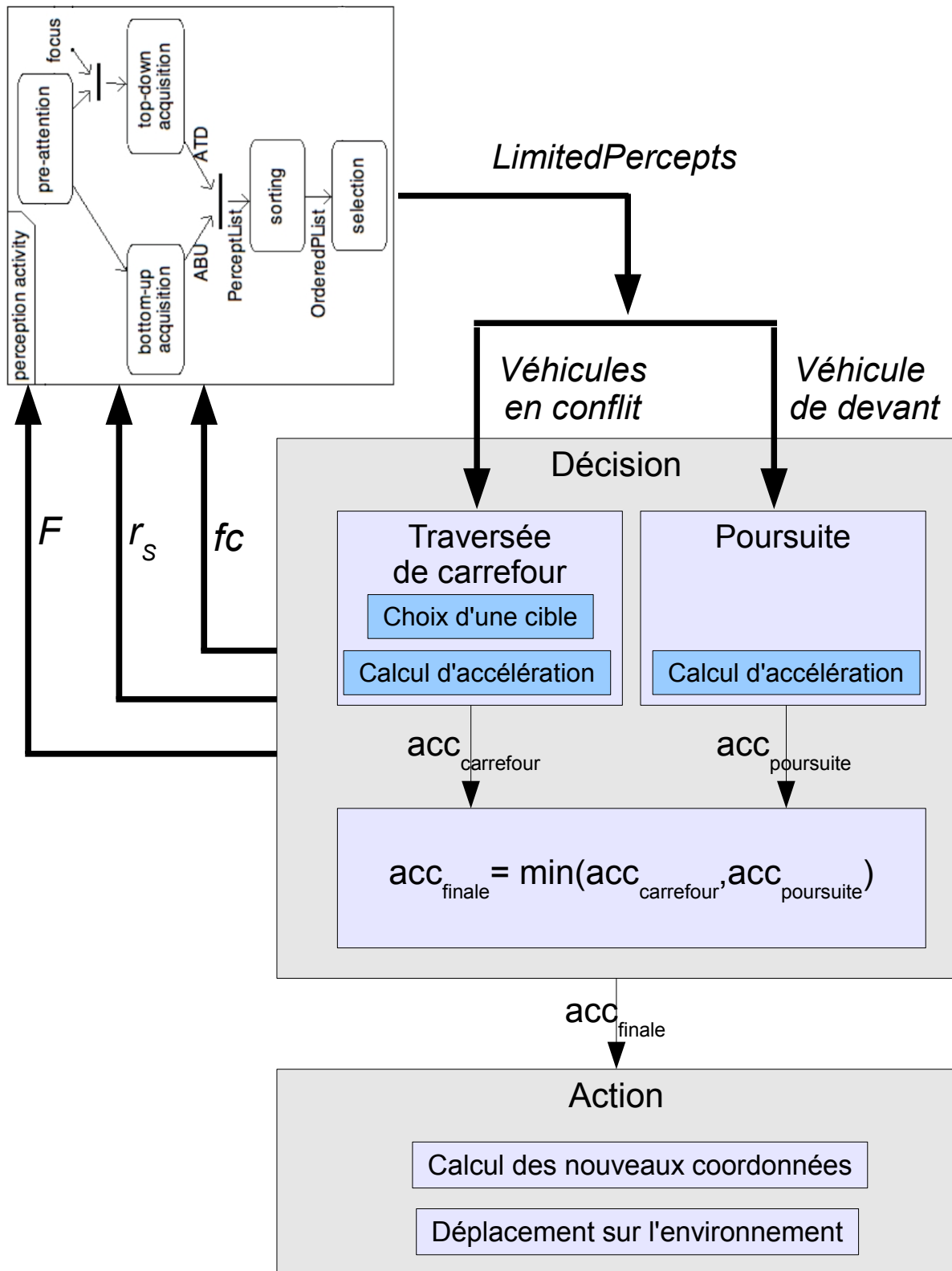


FIGURE 4.3 – Le modèle de conducteur : fonctionnement général.

Par conséquent, comme illustré sur la Figure 4.3, la perception permet d'accéder aux percepts suivants :

- un véhicule (« le véhicule de devant » sur la Figure 4.3) pour le comportement de poursuite ;
- une liste de véhicules (« les véhicules en conflit » sur la Figure 4.3) pour le comportement de traversée de carrefour.

Concernant la poursuite, la perception renvoie le véhicule le plus proche sur la trajectoire de l'agent comme étant le véhicule de devant, et la décision exécute la loi de poursuite pour calculer une première valeur d'accélération ($acc_{poursuite}$). En parallèle, la liste des véhicules en conflit permet l'application de l'algorithme de jeu pour la traversée de carrefour qui donne une liste des conflits avec les valeurs de priorité. L'agent calcule une deuxième accélération ($acc_{carrefour}$) en fonction du conflit le plus proche pour lequel il n'est pas prioritaire (dans ce cas, $acc_{carrefour} < 0$). Si l'agent n'a aucun conflit partagé avec les autres agents ou s'il se considère prioritaire pour tous les conflits présents en carrefour, il calcule $acc_{carrefour} (> 0)$ en vue d'atteindre sa vitesse désirée. Finalement, entre ces deux valeurs d'accélération, la plus contraignante (le minimum) est sélectionnée et transmise au module d'action. Le module d'action calcule les nouvelles coordonnées pour que l'agent se déplace.

Nous souhaitons attirer l'attention sur le fait que dans notre modèle, nous avons donné la priorité à la perception concernant la tâche de poursuite qui est une tâche de plus bas niveau que la traversée de carrefour dans le modèle cognitif des conducteurs.

4.4 Exemple d'Application

Après avoir vu le fonctionnement général du modèle dans le contexte du trafic, nous allons illustrer ce modèle par un exemple.

La situation présentée dans la Figure 4.4 est utilisée comme un exemple pour décrire le processus de perception, en considérant l'agent-conducteur du véhicule A qui veut tourner à gauche. Tout d'abord, il identifie les conflits potentiels au vu de l'aménagement du carrefour. Avec l'information des zones de conflit potentiel dans le carrefour, l'agent A oriente son attention vers les zones qui correspondent aux voies entrantes et vers l'intersection. Ces sont les zones qui contiennent potentiellement les autres véhicules dont les itinéraires croisent celui de l'agent A.

D'abord, l'agent perçoit les véhicules qui font partie de ses focus attentionnels. Les focus sont les zones d'intérêt qui peuvent inclure des agents avec lesquels l'agent courant est potentiellement en conflit. Dans le contexte de la conduite automobile, la zone du carrefour et les voies arrivant vers le carrefour correspondent aux focus de la traversée de carrefour. Donc, l'agent A perçoit les agents B,C,D,E,F et détecte les zones de conflit potentiel avec eux (Fig. 4.5). Un deuxième focus correspondant à la deuxième sous-tâche qui est la poursuite, est toujours actif afin de chercher un véhicule en aval de sa trajectoire. Dans cet exemple, l'agent A n'a pas de véhicule devant lui.

La perception des entités présentes dans ces zones conduit à définir 3 conflits potentiels c_i . Cette liste est triée par rapport à la distance au conflit du point de vue de A :

1. Conflit c_1 avec les véhicules B, C et F ;

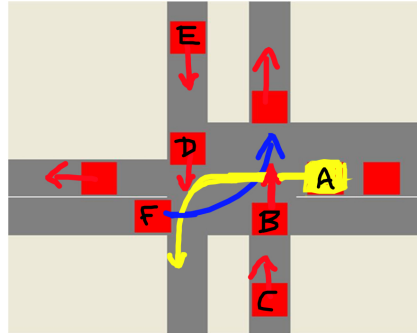


FIGURE 4.4 – La situation du carrefour du point de vue de l'agent A (les carrés représentent les véhicules et les flèches sont leurs directions)

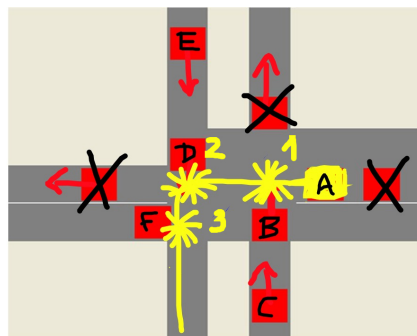


FIGURE 4.5 – Les zones de conflits potentiels de A sont 1, 2 et 3. Les véhicules marqués par une croix ne sont pas perçus par A.

TABLE 4.2 – Exemple de calcul par l'agent A de l'importance des percepts selon la situation en Fig. 4.4. Les entités sont indicées en fonction du conflit dans lequel ils sont considérés. Par exemple, le véhicule *D* apparaît en tant que D_2 dans le conflit c_2 et en tant que D_3 dans le conflit c_3 .

Conflit	Distance $d(c_i)$	Entité e_j	Saillance $s(e_j)$	Pertinence $r(e_j, c_i)$	Importance $fc(c_i, e_j)$
c_1	3	F_1	1.00	0.19	0.1900
		B_1	0.75	0.25	0.1875
		C_1	0.75	0.19	0.1425
c_2	6	D_2	0.60	0.25	0.1500
		E_2	0.50	0.20	0.1000
c_3	8	F_3	1.00	0.50	0.5000
		D_3	0.60	0.40	0.2400
		E_3	0.50	0.30	0.1500

2. Conflit c_2 avec les véhicules D et E ;
3. Conflit c_3 avec les véhicules D, E et F.

Supposons que les véhicules B, C, D et E aient la même taille et que F soit un poids lourd (avec une taille plus grande), que E et C aient une vitesse adaptée à la situation et soient en cour de freinage. Des exemples des valeurs de *saillance* et de *pertinence* et leur conséquence sur l'*importance* sont présentés dans le Tableau 4.2 pour illustrer le mécanisme de perception.

Quand on applique un seuil de perception n qui est égale à 4, la partie grise du Tableau 4.2 est éliminé. Les 3 percepts de c_1 sont conservés en laissant une seule ressource disponible pour traiter c_2 . Ensuite, grâce au tri, A trouve son principal « adversaire » en c_2 : D. Donc, le véhicule D sera traité pour le conflit c_2 (D_2 Tab 4.2) et le conflit c_3 sera totalement ignoré à ce stade car il ne reste plus de ressource disponible.

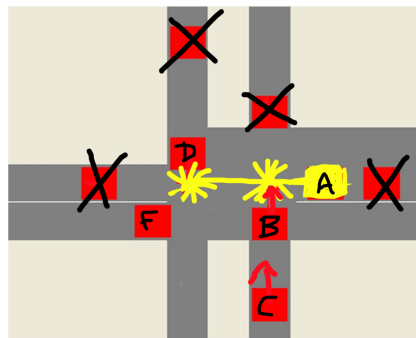


FIGURE 4.6 – Les conflits potentiels après application d'un seuil de perception $n = 4$.

À ce stade, on remarque la priorité donnée aux conflits pour le tri des percepts : D_2 est considéré après C_1 , bien que son importance $fc(c_2, D_2)$ soit supérieure à l'importance $fc(c_1, C_1)$.

A la fin de l'étape de perception, l'agent A a la représentation suivante (Fig. 4.6) :

1. Conflit c_1 avec les véhicules B, C et F ;
2. Conflit c_2 avec le véhicule D.

Puisqu'il n'y a pas de véhicule devant lui, l'agent A va prendre sa décision sur la base de quatre percepts. L'agent applique son algorithme de résolution de conflit séparément pour les conflits c_1 et c_2 . Si l'agent se considère comme non-prioritaire pour un de ces deux conflits, il diminue sa vitesse pour attendre à l'entrée de la zone de conflit où il est non-prioritaire jusqu'à ce que la situation change et qu'il se considère comme prioritaire. Par contre, si l'agent se considère prioritaire pour les deux conflits, il continue à se déplacer avec sa vitesse actuelle ou il accélère pour atteindre sa vitesse désirée.

En cas de détection d'un véhicule devant, une ressource disponible est utilisée par la sous-tâche de poursuite, ce qui laisse une capacité de traitement de trois percepts pour la traversée de carrefour.

4.5 Conclusion

Finalement, nous avons un outil schématisé par la Figure 4.7. Le modèle d'agent-conducteur qui est au cœur de cet outil a été présenté. Notre agent-conducteur exécute deux sous-tâches et le modèle de perception proposé dans la section 3.3 a été implanté dans un contexte de trafic avec la capacité de transmettre les informations nécessaires pour la réalisation de ces deux sous-tâches [Ketenci et al., 2010a, Ketenci et al., 2011b, Ketenci et al., 2012].

Les choix de l'implantation (e.g. la priorité de la poursuite sur la traversée de carrefour ou les critères de pertinence et de saillance) peuvent être remis en cause et modifiés lors de futures évolutions. Par ailleurs, il y a aussi la possibilité d'ajouter de nouvelles tâches dans ce modèle pour traiter l'interaction des agents avec les feux tricolores ou les panneaux de signalisation.

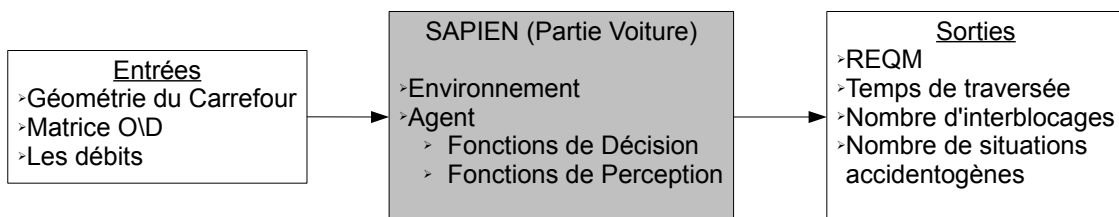


FIGURE 4.7 – Schéma simplifié de l'outil de simulation ; l'outil SAPIEN (en gris) comprenant la modélisation de l'environnement et des agents.

L'implantation du conducteur et de l'environnement avec l'outil de simulation SAPIEN ont été présentés dans ce chapitre (voir Figure 4.7). Les entrées de SAPIEN pour la partie conducteur sont l'aménagement (la géométrie) du carrefour, la matrice Origine/Destination et les débits. D'autre part, nous avons prévu un ensemble de données que notre outil peut délivrer en sortie de simulation : des données statistiques sur les

débits, le temps de traversée, le nombre d'interblocages, le nombre des situations accidentogènes. La limite n sur le nombre de percepts est implantée en tant que paramètre de l'agent-conducteur simulé.

Chapitre 5

Résultats

Pour les ingénieurs de trafic, malgré l'importance de la littérature sur l'influence du carrefour sur le comportement des conducteurs (e.g. le temps d'attente à l'entrée), il y a un manque de connaissances à propos des comportements de conducteurs au centre des intersections (Voir Section 2.1.3.3). Les modèles de simulation macroscopique du trafic ne considèrent pas ce qui se passe dans le carrefour, l'objectif est mis sur l'influence du carrefour sur le débit. D'autre part, les outils commerciaux de simulation de trafic microscopique (e.g. VISSIM, AIMSUN) simulent les interactions à l'approche du carrefour avec un modèle d'acceptation du créneau. Ils se concentrent sur la situation juste avant le carrefour (la durée d'attente, la longueur de la file d'attente), mais ils ne peuvent pas reproduire les interactions telles que le stockage dans le carrefour sans un artéfact (e.g. un panneau de signalisation virtuel).

Dans ce chapitre, nous explorerons l'utilisation possible de notre modèle nanoscopique (le modèle microscopique étendu par un modèle de perception inspiré du fonctionnement des processus perceptifs humains) avec une simulation qui pourrait permettre d'évaluer la performance du trafic routier au centre du carrefour. Le modèle de perception est proposé comme une solution potentielle pour aborder les comportements des conducteurs à l'intérieur du carrefour. En ce faisant, notre but est d'améliorer la crédibilité de modèles en général et de permettre une évaluation plus fine. Nous allons exposer les résultats des tests effectués avec ce modèle.

Le modèle proposé de perception humaine active et limitée sera illustré avec des exemples de simulation de trafic dans un carrefour. Pendant la traversée de carrefour, il y a beaucoup d'interaction à gérer, beaucoup d'informations pertinentes qui sont disponibles pour les conducteurs. Le conducteur peut être surchargé par ces informations. Cette surcharge dépend de la capacité perceptive du conducteur et cette capacité peut varier selon l'âge, l'expérience et le niveau d'alcoolisation de conducteur.

Dans un premier temps, nous avons utilisé un ensemble d'indicateurs dans un but d'évaluation : les débits, les interblocages, les temps de traversée et les situations accidentogènes.

D'abord, nous avons testé notre modèle pour étudier l'influence sur l'*écoulement du trafic* des différentes valeurs du seuil qui limite le nombre d'objets perçus (la valeur n du modèle). A la suite de travaux précédents [Champion, 2003, Doniec, 2006], nous avons comparé nos débits simulés avec les débits observés à un carrefour existant pour évaluer la

capacité du modèle à simuler la performance d'écoulement du trafic. Ensuite, nous avons comparé les écarts calculés avec ceux de travaux précédents pour évaluer la qualité de notre modèle.

Ensuite, nous avons cherché à expliquer un phénomène émergent qui est l'*interblocage*. Nous avons essayé d'interpréter la relation entre ce phénomène et le nombre d'objets perçus en introduisant le *temps de traversée* moyen de tous les véhicules de la simulation.

Après avoir vu ces phénomènes, nous avons examiné l'effet du seuil de perception sur une autre mesure qui peut permettre d'aborder la sécurité routière en simulation de trafic : les *situations accidentogènes*. Comme les simulations ne produisent pas d'accident, une situation accidentogène est décrite par une décélération très forte, irréaliste physiquement.

Dans un deuxième temps, nous avons traité l'influence d'une population hétérogène de conducteurs (avec un seuil de perception n variable) sur les mêmes indicateurs (débit, interblocage, temps de traversée, situations accidentogènes). De la même manière, nous avons simulé une population de conducteurs dont quelques uns ont un comportement anormal (e.g. le conducteur hypovigilant). Ces deux séries d'expériences illustrent la capacité du modèle à représenter une certaine variabilité comportementale.

En section 5.1, nous allons présenter le carrefour modélisé avec les données disponibles et les paramètres utilisés. Puis en section 5.2, nous allons montrer que notre modèle d'agent produit un comportement globale qui est cohérent avec les données de trafic disponibles du carrefour modélisé. Nous verrons également l'impact du seuil de perception sur les variables de trafic. Ensuite en section 5.3, nous montrerons que notre modèle peut simuler une population hétérogène (avec un seuil de perception qui varie selon le conducteur) ce qui conduit à des applications intéressantes comme la simulation d'une population hétérogène en terme d'âge ou d'expérience. Finalement en section 5.4, nous allons exposer, sur un exemple, la capacité d'adaptation des agents-conducteurs quand ils font face à un conducteur au comportement anormal.

5.1 Carrefour Simulé

Nous avons implanté un carrefour existant à Reggio di Calabria en Italie. Ce carrefour est un carrefour en croix (voir Fig. 5.1). Il y a une voie entrante et une voie sortante au nord, au sud et à l'ouest et deux voies entrantes et une voie sortante à l'est. Pour les chaussées nord et sud, il existe des terre-pleins centraux qui séparent les deux voies. Ces terre-pleins font que la surface circulaire du carrefour est grande ; il permet ainsi aux conducteurs d'attendre dans le carrefour (e.g. pour une traversée en 2 ou 3 étapes).

Les débits d'entrée de chaque branche connectée au carrefour sont présentés dans le Tableau 5.1. Ces débits ont été mesurés avec un intervalle de temps de 5 minutes [Champion, 2003]. La première ligne du Tableau 5.1 représente le débit en véhicule par heure des branches Sud, Ouest, Est, Nord pour les 5 premières minutes. La deuxième ligne montre les mêmes débits pour le deuxième intervalle de 5 minutes et ainsi de suite.

La matrice Origine/Destination (Voir Tab. 5.2) fournit les taux de mouvement tournant et droit pour chaque branche ¹⁵.

15. Le demi-tour n'est pas permis dans le modèle (cases nulles sur la diagonale)



FIGURE 5.1 – La vue du carrefour dans Reggio di Calabria (Italie) à partir du sud (en haut à gauche), de l'est (en haut à droite), de l'ouest (en bas à gauche), du nord (en bas à droite); Photos extraites de Google Street View.

TABLE 5.1 – Les débits d'entrée en véhicules pour une heure sur les 4 axes du carrefour de Reggio [Champion, 2003]

Intervalle de temps en min	Sud	Ouest	Est	Nord
0-5	672	60	360	876
5-10	876	12	588	708
10-15	816	24	420	600
15-20	780	48	468	732
20-25	732	24	480	588
25-30	888	0	372	672
30-35	972	36	396	672
35-40	840	24	372	624
40-45	864	24	396	756
45-50	804	24	504	636
50-55	768	12	300	744
55-60	780	24	480	612

TABLE 5.2 – La matrice Origine/Destination (%)

De \ Vers	Sud	Ouest	Est	Nord
Sud	–	16	7	77
Ouest	28	–	36	36
Est	43	2	–	55
Nord	82	17	1	–

5.1.1 Génération des scénarios et paramètres de simulation

Contrairement aux modèles de simulation macroscopique, les modèles microscopiques requièrent plusieurs réplications à cause de la génération aléatoire utilisée au moment de la création du scénario. En utilisant ces débits et la matrice d'origine destination (Tab. 5.2), nous avons exécuté 100 réplications d'une heure simulée, dans laquelle les véhicules simulés sont générés à 400 mètres en amont du carrefour. Les paramètres de la loi de poursuite (pour plus de détails voir Section 4.3.1) sont présentés dans le Tableau 5.3.

Paramètres	Valeurs
v_0	$\rightarrow N(v_d, \sigma)$ où $v_d = 50$ km/h et $\sigma = 1,66$ km/h
a	$= 1,4m/s^2$
b	$= -2m/s^2$
TIV	$\rightarrow N(t, \sigma)$ où $t = 1,2$ sec et $\sigma = 0,15$ sec
s_0	$= 0,9m$

TABLE 5.3 – Les paramètres de la lois de poursuite utilisés lors des simulations

Le délai de génération entre deux véhicules simulés est calculé, pour chaque intervalle de 5 minutes, par rapport aux débits de trafic observés $F(B)$ sur la chaussée correspondante, avec une distribution normale $N(t,s)$, où $t = 1/F(B)$ est le délai nécessaire entre deux véhicules pour que les débits simulés soient conformes sur la branche entrante B et l'écart type $s = 1$ sec. Quand un agent-conducteur est créé, il lui est attribué un itinéraire qui est choisi aléatoirement à partir de la matrice d'origine/destination (voir Tableau 5.2).

Les simulations ont été exécutées sur un PC Intel Core2 Duo CPU E6750 à 2.66GHz, avec 2 Go de RAM.

Dans ce travail, l'environnement est uniquement peuplé des véhicules virtuels. Il y a deux panneaux de signalisation (« stop » à l'Est et à l'Ouest) qui impactent la décision des agents. Concrètement, les panneaux de « stop » sont simulés par un seuil d'impatience plus élevé. Dans un premier temps, on n'a pas considéré les panneaux de signalisation comme des entités perçues car un panneau de « stop » qui ne change pas d'état avec le temps requiert un niveau de vigilance négligeable. Puisque ces panneaux ont un effet remarquable sur les débits, ils ont été modélisés comme appartenant à la connaissance de l'agent sur l'environnement. Par conséquent, les seules entités perçues à chaque pas de simulation sont les autres véhicules.

5.2 Influence de la capacité de perception

Nous allons examiner l'influence du paramètre de seuil qui limite le nombre d'objets perçus (n) en comparant la moyenne des performances d'écoulement (débit), le nombre d'interblocages, le temps de traversée et le pourcentage des décélérations fortes (situations accidentogènes et irréalistes) sur 100 répliques.

La comparaison des débits observés-simulés va servir à positionner notre modèle de conducteur par rapport aux travaux précédents et donc à évaluer sa capacité d'évaluation de la performance d'écoulement du trafic.

Le temps de traversée est complémentaire de cette première comparaison en nous permettant d'observer en détail le changement de comportement des conducteurs.

Le nombre d'interblocages produits au cours de 100 répliques nous fournit le moyen d'examiner la qualité du modèle général par rapport aux différentes valeurs du seuil de perception.

Finalement, nous allons lier le nombre de situations accidentogènes au nombre de décélérations fortes. D'une part cet indicateur permet d'évaluer le réalisme du comportement des conducteurs avec les différentes valeurs de n , d'autre part il représente une mesure d'évaluation pour une utilisation possible en sécurité routière.

5.2.1 Écoulement du trafic

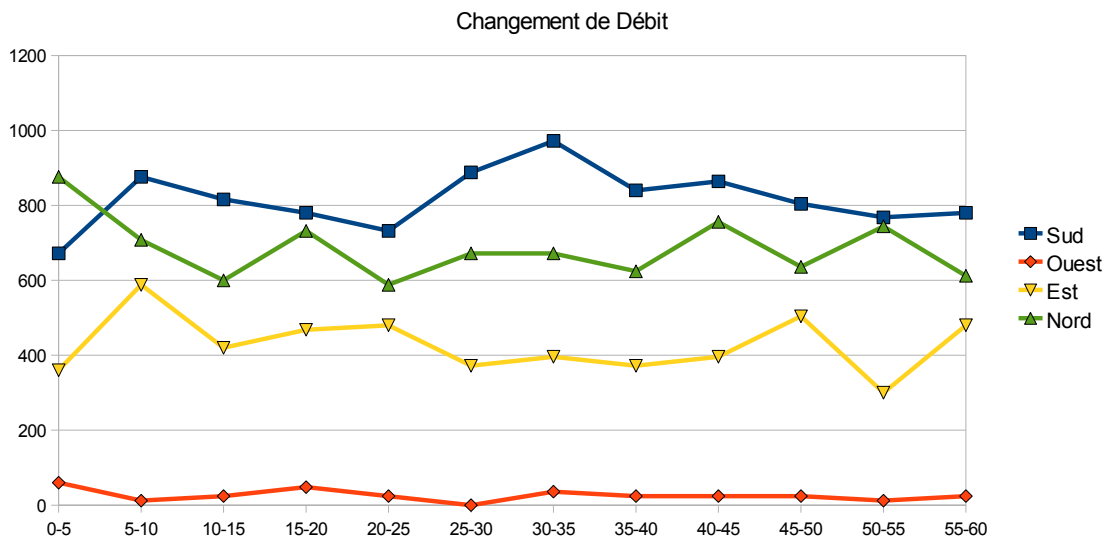


FIGURE 5.2 – Carrefour de Reggio di Calabria [Champion, 2003]. Les débits d'entrée observés sur chaque voie en fonction du temps écoulé.

Disposant de peu de données de trafic pour notre simulation, nous sommes conscients que nous ne pouvons valider notre modèle en nous reposant sur les seules données de débits d'entrée de la simulation. Pourtant ces données vont nous servir à tester la consistance

de notre algorithme (comme dans [Champion, 2003, Doniec, 2006, Mandiau et al., 2008]), sur l'écoulement du trafic au carrefour, en prenant l'hypothèse suivante :

Si les débits d'entrée simulés, mesurés en entrée de carrefour (Voir Fig. 5.2), sont proches de ceux observés, alors l'écoulement du trafic (et donc la résolution de conflits) est cohérent avec les données disponibles.

Pour vérifier cette cohérence du trafic simulé, le débit de trafic est enregistré à l'entrée du carrefour (x_i^{simu} dans la formule 5.1) et les erreurs issues de la simulation relativement aux données observées (x_i^{obs} dans la formule 5.1), sur 100 simulations, sont calculées sur chacune des 4 branches.

Pour calculer cette erreur, nous utilisons l'indicateur REQM (Racine carrée de l'Écart Quadratique Moyen) :

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^{simu} - x_i^{obs})^2} \quad (5.1)$$

Les résultats sont présentés dans le Tableau 5.4. Les débits ont été comparés à ce qui a été mesuré sur le carrefour de Reggio di Calabria. Compte tenu du faible débit de véhicules sur la branche Ouest, les tests ne sont pas significatifs sur cette branche du carrefour. Nous pouvons constater que l'algorithme de perception active ne dégrade pas les performances de la simulation du point de vue de l'écoulement (Fig. 5.3), puisque l'erreur (REQM%) est toujours inférieure à 6% pour nos tests pour n allant de 2 à 7, et pour $n = 100$ (ce qui revient à ne pas mettre de seuil).

Branche \ n		2	3	4	5	6	7	Sans
SUD	abs.	28,06	35,89	40	45,93	43,69	44,24	44,34
	%	3,44	4,4	4,9	5,63	5,35	5,42	5,43
NORD	abs.	27,84	28,08	28,45	28,49	28,87	28,64	28,69
	%	4,06	4,1	4,15	4,16	4,22	4,18	4,19
EST	abs.	18,76	18,77	18,74	18,54	18,69	18,58	18,54
	%	4,38	4,38	4,38	4,33	4,37	4,34	4,33
OUEST	abs.	5,47	5,48	5,5	5,48	5,48	5,48	5,48
	%	21,03	21,09	21,16	21,09	21,09	21,09	21,09

TABLE 5.4 – Comparaison entre débits simulés et débits observés (REQM) en fonction de n (de 2 à 7 et sans limite) sur les branches du carrefour, pour 100 heures simulées. On note $abs. = REQM$ et $\% = \frac{REQM \times 100}{DebitMoyen}$.

L'implantation de l'algorithme de perception limitée aurait pu créer un phénomène émergent tel que l'écoulement du trafic soit prédominant sur l'une des branches du carrefour. Grâce aux résultats obtenus lors des expérimentations, il est confirmé que la performance de la simulation n'a pas été impactée négativement par l'algorithme de perception limitée.

Pour positionner la qualité de modèle, nous allons comparer les résultats sans limite de perception avec les résultats de travaux précédents.

5.2.1.1 Comparaison avec des travaux précédents

Les travaux de thèse de Champion et de Doniec [Champion, 2003, Doniec, 2006] ont été mentionnés plusieurs fois. Pour évaluer notre modèle d'agent-conducteur par rapport aux travaux précédents, nous avons comparé leurs résultats avec nos résultats sans limite de perception (en REQM à l'observation).

Nos résultats sont proches de ceux de Doniec [Doniec, 2006] (voir Tableau 5.5). Tandis que nos résultats au sud sont moins performants, les débits à l'est sont mieux simulés par rapport aux résultats de Champion et Doniec. Les débits au nord restent au voisinage de ceux de Doniec. Finalement, l'erreur sur le débit à l'ouest est minimisée dans notre travail. Cet axe Ouest présente les résultats les plus erronés dans les 3 travaux en raison de faibles débits sur cet axe.

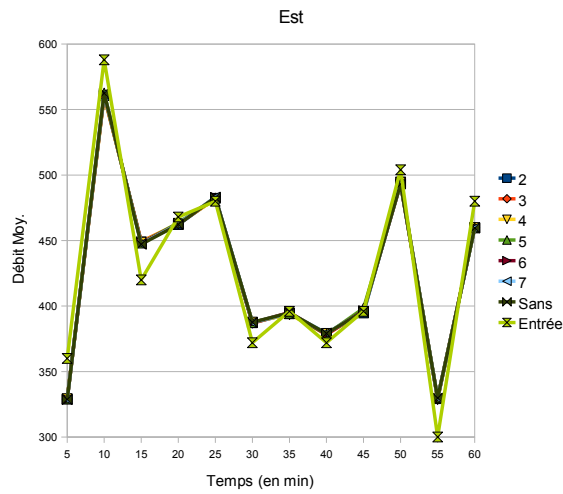
Modèles Branche	Résultats de [Champion, 2003]	Résultats de [Doniec, 2006]	Nos Résultats sans limitation
SUD	3	3	5,43
NORD	6	4	4,19
EST	15	6	4,33
OUEST	32	30	21,09

TABLE 5.5 – Comparaison des REQM (moyen de 100 heures de simulation avec les conducteurs sans limite de perception) de nos résultats avec ceux de Champion et Doniec.

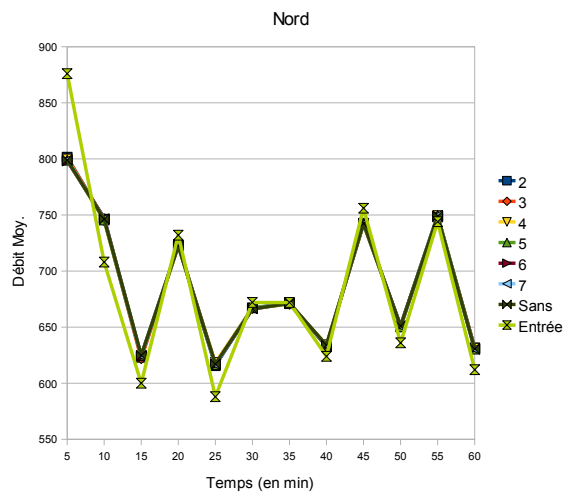
5.2.2 Temps de traversée

L'indicateur RMSE a montré des résultats de l'ordre de 5% d'erreur. L'effet du seuil de perception est différent sur chaque branche et n'est pas continu. Donc, pour mieux observer la réaction des agents en fonction du seuil de perception, nous avons décidé d'utiliser un autre indicateur qui est le temps de traversée du carrefour entre 50 mètres avant et 50 mètres après le carrefour. Avec cet indicateur, nous voulons observer l'influence de n sur le temps passé dans le carrefour.

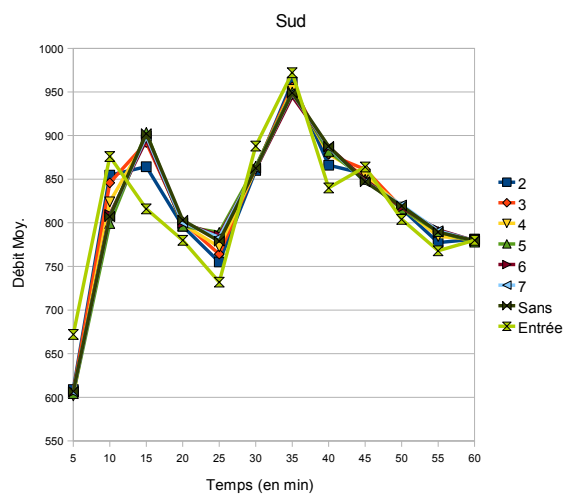
Pour les valeurs de $n=2$ à 5, le temps de traversée croît avec n (voir Fig. 5.4) car l'agent tient compte de plus d'entités et doit résoudre plus de conflits. Avec moins de conflits à résoudre et une représentation moins complète des conflits (moins de percepts associés), l'agent a tendance à se considérer comme prioritaire. Donc, plus la perception est limitée, moins les agents tiennent compte les uns des autres, et plus ils se déplacent vite dans le carrefour. Une interprétation possible est que si les agents raisonnent avec plusieurs percepts, ils deviennent plus prudents, et passent plus de temps dans le carrefour.



(a) Les débits sur l'axe Est



(b) Les débits sur l'axe Nord



(c) Les débits sur l'axe Sud

FIGURE 5.3 – Les débits d'entrée sur les voies Est, Nord et Sud pour différentes valeurs du seuil de perception n (2 à 7 et sans limite) en fonction du temps écoulé.

Cet effet continue jusqu'à une valeur seuil qui est égal à 5. Puisque les situations qui requièrent un nombre de percepts supérieur ou égal à 6 n'ont pas lieu fréquemment, l'effet de la limite perceptive est négligeable au dessus de cette valeur.

Par conséquent, plus la capacité de l'agent est limitée, plus la performance globale d'écoulement est bonne.

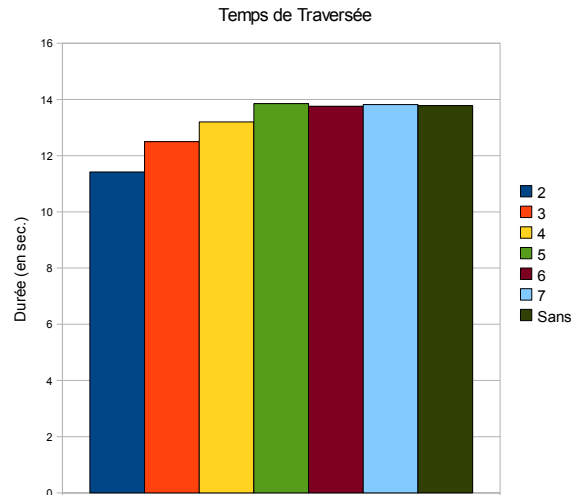


FIGURE 5.4 – Temps de traversée (en secondes) d'un véhicule simulé entre 50 m avant et 50 m après le carrefour en fonction de la limite de perception n . « Sans » correspond à des agents sans limite de perception.

5.2.3 Interblocage

L'interblocage est un phénomène émergent de notre modèle de simulation, auquel il est difficile de remédier. Il y a deux types d'interblocage. Le premier type, « deadlock », correspond à une congestion totale du carrefour. Les véhicules ne peuvent pas occuper le même espace. Donc, un agent peut être bloqué (il n'avance plus) s'il perçoit un agent à l'arrêt devant lui. Un interblocage est défini, dans notre contexte, par un blocage mutuel entre plusieurs véhicules. Si le véhicule fait partie d'une chaîne de blocages (e.g. A bloque B, B bloque C, C bloque D et D bloque A), l'interblocage est identifié (voir Fig. 5.5). Le deuxième type, « livelock », correspond aux situations où les agents peuvent se déplacer mais sont immobilisés à cause des contraintes décisionnelles (e.g. tous les véhicules à l'entrée de carrefour considèrent un autre véhicule comme prioritaire et n'entrent pas dans le carrefour). Dans notre implantation, cette situation se débloque car les agents forcent le passage au moment où ils dépassent leurs limites d'impatience. Donc, seules les situations de deadlocks se produisent dans notre modèle.

Lorsqu'une situation de « deadlock » est identifiée, nous avons décidé de la débloquent en permettant aux voitures qui font partie de la même chaîne d'interblocage de rouler (virtuellement) les unes sur les autres. Un véhicule immobilisé dans le carrefour pour une durée de 5 secondes cherche la source du blocage du véhicule qui le bloque. Si le dernier est bloqué par un autre véhicule, le premier cherche la cause du blocage du troisième. Sa



FIGURE 5.5 – Illustration d'un interblocage au centre d'un carrefour (véhicules rouges).

recherche continue jusqu'à ce qu'il identifie un véhicule non-bloqué ou lui-même comme la source du blocage. Dans le cas de détection de lui-même comme la source de ce blocage, la chaîne d'interblocage est constituée.

Le déblocage (rouler virtuellement les uns sur les autres) n'est absolument pas réaliste (ce qui est usuel pour supprimer un interblocage dans le contexte de la simulation de trafic) mais ainsi la simulation ne s'arrête pas ; ceci rend possible la comparaison des résultats des simulations entre elles. Ce choix est justifié par le très petit nombre d'interblocages. Dans le pire des cas ($n = 7$, il y a 79 interblocages sur 100 heures de simulation), et seul 1 véhicule sur 500 est concerné.

On observe une augmentation significative du nombre d'interblocages avec la capacité de perception des conducteurs (voir Fig. 5.6) jusqu'à un plateau à partir de $n=5$. Cette concordance entre le nombre de percepts et le nombre d'interblocages est probablement liée au temps passé des véhicules dans le carrefour car un carrefour moins encombré (plus dégagé) donne lieu à moins d'interblocages.

On observe également que le nombre d'interblocages dans les simulations sans limite de perception correspond au plateau identifié. Cela nous permet de constater que la perception à 2, à 3 et à 4 percepts diminue le nombre d'interblocages par rapport aux travaux précédents.

5.2.4 Accidents et presque-accidents

Au vu des résultats présentés jusqu'ici, le lecteur peut penser que la perception avec moins de percepts a un effet plutôt positif. Par contre, a priori, on peut craindre que la perception limitée produise plus d'accidents.

Un accident cause un arrêt du trafic tant qu'il n'est pas résolu. Donc, il influence l'écoulement pour un certain temps. De plus, dans la vie réelle, l'accident est un épiphénomène difficile à quantifier. Il est donc utile de pouvoir utiliser des mesures alternatives pour évaluer la sécurité routière. Dans cette section, nous allons examiner notre modèle du point de vue des situations accidentogènes. Les lois de poursuite sont des modèles sans accident pour modéliser les comportements des conducteurs en section courante. En cas

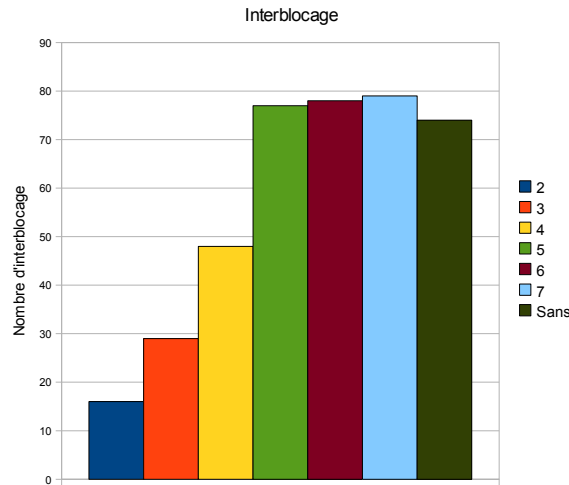


FIGURE 5.6 – Nombre d’interblocages en fonction de la limite de perception n (en nombre d’interblocages pour 100 réplifications).

d’événement imprévu comme l’apparition d’un obstacle devant l’agent, une décélération très forte (e.g. moins de $-8m/s^2$) est souvent impossible dans la réalité mais possible en simulation.

Nous avons utilisé la loi de poursuite de [Kesting et al., 2009] pour traduire une décision retournée par l’algorithme de résolution de conflit [Mandiau et al., 2008]. Le changement brusque de décision dû à la résolution de conflit peut causer une accélération forte (Voir Section 4.3.3 pour les détails de fonctionnement du modèle). Par exemple, deux véhicules se considérant comme prioritaire tous les deux arrivent au carrefour, celui qui arrive le premier se considère comme prioritaire. Comme il a été expliqué dans la partie 4.3.1.2, dans ce genre de situation, la priorité par rapport à l’engagement détermine la priorité finale entraînant pour l’autre véhicule une décision de décélération forte. Une limite qui borne la décélération aurait pu empêcher ce genre de situation et conduire à des accidents.

Brièvement, puisque l’accident n’a pas lieu dans ce modèle, on s’est intéressé à quantifier les situations accidentogènes (presque- ou quasi-accident). Le terme quasi-accident est défini dans [Violette and Voisin, 2005] comme *une situation dangereuse qui, sans intervention particulière de la part des conducteurs concernés, aurait amené à un accident*. Au vue de cette définition, ils proposent d’utiliser le freinage, qui est une réaction commune pour éviter une collision, pour caractériser les quasi-accidents. Par contre chaque décélération ne peut pas être considérée comme un quasi-accident. Donc pour évaluer la situation, il faut chercher à déterminer si la collision aurait lieu sans l’intervention de l’usager.

Les agent-conducteurs calculent leurs accélérations selon une loi de poursuite. En cas d’absence de changement brusque dans la situation perçue ou dans le freinage du véhicule devant, la loi de poursuite retourne des accélérations (ou des décélérations) de confort. L’apparition d’un mouvement perpendiculaire au sens de circulation d’un véhicule peut interrompre sa continuité au niveau de l’accélération. Dans notre outil de simulation, les trajectoires des véhicules se croisent seulement en carrefour (car il n’y a pas de change-

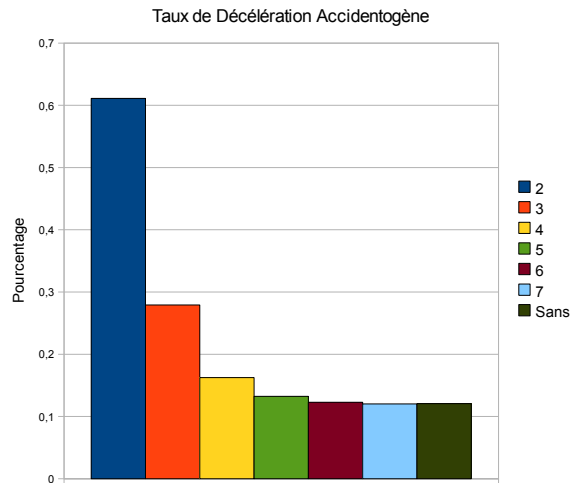


FIGURE 5.7 – Les taux de décélérations accidentogènes dans l’intervalle $[-8, -5]$ en fonction de n (2 à 7 et sans limite)

ment de voie). Donc, la seule source de décélération forte est une évaluation erronée des priorités (e.g. deux conducteurs se considérant comme prioritaires). Si l’agent-conducteur est conscient de cette évaluation erronée quand il est loin du carrefour (e.g. c’est l’autre qui est prioritaire), la correction peut se faire avec une décélération relativement faible car la loi de poursuite tient compte de la distance relativement longue au conflit potentiel. Par contre, si l’agent-conducteur ne devient conscient de l’évaluation erronée qu’au dernier moment, l’interdistance devient très courte et la décélération calculée par la loi de poursuite devient très forte.

Par conséquent, nous avons décidé d’utiliser les décélérations fortes comme des indicateurs *a posteriori* des situations accidentogènes créées par notre modèle du conducteur.

Nous avons collecté les données d’accélération (et décélération) à partir de 50 mètres avant jusqu’à la sortie du carrefour afin de les utiliser pour calculer les taux de décélération. Nous avons distingué deux types de décélérations fortes : accidentogène et irréaliste. Selon les recherches menées au LEPSIS [Auberlet et al., 2004], l’intervalle des décélérations maximales des conducteurs est compris entre -8 et $-5m/s^2$, ce qui est cohérent avec les résultats de [El-Shawarby et al., 2007]. Les valeurs au delà de $-8m/s^2$ seront considérées comme irréalistes et utilisées comme indicateur des erreurs de décision et comme une mesure de la qualité du modèle. Par ailleurs, les valeurs de décélération qui sont dans l’intervalle $[-8, -5]$ seront utilisées comme indicateur des situations accidentogènes.

Les figures 5.7 et 5.8 montrent que les taux de décélération accidentogène et irréaliste augmentent quand la capacité de perception diminue. La perception limitée diminue la capacité d’analyse de la situation et la capacité de résolution des conflits. Par conséquent, le nombre de situations imprévues se multiplie et il y a une augmentation au niveau des situations accidentogènes.

On observe que les résultats avec $n=2$ et $n=3$ voient des taux de décélérations accidentogènes fortement supérieurs. Lorsque $n \geq 5$, on a un plateau qui correspond à la situation sans limite de perception.

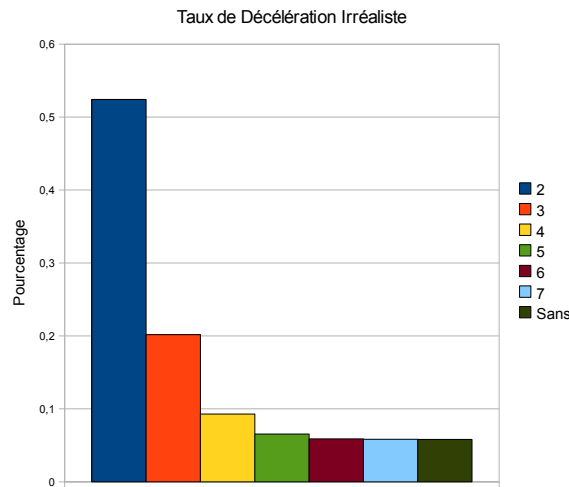


FIGURE 5.8 – Les taux de décélérations irréalistes inférieures à $-8m/s^2$ en fonction n (2 à 7 et sans limite)

5.2.5 Conclusion

Finalement, nous pouvons constater qu’avec plus de percepts pris en compte, l’agent devient plus prudent, crée moins de situations accidentogènes, mais passe plus de temps dans le carrefour, et produit plus d’interblocages.

Nous pouvons également constater qu’au-delà de $n=4$, il n’y a pas de changement significatif sur le taux de décélération forte. En considération de tous les résultats présentés, on peut proposer cette valeur $n = 4$ comme un compromis qui diminue, d’une part, le nombre d’interblocage et le temps de traversée, d’autre part qui n’augmente pas fortement le taux de situation accidentogène. Il est intéressant de noter que cette valeur est cohérente avec l’état des connaissances à propos de la mémoire à court terme [Miller, 1956, Cowan, 2001] et crée un gain de 4% en terme de temps d’exécution (Voir Tab. 5.6) par rapport à la perception sans limite. Toutefois, il se peut que cette valeur soit liée au type de carrefour modélisé. N’ayant pas d’autres données à disposition actuellement, nous ne pouvons confirmer ou infirmer cette hypothèse, qui devra faire l’objet d’études complémentaires.

n	2	3	4	5	6	7	Sans
Temps d’exécution	203,98	220,3	222,49	230,45	229,71	232,19	230,91

TABLE 5.6 – Durée moyenne d’une heure simulée (en secondes) en fonction de la limite de perception n

5.3 Population hétérogène

Une des propriétés de notre modèle est que le seuil de perception peut être différent selon les conducteurs (variabilité inter-individuelle) et au cours du temps pour un même conducteur (variabilité intra-individuelle). La variabilité intra-individuelle peut être due à des facteurs exogènes (e.g. les percepts saillants, non-pertinents, comme un panneau de publicité à côté de la chaussée) ou à des facteurs endogènes (e.g. le niveau de vigilance). La variabilité inter-individuelle peut être due, par exemple, à la distribution de l'âge parmi les conducteurs ou à l'expérience de conduite. Le point essentiel est que quelques caractéristiques peuvent émerger à partir d'une population hétérogène, qui se distingue d'une population homogène « moyenne ».

Il est possible de simuler une population hétérogène avec notre modèle de perception en simulant un ensemble de conducteurs ayant une valeur du seuil de perception variable pour une meilleure représentation de la variabilité comportementale des conducteurs. Par exemple, un conducteur âgé peut avoir moins de ressources perceptives (et une vitesse désirée moins grande) ; les conducteurs professionnels (expérimentés) de poids lourds, bus ou taxi peuvent avoir plus de ressources perceptives.

Dans l'exemple qui suit, on utilise une hypothèse arbitraire à propos de la distribution de la capacité de mémoire à court terme qui est liée à l'âge. Dans notre exemple, le seuil de perception n est aléatoirement déterminé pour chaque conducteur à 3, 4, ou 5 (avec une probabilité uniforme) et 100 heures sont simulées sur le carrefour de Reggio di Calabria comme dans l'exemple précédent. Les résultats de la population hétérogène sont comparés avec ceux des populations homogènes dont le seuil de perception est fixé à 3, 4 et 5 (voir Tableau 5.7).

Mesures \ Population	Homogène				Hétérogène
	3	4	5	Moyenne	
REQM Est	4,38	4,38	4,33	4,36	4,39
REQM Nord	4,1	4,15	4,16	4,14	4,12
REQM Sud	4,4	4,9	5,63	4,98	4,9
Interblocage	29	48	77	51,3	44
Décélération accidentogène	0,28	0,16	0,13	0,19	0,19
Décélération irréaliste	0,20	0,09	0,07	0,12	0,15
Temps de traversée	12,39	13,03	13,66	13,03	12,95

TABLE 5.7 – Comparaison des résultats en simulant une population hétérogène avec les résultats de simulations où la limite de perception de tous les agents est fixée à 3, 4 et 5. La colonne « Moyenne » représente la moyenne arithmétique des résultats pour des populations homogènes $n=3$, 4 et 5.

Les REQM et le temps parcours de la population hétérogène et de la perception à 4 percepts sont presque égaux (la population hétérogène présente un résultat plus bas de

0,08 sec. en terme de temps de traversée). La performance d'écoulement de la simulation n'est donc pas dégradée par la population hétérogène.

Les données montrent une petite amélioration pour l'interblocage (chute de 8% avec la population hétérogène). La baisse du temps passé dans le carrefour, due aux conducteurs dont la limite de perception est égale à 3, a plus d'impact et diminue le nombre d'interblocages.

Le taux de décélération accidentogène et irréaliste de la population hétérogène est compris entre ceux de la population à 3 et à 4 percepts. Le taux de décélération accidentogène est plus haut de 0,03% avec la population hétérogène et le taux de décélération irréaliste est plus haut de 0,06% par rapport aux résultats avec 4 percepts.

Le nombre de décélérations accidentogènes de la population hétérogène représente 0.19%, et est égal à la moyenne arithmétique des résultats obtenus des simulations où la limite de perception est fixée à 3, 4 et 5. Toutefois, au vu des résultats de décélération irréaliste, nous pouvons constater que l'influence négative des conducteurs ayant un seuil de 3 est plus grande que l'influence positive de ceux qui ont un seuil égal à 5. Donc, la présence des conducteurs dont la limite de perception est égale à 3, a plus d'impact et diminue la qualité du comportement émergent.

Même avec la population hétérogène, il n'y a pas d'accident. Néanmoins, le résultat principal est que le modèle permet de simuler une hétérogénéité inter-individuelle en terme de capacité perceptive qui conduit à une hétérogénéité globale des comportements. Bien que la limite de perception d'un tiers des agents soit égale à 3, le comportement émergent des conducteurs est meilleur que le comportement issu des simulations avec 3 percepts. On voit que les agents s'adaptent (à un certain niveau) aux situations où une partie des agents ne se comporte pas comme eux. Cette notion d'adaptation est examinée dans l'expérimentation suivante.

Dans cette section, nous avons illustré un modèle qui est capable de faire intervenir la variabilité inter-individuelle dans un modèle de comportement de conducteur. Ce type de simulation permettrait de simuler plus précisément le comportement des conducteurs si les données correspondantes étaient disponibles, par exemple sur la distribution des capacités de perception selon l'âge.

5.4 Adaptation du système à un comportement aberrant

Dans une autre simulation, des conducteurs hypovigilants sont simulés avec un modèle très simplifié : le seuil de perception de ces conducteurs est fixé à $n=1$. Cent heures de simulation ont été réalisées, avec un conducteur hypovigilant généré toutes les 2 minutes (tous ces conducteurs vont tout droit). Nous nous sommes intéressés au comportement adaptatif des autres conducteurs face aux conducteurs hypovigilant. La limite de perception des conducteurs « à jeun » est fixée à 4, compromis défini en section 5.2.5.

Les REQm et les temps de traversée sont presque égaux (voir Tableau 5.8), donc en terme de fluidité, les conducteurs hypovigilants n'ont pas d'influence négative. Nous avons constaté que les conducteurs hypovigilant ne donnent pas lieu à plus d'accidents

et n'augmentent pas significativement le taux de décélération accidentogène des conducteurs normaux, ce qui est probablement dû au comportement adaptatif de ces derniers conducteurs quand ils rencontrent un conducteur hypovigilant. Ce comportement adaptatif est l'explication de l'augmentation du nombre de décélérations irréalistes (une hausse de 0,03% par rapport aux données collectées).

	Homogène	Hypovigilant
REQM Est	4,38	4,4
REQM Nord	4,15	4,17
REQM Sud	4,9	4,83
Interblocage	48	62
Décélération accidentogène	0,16	0,16
Décélération irréaliste	0,09	0,12
Temps de traversée	13,03	13,05

TABLE 5.8 – Comparaison des résultats issus d'une population des conducteurs dont 5% sont hypovigilants ($n=1$) et $n = 4$ pour le reste, avec les résultats de simulations sans conducteurs hypovigilants ($n=4$) (moyenne sur 100 heures simulées)

On remarque que les proportions des situations accidentogènes et irréalistes sont plus faibles avec 5% de conducteurs hypovigilants que dans la situation simulant différentes classes d'âge (présentée dans le tableau 5.7). Cela ne signifie pas, bien entendu, que la présence de conducteurs hypovigilants est plus sûre que celle de conducteurs âgés. Nous voulions simplement montrer l'intérêt potentiel de la simulation de trafic avec un modèle plus flexible de perception qui permet de simuler différentes populations de conducteurs.

5.5 Conclusion

Le modèle de conducteur proposé ne dégrade pas les indicateurs de la performance d'écoulement par rapport aux résultats obtenus dans les travaux précédents [Champion, 2003, Doniec, 2006]. Le seuil qui limite le nombre de percepts accédant à la décision n'a pas impacté négativement les REQMs.

Avec une analyse plus détaillée, nous avons étudié l'influence de la limite de perception sur le temps de traversée et l'interblocage. Nous avons constaté que ces deux indicateurs sont corrélés avec le nombre d'objets perçus.

Par ailleurs, nous avons introduit dans cette analyse un autre indicateur qui est le nombre de situations accidentogènes. Cet indicateur correspond à notre hypothèse de départ qu'avec plus de percepts, il y a moins de situations accidentogènes.

La crédibilité des comportements des conducteurs simulés diminue avec n car cette diminution conduit à plus de décélérations irréalistes dues au changement de décision du mécanisme de résolution de conflit. Puisque l'algorithme de résolution de conflit reçoit moins de données avec la perception limitée, la décision devient parfois erronée. Cet

erreur de décision peut se traduire par deux conducteurs qui se considèrent également prioritaires. Elle est corrigée par la loi de poursuite par l'intermédiaire des décélérations irréalistes. Ces décélérations irréalistes expliquent que l'accident n'a jamais lieu au cours des simulations.

Le fonctionnement du modèle est stable en fonction de n au delà de $n=4$. Cette valeur a été utilisée pour décrire le comportement d'un conducteur standard dans les deux dernières expérimentations où nous avons exploré la réaction du système à différents types de populations d'agents.

Dans la section 5.3, la capacité du modèle à simuler une population hétérogène a été démontrée et les REQM n'ont pas augmenté. Toutefois, le nombre de décélérations irréalistes a augmenté, donc la crédibilité du comportement des conducteurs a été diminuée.

Dans la dernière expérimentation, la possibilité de simuler des conducteurs à comportement aberrant (conducteurs hypovigilants allant tout-droit et ne percevant qu'un percept) a été démontrée. Il a été également montré que des conducteurs ayant un comportement normal s'adaptent à cette situation sans beaucoup dégrader la crédibilité du modèle, avec une différence de décélérations irréalistes de 0,03%.

Chapitre 6

Conclusion et Perspectives

6.1 Bilan

6.1.1 Rappel de l'objectif et approche utilisée

La motivation de cette thèse est un problème pratique qui est de fournir une simulation plus *réaliste et intelligible* des comportements des conducteurs pendant la traversée de carrefour, ce qui nous a conduit à l'approche multi-agent [Boissier et al., 2004].

Dans ce travail, notre effort porte sur l'approfondissement de la relation entre l'approche multi-agent et la simulation de trafic. Tandis que la modélisation de trafic fournit des modèles pour expliquer et prévoir l'écoulement du trafic et la formation de congestion, les SMA nous donnent la possibilité de modéliser les interactions locales d'une population à un niveau d'hétérogénéité élevé. Par ailleurs, les SMA offrent aussi la possibilité d'affiner la granularité du modèle conducteur avec un modèle de perception humaine d'agent.

Nous avons centré nos recherches sur la modélisation de la perception appliquée à des conducteurs dans un environnement dynamique, riche en interaction entre les conducteurs, et accidentogène : le carrefour, où les conducteurs exécutent plusieurs tâches de conduite simultanément. Les travaux en sciences cognitives nous ont guidé par la définition des différents processus d'attention perceptive qui contribuent à la perception.

6.1.2 Modèle proposé

Nous avons réalisé un modèle de conducteur, avec une perception humaine qui peut être qualifiée par trois adjectifs :

- active : permet de chercher les informations pertinentes,
- passive : permet de recevoir des informations saillantes,
- limitée : permet d'accepter seulement une certaine quantité d'information.

Notre modèle s'inscrit dans le cadre général du modèle de perception proposé par Weyns en SMA [Weyns et al., 2004], tout en enrichissant ce cadre par la définition d'un double processus de perception suivi de l'intégration des percepts. De plus, nous modélisons, de façon simplifiée, la capacité de la mémoire à court terme. Dans l'objectif de la simulation, nous avons détaillé la définition des percepts, des focus et la méthode d'intégration proposée pour notre exemple applicatif.

6.1.3 Validation

Nous avons évalué l'impact de notre modèle de perception avec un outil de simulation de trafic routier, SAPIEN, que nous avons contribué à élaborer et réaliser. Dans ce contexte applicatif, l'agent-conducteur a été implanté sur la base d'une architecture à plusieurs comportements correspondant à deux sous-tâches de conduite : la *poursuite* et la *traversée de carrefour*. Notre modèle constitue une nouvelle façon de réaliser la partie perception de l'agent-conducteur, tandis que la partie décisionnelle est essentiellement basée sur les travaux réalisés par nos prédécesseurs.

La validation du modèle a été réalisée avec le peu de données réelles dont nous disposons. Selon les tests effectués sur les débits d'entrée d'un carrefour existant (à Reggio Calabria en Italie) avec les différentes valeurs de limite perceptive même dans des cas extrêmes (conducteur hypovigilant), nous avons constaté que la performance d'écoulement de trafic n'est pas influencée par notre modèle de perception.

Dans un environnement partagé par plusieurs agents en interaction, même de petites modifications peuvent conduire à des grands problèmes de fonctionnement. Dans le contexte du trafic, le risque existait que notre implantation fasse émerger des phénomènes non-prévus comme la prédominance d'un flux entrant au carrefour. En outre, nous sommes conscients que les chercheurs et les ingénieurs dans le domaine de la modélisation de trafic ont des problèmes considérables de calibration et validation du modèle avec les paramètres existants (e.g. créneau, TIV, vitesse, accélération, etc.) et que, pour cette raison, nous pouvons être critiqués pour avoir introduit des nouveaux paramètres comme la limite de perception.

Pourtant, avec les données disponibles, nous pouvons déduire que l'utilisation du modèle de perception « omnisciente » ne dégrade pas la performance de trafic simulé et que la limite de perception n'est pas une notion importante qui influence l'écoulement du trafic directement.

6.1.4 Résultats de simulations

Notre modèle peut donner l'opportunité d'examiner, du point de vue de la sécurité routière, les modèles de simulation microscopique de trafic qui sont fait, essentiellement, pour l'évaluation de l'écoulement du réseau routier. Un de nos objectifs était de démontrer l'utilité de notre modèle nanoscopique (en terme de comportement du conducteur) qui affine la granularité des modèles de simulation microscopique et enrichit les détails et les données disponibles. Avec nos résultats, nous avons montré l'influence de la limite de perception sur les indicateurs comme le temps de traversée, le nombre d'interblocages, le taux de décélération forte. À partir des simulations, nous avons proposé un compromis pour fixer la limite de perception, qui est cohérent avec l'état des connaissances à propos de la mémoire à court terme [Miller, 1956, Cowan, 2001]. Il est possible que les différents aménagements et le nombre de tâches dans lesquelles l'agent est engagé aient un impact sur ce compromis.

6.1.4.1 Interblocages

Dans les modèles de simulation de trafic, des moyens non-crédibles peuvent être adoptés pour enlever une congestion à l'entrée du carrefour et pour ne pas impacter le débit du carrefour. Par exemple, si la durée d'attente est trop longue, dans PARAMICS, les voitures sautent sur la voie de destination et dans AIMSUN, les véhicules roulent virtuellement les uns sur les autres (la superposition de deux véhicules est permise). Dans notre travail, nous avons essayé d'éviter ces situations irréalistes. Sauf dans le cas d'interblocage, qui est un phénomène émergent et indésirable du modèle et dans lequel, nous avons permis aux véhicules faisant partie de la chaîne d'interblocage de rouler les uns sur les autres comme il a été fait dans AIMSUN. Dans le travail de [Doniec, 2006], un modèle d'anticipation d'interblocage a été proposé. Cela permet à l'agent d'anticiper l'interblocage, et de ne pas entrer dans le carrefour s'il risque de créer un interblocage. Pourtant, nous avons souhaité utiliser l'interblocage pour évaluer la qualité du modèle agent-conducteur. Par ailleurs, puisque le modèle d'anticipation de l'interblocage diminue le nombre d'agents dans le carrefour et qu'on trouve un carrefour encombré plus intéressant pour tester la capacité perceptive, nous avons implanté le modèle de traversée de carrefour sans le modèle d'anticipation de l'interblocage. Finalement, avec plus de percepts, il y a eu plus d'interblocages, ce qu'on a essayé d'expliquer avec un autre indicateur, le temps de traversée.

6.1.4.2 Temps de traversée

Le temps de traversée a été étudié pour étendre l'analyse de l'écoulement à une zone plus grande que l'entrée du carrefour. Tandis que la capacité de perception limitée n'a pas un impact direct sur les débits simulés à l'entrée du carrefour, elle est en corrélation avec le temps de traversée entre 50 mètres avant et après celui-ci. Le temps de traversée met l'accent sur l'intérieur du carrefour et nous donne la possibilité d'explorer la fluidité dans le carrefour. L'effet des interblocages sur cet indicateur n'est pas significatif car dans le pire des cas ($n=7$), un véhicule sur 500 appartient à un interblocage. Le véhicule est bloqué au maximum 5 secondes dans l'interblocage, ce qui modifie de 0.01 seconde le temps moyen perdu par un véhicule dans le carrefour.

Puisque les débits à l'entrée du carrefour ne sont pas influencés par la perception limitée et sachant qu'il n'y a jamais de congestion sur les voies de sortie, l'augmentation du temps de traversée peut être expliquée par l'augmentation du temps passé dans le carrefour. Pour expliquer ce phénomène, nous proposons l'interprétation qu'une perception plus complète de l'environnement oblige l'agent à évaluer plus de véhicules dont les itinéraires se croisent. Chaque véhicule perçu est un obstacle potentiel qui empêche l'agent de se déplacer. Mais avec moins de percepts, l'agent évalue la situation comme moins exigeante et il sort plus facilement du carrefour. Par contre, le prix de cette fluidité est le nombre plus important de décélérations fortes.

6.1.4.3 Un indicateur des situations accidentogènes

Pendant nos simulations, aucun accident ne se produit car le modèle de déplacement de l'agent conducteur est un modèle sans accident (voir section 4.3.3). Par contre, il est

capable de fournir des taux de décélérations irréalistes et accidentogènes. Ces décélérations irréalistes ont été utilisées pour évaluer la qualité du comportement simulé de la population des conducteurs. Comme attendu, lorsque l'agent perçoit moins, la qualité du comportement simulé se dégrade. D'autre part, les situations accidentogènes sont aussi inversement corrélées avec la capacité limitée.

Avec un seuillage sur la décélération, nous pourrions créer des accidents. Par contre, la présence d'accident simulé nous mène vers un autre problème auquel on ne sait pas encore répondre. Dans la réalité, en présence d'un accident, le trafic s'arrête et les débits diminuent. Pour éviter ce problème, nous avons accepté des décélérations irréalistes.

6.1.4.4 Simulation de population hétérogène

Une population de conducteurs constitue un ensemble hétérogène d'individus. Dans la littérature sur la simulation de trafic, l'hétérogénéité est souvent traitée selon le niveau d'agressivité (ou de prudence). Les paramètres de la loi de poursuite ou de la fonction de traversée de carrefour permettent de modéliser le comportement de conducteurs agressifs ou prudents. Pourtant, les conducteurs peuvent être débutants ou expérimentés, jeunes ou âgés. Au cours de notre travail, nous avons vu le modèle de perception proposé comme un moyen d'introduire une hétérogénéité plus élevée. Nous avons implanté différentes limites pour le modèle de conducteur afin d'ajouter une variabilité inter-individuelle dans la population de conducteurs. Ainsi, par l'intermédiaire d'une limite de perception qui varie selon les conducteurs, nous avons créé différents comportements de conducteur. Pour illustrer ce travail et en considérant que l'âge est un facteur influençant la perception, nous avons implanté un seuil de perception qui est aléatoirement déterminé pour chaque conducteur à 3, 4, ou 5 (avec une probabilité uniforme).

Nous avons constaté que même avec des comportements hétérogènes, les débits à l'entrée ne sont pas différents des précédents et le temps de traversée est proche de celui avec $n = 4$. Nous pouvons interpréter ces résultats comme une forme d'adaptation. Mais le problème est qu'avec la population hétérogène, le taux de décélération (accidentogène et irréaliste) croît. Donc, l'adaptation est biaisée. Le même raisonnement est valable pour les tests effectués avec les conducteurs hypovigilants.

En conclusion, par notre modèle, nous avons montré qu'il est possible et utile en terme de réalisme d'enrichir la partie perceptive de la modélisation agent des comportements humains, et nous avons formé de propositions en ce sens. Notre apport concerne également l'application à la simulation du conducteur en carrefour, avec la proposition d'une mesure des situations accidentogènes à l'aide du taux de décélération et la possibilité d'introduire des variations comportementales inter-individuelles au sein de la population simulée.

Cependant, nous avons formulé des hypothèses simplificatrices et soulevé un ensemble de questions auxquelles nous n'avons pas encore répondu. La section suivante aborde quelques uns de ces points.

6.2 Perspectives

Les perspectives envisagées concernent à la fois la validation du modèle proposé, les améliorations qu'il était possible d'y apporter hors contexte applicatif et pour la simulation de trafic, et son utilisation.

6.2.1 Besoin de validation

Une des difficultés rencontrées concerne la calibration et la validation de notre modèle. Pour ce faire, nous avons besoin de données d'observation plus riches, comme l'histogramme des accélérations des conducteurs, le temps de traversée ou le temps passé dans le carrefour. De plus, il faudrait tester l'usage du modèle dans la simulation de différents types de carrefours. En effet, il se peut que des biais aient été introduits du fait de la forme particulière du carrefour que nous avons utilisé pour la validation.

D'après nous, ces données pourraient être obtenues soit par vidéo soit par un système embarqué mais à notre connaissance, il n'existe pas de telles données disponibles. Dans l'idéal, il faudrait donc mettre en place un ensemble de dispositifs expérimentaux dans le but de collecter de nouvelles données. Toutefois, cela pose un ensemble de problèmes à la fois pratiques et juridiques (protection de la vie privée, par exemple).

6.2.2 Dynamique de la perception et mémoire

Dans notre travail de thèse, l'accent a été mis sur la sélectivité de l'information : « quoi » regarder. Plus précisément, par quoi l'agent est-il intéressé ? L'autre dimension de la perception est le dynamique : « quand » regarder. Avec quel intervalle de temps, l'agent doit-il rafraîchir sa perception ?

Certains paramètres internes de simulation (e.g. la discrétisation du temps et de l'espace) sont importants pour l'écoulement de la simulation et impactent les résultats. SAPIEN a un taux de rafraîchissement égal à 1/10 seconde (dans ARCHISIM, il est également 3/100 et 15/100 seconde et dans HUTSIM, il est entre 1/10 et 1/20 seconde). Nos agents répètent et exécutent leur cycle de perception-décision-action tous les 1/10 secondes. De ce point de vue, ils sont très réactifs.

Dans cette architecture réactive, dans un premier temps, la mémoire n'existe pas en tant que module. Dans le cadre des nouvelles recherches qui permettraient de mieux comprendre le fonctionnement de la mémoire d'un conducteur, ce module pourrait être intégré dans l'architecture. Si on ajoute un module de mémoire dans l'architecture, les agents ne seront plus obligés de percevoir les événements sensoriels (les entités perçues dans notre modèle) à chaque pas de simulation. Ainsi, comme certaines informations perçues aux pas précédents pourront être sauvegardées dans la mémoire, l'agent pourra consacrer ses ressources cognitives à un autre processus comme la décision ou l'action.

D'un autre côté, une information peut être oubliée ou périmée avec le temps. Dans le cas d'une information très dynamique et critique (comme un enfant qui peut se mettre soudain à traverser, dans notre contexte d'application), l'agent ne peut pas entièrement faire confiance à ce qui a été perçu au pas précédent. Par contre, dans le cas d'une information non-dynamique (un panneau de signalisation), il suffit de la percevoir et la

mémoriser une fois. Ces hypothèses font référence au concept de « vigilance » telle qu'elle est abordée dans la littérature en psychologie cognitive.

Dans notre modèle de perception, l'agent « scanne » tous ses focus simultanément. Dans la vie réelle, pour traverser le carrefour (tout droit), un conducteur à l'entrée du carrefour regarde d'abord à gauche, ensuite à droite en tournant sa tête. En ce faisant, non seulement il n'oublie pas ce qui est présent à gauche mais il anticipe aussi ce qui va se passer à court terme. Dans le modèle de conscience de la situation [Endsley, 1995], l'anticipation est considérée comme une troisième étape suite à la perception et à la compréhension.

Pour étendre le modèle de perception en considérant les « grandes » fonctions (perception, décision et action) comme des fonctions concurrentes et en tenant compte de la capacité d'anticipation de l'agent, nous avons effectué un travail préliminaire en proposant de figer les percepts perçus d'un agent A à un instant t et de les faire évoluer avec les derniers attributs perçus (les coordonnées, la vitesse et l'accélération) pendant Δt secondes. Δt représente ici l'intervalle de temps entre deux perceptions qui est le temps consacré à la décision et l'action. Un agent A passant relativement longtemps dans le carrefour, interagissant avec plusieurs percepts pendant un tourne-à-gauche et effectuant des décélérations fortes issues de changement de décision a été retenu pour étudier un cas problématique. Nous avons exploré l'impact de ce facteur dans le cadre du stage de Master de Fatima Ezzahra Ikhili [Ikhili, 2012] que j'ai co-encadré.

La première phase de ce travail a été d'examiner la stabilité de la liste d'objets perçus entre deux pas d'exécution. Nous avons remarqué que la liste des percepts change très fréquemment (voir la figure 6.1), ce qui s'explique par le fait que notre modèle de perception est trop réactif. Nous avons pris comme hypothèse de départ que ces changements brusques au niveau de la perception révèlent les changements brusques de décision qui influencent (l'action) l'accélération (voir la figure 6.2).

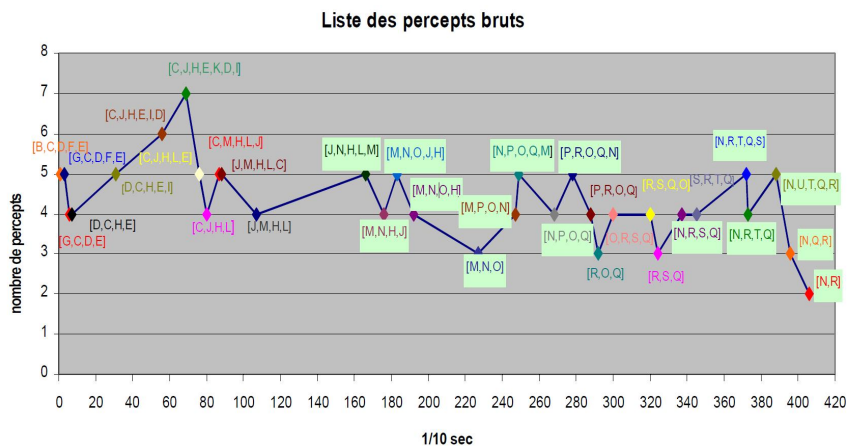


FIGURE 6.1 – Évolution de la liste de percepts non filtrés en fonction du temps (les lettres représentent les véhicules perçus)

Afin de réduire le nombre de ces changements brusques qui influencent l'action de l'agent, nous avons d'abord testé l'impact d'une liste de percepts fixe pour Δt secondes.

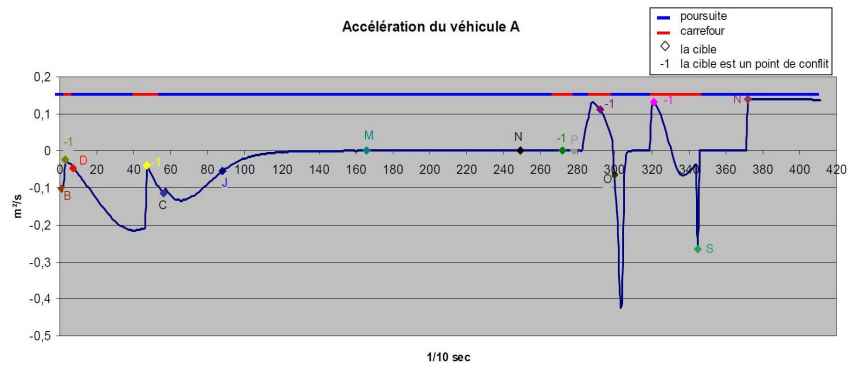


FIGURE 6.2 – Évolution de l'accélération de l'agent A en fonction du temps.

Nous avons laissé le fonctionnement de la décision tel quel (exécutée tous les pas de simulation). Les tests réalisés pour les valeurs de Δt de 0,1 à 0,5s ont montré qu'il n'y a pas de différence notable pour ces valeurs, tandis que les résultats des tests avec $\Delta t > 0,5$ s étaient complètement différents et A passait beaucoup plus de temps dans le carrefour et créait des interblocages.

Dans un deuxième temps, nous avons ajouté une capacité d'anticipation dans le modèle. L'agent A est doté de la capacité de faire évoluer en interne la situation perçue en faisant varier les coordonnées de la liste des entités perçues à l'instant t avec leurs derniers attributs perçus (les coordonnées, la vitesse et l'accélération à t). Même avec le modèle d'anticipation, nous n'avons pas pu diminuer le nombre des changements brusques de décision et donc de l'accélération. Pour autant, même dans ces situations, il n'y a jamais d'accident, ce qui peut s'expliquer par l'adaptation des comportements des autres conducteurs (voir section 5.4).

Ce travail préliminaire nous a permis d'examiner partiellement notre modèle de perception du point de vue de la stabilité dans le temps. Ce travail soulève également la question des différents niveaux de vigilance pour les différentes tâches, qui n'ont pas été pris en compte. Cela représente certainement une voie intéressante pour étendre notre modèle de perception.

Par exemple, un agent A à l'entrée du carrefour est moins vigilant vis-à-vis d'un véhicule en sortie de carrefour (un percept de la sous-tâche de poursuite) que vis-à-vis des véhicules dans et à l'entrée de carrefour (les percepts de la sous-tâche de traversée de carrefour). Il serait donc intéressant d'implanter différentes fréquences de rafraîchissement pour les différentes tâches, ce qui représente différents niveaux de vigilance.

6.2.3 Amélioration de la modélisation de la perception humaine

6.2.3.1 Passage du modèle de Sciences Cognitives au modèle informatique

Les travaux de science cognitive étudiés ne représentent qu'une petite partie de la littérature existante, qu'il faudrait donc approfondir l'état de l'art dans ce domaine pour obtenir un modèle plus proche de la perception humaine réelle.

Cependant, pour passer d'un modèle psychologique à un modèle informatique, nous

avons réalisé quelques simplifications comme la limite de perception sur le nombre des entités perçues. Un percept est un événement sensoriel qui peut être défini de plusieurs façons. L'entité est un assemblage de plusieurs attributs. Le changement de vitesse d'un véhicule peut être considéré comme un événement sensoriel, donc comme un percept.

Les fonctions de processus top-down et bottom-up et leurs paramètres, la façon d'implanter la limite perceptive pourront être remis en cause. Notre travail soulève également des questions qui n'ont pas ou peu été étudiées à propos de l'implantation d'un modèle quantitatif de la perception de conducteur :

- Comment est-il possible de concevoir un mécanisme de perception qui permette de prendre en compte l'information non-pertinente (distracteurs) (voir l'inattention en figure 2.5) ?
- Comment le processus de décision peut-il être décomposé en sous-tâches ? Comment ces sous-tâches peuvent-elles interagir avec le processus de perception ?
- Comment les autres sous-tâches listées dans la section 2.2.2.2 peuvent-elles être intégrées dans un tel modèle de perception ? Quel est la relation d'ordre parmi les sous-tâches de même niveau (e.g. tactique) ?
- Sous quelles conditions une information devient-elle plus importante par rapport aux autres ?

Autant les recherches en sciences cognitives apporteront des réponses plus complètes à ces questions, autant nous pourrons améliorer le modèle. Afin de poursuivre et compléter ces travaux, notre modèle a été implanté de façon flexible et modulaire ce qui devrait faciliter les modifications comme par exemple sur les critères bottom-up, top-down et sur le mécanisme d'intégration des listes de percepts fourni par ces deux processus. Les focus d'attention peuvent être imposés différemment à l'aide d'une fonction de sélection de focus.

6.2.3.2 Modélisation de la limite des ressources

La possibilité d'introduire une variabilité inter-individuelle a été examinée dans notre modèle. Par contre, pour une simulation plus réaliste, une hétérogénéité intra-individuelle est possible et nécessaire avec une limite de perception qui varie au cours du temps. L'être humain a une capacité limitée globale non seulement pour la perception mais aussi pour la décision et l'action. Donc, dans le cas de la prise d'une décision (ou l'exécution d'une action) difficile, les ressources sont utilisées pour le calcul qui est fait pour la décision (ou l'action). Cela diminue d'autant les ressources disponibles en perception, notamment le nombre d'objets qui peut être perçu. Par exemple, la tâche tourne-à-gauche pourrait requérir plus de ressources décisionnelles que la tâche tourne-à-droite impliquant moins de conflit à résoudre (pour un conducteur qui est déjà sur la voie droite de la route).

6.2.3.3 Interprétation des percepts

La capacité de décision dépend aussi de l'exactitude de l'information apportée par la perception. Il est sûrement possible d'intégrer l'ambiguïté des informations perçues. Selon [Rigolli and Brady, 2005], un conducteur comprend une situation en fonction de termes qualitatifs comme « très lent », « pas suffisamment proche », etc. Il est possible d'intégrer

un module distinct de compréhension ou d'interprétation (comme traité par [Endsley, 1995]) qui traduit une information certaine (la vitesse exacte d'un véhicule comme dans notre cas) en une information ambiguë (un véhicule lent). Dans ce cas, ce module intermédiaire de compréhension peut retourner une vitesse standard (v_{lent} , v_{rapide} ou $v_{moyenne}$ qui définit la lenteur ou la rapidité) aux sous-tâches de décision. Ces dernières utiliseraient cette vitesse interprétée au lieu de la vitesse exacte.

L'interprétation des percepts par des concepts peut conduire à la création d'une représentation interne. On retrouve la même approche dans [Buche et al., 2010] où les auteurs présentent l'utilisation d'un modèle de représentation interne explicite avec un FCM (Fuzzy Cognitive Map) pour la simulation des comportements adaptatifs des agents autonomes. Cette représentation interne contient des concepts et leurs relations. La fonction de fuzzification (et respectivement défuzzification) est utilisée pour traduire une distance réelle en concept comme « proche » (resp. pour traduire un concept comme « aller vite » en une vitesse réelle).

6.2.3.4 Rôle de l'environnement

Dans cette thèse, l'accent a été mis sur la modélisation des processus internes (au niveau de l'agent) de la perception avec un haut degré d'autonomie. Dans un environnement physique, la perception d'un agent peut être simplement modélisée par sa capacité (il perçoit ce qu'il peut). Néanmoins, dans un environnement virtuel, l'environnement peut jouer un rôle actif qui est d'imposer les lois perceptives présentées dans le modèle de Weyns [Weyns et al., 2004]. Les lois de perception pourraient intervenir dans le cas de modélisation de contraintes spécifiques. Les contraintes qui mettent les entités derrière un obstacle (e.g. la non-perception d'une voiture derrière un poids lourd) ou les limites de perception sous certaines conditions (visibilité limitée dans le brouillard) peuvent être des exemples d'utilisation des lois perceptives. Selon Weyns [Weyns et al., 2004], même la restriction de la quantité d'information traitée pour améliorer la performance (temps d'exécution) peut être modélisée par une loi de perception.

L'environnement peut aussi jouer un rôle sur la création d'accident. Au lieu de mettre un seuil de décélération dans l'agent, la force de frottement et l'adhérence d'un véhicule à la route peuvent être modélisés par l'intermédiaire de l'environnement ce qui permet que l'accident émerge dans la simulation.

6.2.4 Amélioration de la modélisation du conducteur

Nous avons également soulevé des questions particulières sur la perception du conducteur pendant la traversée de carrefour :

- Quels sont les focus d'attention du conducteur ? Comment évoluent-ils ?
- Quelles propriétés environnementales d'une entité la rend plus saillant pendant la traversée de carrefour ?
- Est-ce qu'il y a une différence au niveau de la perception de l'environnement entre un tourne-à-gauche, un tourne-à-droite et un va-tout-droit ?

En fonction des nouvelles connaissances sur la perception en situation de conduite, particulièrement à l'entrée et à l'intérieur de carrefour, nos choix pourront être remis en

cause et remplacés par des algorithmes plus pertinents.

Toutefois, le modèle a été implanté avec la capacité d'intégrer une nouvelle sous-tâche, e.g. la sous-tâche de Détection de Danger (*DD*) ou la sous-tâche d'Identification de Règlements (*IR*). Ces sous-tâches ont été implantées comme des sous-modules de décision mais pas testées dans le cadre de la modélisation de la perception (même avec des préférences *ad-hoc*) car l'état actuel des connaissances et les données existantes ne permettaient pas de proposer des hypothèses crédibles.

6.2.5 Utilisation

Après de nouvelles validations, notre modèle pourrait servir à tester l'aménagement de carrefours et le déploiement des nouveaux règlements routiers. Les simulations de notre modèle peuvent fournir une mesure de sécurité routière du point de vue de la perception humaine. Les erreurs liées à un nouvel aménagement qui rendent difficile la perception pourraient être détectées avant l'implantation et les gains ou les pertes d'une nouvelle réglementation pourraient être évalués avant qu'ils aient lieu.

Par ailleurs, dans la simulation de conduite, un moyen d'augmenter le niveau de réalisme est d'améliorer le comportement des conducteurs simulés qui peuplent l'environnement virtuel. Après une calibration et une validation plus fine, ce modèle bio-inspiré pourrait être également appliqué à la simulation de conduite afin d'augmenter l'impression de l'utilisateur d'interagir avec de vrais conducteurs.

Le même travail peut être appliqué à la modélisation des perceptions des piétons en reconsidérant les sous-tâches. Quelques sous-tâches, comme la Traversée de Carrefour renommé la Traversée de Rue, la Poursuite, la Détection de Danger peuvent être encore valables par contre leurs réalisations seront différentes, par exemple la Traversée de Carrefour ne se basera pas sur les mêmes focus et la Poursuite peut devenir du suivi de piétons [Lobjois and Cavallo, 2007, Papadimitriou et al., 2009, Brémond et al., 2012].

6.3 Conclusion

La modélisation de la perception d'agent-conducteurs est une problématique difficile et inclut un bon nombre de questions importantes et ouvertes. Ce travail a cherché à répondre à quelques unes de ces questions : comment modéliser et intégrer les deux processus d'attention (bottom-up, top-down) et comment modéliser la limite de perception. Pour autant, nous avons voulu attirer l'attention des chercheurs, ceux concernés par la simulation du trafic, mais aussi de manière générale ceux des domaines de la Modélisation à base d'agent et des Sciences cognitives, sur ce sujet en montrant les bénéfices potentiels : l'effet direct sur le nombre de décélérations fortes, la simulation d'une population plus hétérogène, pour une simulation plus réaliste du trafic routier. Alors que le modèle de perception proposé est un modèle simplifié, il fournit une première base sur laquelle tester de nouvelles hypothèses sur la cognition des conducteurs.

Bibliographie

- [Abbas, 2012] Abbas, M. M. (2012). Agent-based modeling and simulation software tools and an example demonstration. In *Agent-Based Modeling and Simulation Workshop TRB 2012*, Washington, USA.
- [AIMSUN, 2010] AIMSUN (2010). Aimsun 6.1 User's Manual : Microsimulator and Mesosimulator Spain : TSS Transport Simulation Systems.
- [Allen et al., 1971] Allen, T. M., Lunenfeld, H., and Alexander, G. J. (1971). Driver information needs. *Highway Research Board*, 36 :102–115.
- [Anderson et al., 2004] Anderson, J. R., Bothell, D., Byrne, M. D., Douglass, S., Lebiere, C., and Qin, Y. (2004). An integrated theory of the mind. *PSYCHOLOGICAL REVIEW*, 111 :1036–1060.
- [Archer and Kosonen, 2000a] Archer, J. and Kosonen, I. (2000a). Developing the potential of micro-simulation modelling for traffic safety assessment. In *Proceedings of the 13th ICTCT Workshop*, pages 233–246.
- [Archer and Kosonen, 2000b] Archer, J. and Kosonen, I. (2000b). The potential of micro-simulation modeling in relation to traffic safety assessment. In *ESS Conference Proceeding*, pages 427–431.
- [Auberlet et al., 2004] Auberlet, J.-M., Espié, S., and Nadji, M. (2004). From legal time gap towards an adaptative time gap system : study of heterogeneous platoon in the case of emergency braking with traffic simulation tool Archisim. In *Proceedings of Summer Computer Simulation Conference (SCSC 2004)*, San José, USA.
- [Balmer et al., 2004] Balmer, M., Cetin, N., Nagel, K., and Raney, B. (2004). Towards truly agent-based traffic and mobility simulations. In *Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems - Volume 1, AAMAS '04*, pages 60–67, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Baluch and Itti, 2011] Baluch, F. and Itti, L. (2011). Mechanisms of top-down attention. *Trends in Neuroscience*, 34(4) :210–224.
- [Bellet et al., 2009] Bellet, T., Bailly-Asuni, B., Banet, A., and Mayenobe, P. (2009). A theoretical and methodological framework for studying and modelling drivers' mental representations. *Safety Science*, 47(9) :1205–1221.
- [Bjorklund and Aberg, 2005] Bjorklund, G. and Aberg, L. (2005). Driver behaviour in intersections : Formal and informal traffic rules. *Transportation Research Part F*, 8(3) :239–253.

- [Boissier, 2001] Boissier, O. (2001). Modèles et architectures d'agents. In Briot, J. P. and Demazeau, Y., editors, *Principes et Architectures des Systèmes Multi-Agents*, IC2, pages 71–107. hermes.
- [Boissier et al., 2004] Boissier, O., Gitton, S., and Glize, P. (2004). Caractéristiques des systèmes et des applications. In *Systèmes Multi-Agents*, pages 25–54. Observatoire Français des Techniques Avancées, ARAGO 29, Diffusion Editions TEC & DOC.
- [Bosse et al., 2009] Bosse, T., van Maanen, P.-P., and Treur, J. (2009). Simulation and formal analysis of visual attention. *Web Intelligence and Agent Systems*, 7(1) :89–105.
- [Brackstone and McDonald, 1999] Brackstone, M. and McDonald, M. (1999). Car-following : a historical review. *Transportation Research Part F*, 2(4) :181–196.
- [Brémond et al., 2012] Brémond, R., Tom, A., Désiré, L., Gigout, E., Granié, M.-A., and Auberlet, J.-M. (2012). Visual cues in pedestrian's crossing decision : in search of a quantitative model. In *Proc. Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington DC.
- [Brenac et al., 2003] Brenac, T., Nachtergaële, C., and Reigner, H. (2003). Scénarios types d'accidents impliquant des piétons et éléments pour leur prévention. *Rapport Inrets*, 256 :100–104.
- [Brilon and Miltner, 2005] Brilon, W. and Miltner, T. (2005). Capacity and delays at intersections without traffic signals. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1920 :32–40.
- [Brilon and Wu, 2001] Brilon, W. and Wu, N. (2001). Capacity at unsignalized intersections derived by conflict technique. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1776(1) :82–90.
- [Brooks, 1991] Brooks, R. (1991). Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, 47 :139–159.
- [Buche et al., 2010] Buche, C., Chevaillier, P., Nédélec, A., Parenthoën, M., and Tisseau, J. (2010). Fuzzy cognitive maps for the simulation of individual adaptive behaviors. *Comput. Animat. Virtual Worlds*, 21(6) :573–587.
- [Buisson and Lesort, 2010] Buisson, C. and Lesort, J. (2010). *Comprendre le trafic routier : Méthodes et calculs*. Références - CERTU. La Documentation Française.
- [Casas et al., 2010] Casas, J., Ferrer, J. L., Garcia, D., Perarnau, J., and Torday, A. (2010). Traffic simulation with aimsun. In Barceló, J., editor, *Fundamentals of Traffic Simulation*, volume 145 of *International Series in Operations Research and Management Science*, pages 173–232. Springer New York.
- [Chaib-Draa et al., 2001] Chaib-Draa, B., Moulin, B., and Jarras, I. (2001). Agent et systèmes multi-agents. In J.P. Briot et Y. Demazeau, editor, *Principes et Architecture des Systèmes Multi-Agents*. Hermes, Lavoisier.
- [Champion, 2003] Champion, A. (2003). *Mécanisme de coordination multi-agent fondé sur des jeux : application à la simulation comportementale de trafic routier en situation de carrefour*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.

- [Champion et al., 2001] Champion, A., Espié, S., and Auberlet, J.-M. (2001). Behavioral road traffic simulation with ARCHISIM. In *Proceedings of Summer Computer Simulation Conference*, Orlando, USA.
- [Champion et al., 2002] Champion, A., Zhang, M., Auberlet, J., and Espié, S. (2002). Behavioural simulation towards highdensity network traffic studies. *Traffic and Transportation Studies (Proceedings of ICTTS)*, pages 988–995.
- [Chimir et al., 2005] Chimir, I. A., Abu-Dawwas, W. A., and Horney, M. A. (2005). Neisser’s cycle of perception : Formal representation and practical implementation. *Journal of Computer Science (Special Issue)*, pages 106–111.
- [Chopra-Khullar and Badler, 1999] Chopra-Khullar, S. and Badler, N. I. (1999). Where to look ? automating attending behaviors of virtual human characters. In *Proceedings of the third annual conference on Autonomous Agents*, AGENTS ’99, pages 16–23, New York, NY, USA. ACM.
- [Chrisman and Simmons, 1991] Chrisman, L. and Simmons, R. (1991). Sensible planning : focusing perceptual attention. In *Proceedings of the ninth National conference on Artificial intelligence - Volume 2*, AAAI’91, pages 756–761. AAAI Press.
- [Courty et al., 2003] Courty, N., Marchand, E., and Arnaldi, B. (2003). A new application for saliency maps : synthetic vision of autonomous actors. In *Image Processing, 2003. ICIP 2003. Proceedings. 2003 International Conference on*, volume 3, pages III–1065–8 vol.2.
- [Cowan, 2001] Cowan, N. (2001). The magic number 4 in short-term memory : a reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Science*, 24 :87–185.
- [Daganzo, 1981] Daganzo, C. F. (1981). Estimation of gap acceptance parameters within and across the population from direct roadside observation. *Transportation Research Part B : Methodological*, 15(1) :1–15.
- [Davidsson, 2002] Davidsson, P. (2002). Agent based social simulation : A computer science view. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 5(1).
- [Davis and Swenson, 2004] Davis, G. A. and Swenson, T. (2004). Field study of gap acceptance by left-turning drivers. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1899(1) :71–75.
- [Demazeau et al., 2000] Demazeau, Y., Ocelllo, M., Baeijs, C., and Ricordel, P.-M. (2000). Systems development as societies of agents. In et al., J. C., editor, *Knowledge Engineering and Agent Technology, IOS Series in Artificial Intelligence and Applications*, Amsterdam.
- [Donges, 1978] Donges, E. (1978). A two-level model of driver steering behavior. *Human Factors*, 20(6) :691–707.
- [Doniec, 2006] Doniec, A. (2006). *Prise en compte des comportements anticipatifs dans la coordination multi-agent : application à la simulation de trafic en carrefour*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.
- [Doniec et al., 2008] Doniec, A., Mandiau, R., Piechowiak, S., and Espié, S. (2008). Controlling non-normative behaviors by anticipation for autonomous agents. *Web Intelligence and Agent Systems*, 6(1) :29–42.

- [Donikian, 2004] Donikian, S. (2004). *Modélisation, contrôle et animation d'agents virtuels autonomes évoluant dans des environnements structurés et informés*. Habilitation à diriger des recherches, University of Rennes I.
- [Donikian and Arnaldi, 1994] Donikian, S. and Arnaldi, B. (1994). Complexity and concurrency for behavioral animation and simulation. In *Fifth Eurographics Workshop on Animation and Simulation*, pages 101–113, Oslo, Norvege.
- [Donnadieu et al., 2006] Donnadieu, S., Gentaz, E., and Marendaz, C. (2006). La perception. In Ionescu, S. and Blanchet, A., editors, *Psychologie Cognitive et Bases Neurophysiologiques du Fonctionnement Cognitif*, pages 49–84. Presses Universitaire de France, Paris, France.
- [Drogoul and Ferber, 1992] Drogoul, A. and Ferber, J. (1992). Multi-agent simulation as a tool for modeling societies : Application to social differentiation. In *in Ant Colonies. 4th European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World, Artificial Social Systems*.
- [Ehlert and Rothkrantz, 2001] Ehlert, P. and Rothkrantz, L. (2001). Microscopic traffic simulation with reactive driving agents. In *Intelligent Transportation Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE*, pages 860–865.
- [El Hadouaj, 2004] El Hadouaj, S. (2004). *Conception de comportements de résolution de conflits et de coordination : Application à une simulation multi-agent du trafic routier*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie (UPMC).
- [El-Shawarby et al., 2007] El-Shawarby, I., Rakha, H., Inman, V., and Davis, G. (2007). Evaluation of driver deceleration behaviour at signalised intersections. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2018(1) :29–25.
- [Endsley, 1995] Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human factors*, 37(1) :32–64.
- [EuroRoadS, 2012] EuroRoadS (2012). Euroroads. <http://www.euroroads.org/>.
- [Ferber, 1995] Ferber, J. (1995). *Les systèmes Multi-Agents : Vers une intelligence collective*. InterEditions.
- [Ferber and Müller, 1996] Ferber, J. and Müller, J.-P. (1996). Influences and reactions : a model of situated multiagent systems. In *Proc. of ICMAS'96 (International Conference on Multi-Agent Systems)*, pages 72–79. AAAI Press.
- [Ferreira et al., 2008] Ferreira, P., Esteves, E., Rossetti, R., and Oliveira., E. (2008). Extending microscopic traffic modelling with the concept of situated agents. In *5th Workshop on Agents in Traffic and Transportation (AAMAS 08)*, pages 87–93.
- [Gaonac'h, 2006] Gaonac'h, D. (2006). Introduction la psychologie cognitive. In Ionescu, S. and Blanchet, A., editors, *Psychologie Cognitive et Bases Neurophysiologiques du Fonctionnement Cognitif*, pages 1–46. Presses Universitaire de France, Paris, France.
- [Gazis et al., 1959] Gazis, D. C., Herman, R., and Potts, R. B. (1959). Car-Following Theory of Steady-State Traffic Flow. *Operations Research*, 7(4) :499–505.
- [Gehrke, 2008] Gehrke, J. D. (2008). Evaluating situation awareness of autonomous systems. In *Proceedings of the 8th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems*, PerMIS '08, pages 206–213, New York, NY, USA. ACM.

- [Gerlough, 1955] Gerlough, D. L. (1955). *Simulation of freeway traffic on a general purpose discrete variable computer*. PhD thesis, UCLA.
- [Gettman and Head, 2003] Gettman, D. and Head, L. (2003). Surrogate safety measures from traffic simulation models. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1840(1) :104–115.
- [Gibson, 1979] Gibson, J. J. (1979). The ecological approach to visual perception.
- [Gilbert and Troitzsch, 2005] Gilbert, N. and Troitzsch, K. G. (2005). *Simulation for the Social Scientist*. Open University Press.
- [Gipps, 1981] Gipps, P. (1981). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B : Methodological*, 15(2) :105 – 111.
- [Godefroid, 2008] Godefroid, J. (2008). *Psychologie : Science humaine et science cognitive*. Ouvertures psychologiques. L.M.D. De Boeck Supérieur.
- [Gregory, 1980] Gregory, R. L. (1980). Perception as hypotheses. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 290 :181 – 197.
- [Gregory, 1997] Gregory, R. L. (1997). Knowledge in perception and illusion. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 352 :1121 – 1128.
- [Hanon et al., 2006] Hanon, D., Grislin-Le Strugeon, E., and Mandiau, R. (2006). Un modèle décisionnel orienté comportement utilisant le vote, application à la navigation autonome en environnement simulé. *RFIA 2006 15ème congrès francophone Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*.
- [Helleboogh et al., 2007] Helleboogh, A., Vizzari, G., Uhrmacher, A., and Michel, F. (2007). Modeling dynamic environments in multi-agent simulation. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 14(1) :87–116.
- [Herviou, 2006] Herviou, D. (2006). *La perception visuelle des entités autonomes en réalité virtuelle : application à la simulation de trafic routier*. PhD thesis, Partenariat INSERR/ENIB.
- [Hidas, 2005] Hidas, P. (2005). Modelling individual behaviour in microsimulation models. *Twenty-eighth Australian Transport Research Forum*.
- [Hoogendoorn and Bovy, 2001] Hoogendoorn, S. P. and Bovy, P. H. L. (2001). State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling. In *Proc. Institution of Mechanical Engineers*, volume 215, pages 283–303.
- [Hugues and Cole, 1986] Hugues, P. K. and Cole, B. L. (1986). What attracts attention when driving? *Ergonomics*, 29(3) :377–391.
- [HUTSIM, 2012] HUTSIM (2012). Hutsim. <http://users.tkk.fi/u/ikosonen/ENG/hutsim.html>.
- [Ikhibi, 2012] Ikhibi, F. E. (2012). Temps et perception pour les agents conducteurs. Master’s thesis, Université Dauphine, Paris IX.
- [Itti and Koch, 2001] Itti, L. and Koch, C. (2001). Computational modelling of visual attention. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(3) :194–203.

- [Jones et al., 2004] Jones, S., Sullivan, A., Cheekoti, N., and M.D., A. (2004). *Traffic simulation software comparison study*. University Transportation Center for Alabama report. University Transportation Center for Alabama.
- [Kesting et al., 2009] Kesting, A., Treiber, M., and Helbing, D. (2009). Agents for traffic simulation. In *Multi-Agents systems : Simulations and Applications*, pages 325–356. Taylor and Francis.
- [Ketenci, 2010] Ketenci, U. G. (2010). Processus cognitifs et perceptifs pour la simulation du conducteur en carrefour : travaux préliminaires. ACTES des Journées des Doctorants INRETS.
- [Ketenci, 2011] Ketenci, U. G. (2011). Perception active et limitée. Présentation au Journées des Doctorants IFSTTAR.
- [Ketenci, 2012a] Ketenci, U. G. (2012a). Microscopic traffic simulation of crossroads. In *Doctoral Student Research in Transportation Modeling Workshop of the 91th Transportation Research Board annual meeting*, Washington.
- [Ketenci, 2012b] Ketenci, U. G. (2012b). Modélisation de perception humaine limitée, application à un scénario accidentogène de simulation de trafic : la traversée de carrefour. Présentation au Séminaire LAMIH.
- [Ketenci et al., 2010a] Ketenci, U. G., Auberlet, J.-M., Brémond, R., and Grislin-Le Strugeon, E. (2010a). Impact of attentional factors in a multi-agent traffic simulation. In *23rd Annual Conference on Computer Animation and Social Agents, CASA 2010*, St Malo (France).
- [Ketenci et al., 2012] Ketenci, U.-G., Auberlet, J.-M., Brémond, R., and Grislin-Le Strugeon, E. (2012). Improved road crossing behavior with active perception approach. In *Proc. of the 91th Transportation Research Board annual meeting*, Washington.
- [Ketenci et al., 2011a] Ketenci, U. G., Bourgois, L., and Auberlet, J.-M. (2011a). SAPIEN. Démonstrations d’outils de simulation, Journée technique organisée par le CERTU, le SETRA en partenariat avec l’ENTPE, l’IFSTTAR et les Centres d’Études Techniques du Ministère de l’Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement.
- [Ketenci et al., 2010b] Ketenci, U.-G., Brémond, R., Auberlet, J.-M., and Grislin-Le Strugeon, E. (2010b). Bounded active perception. In *Proceedings of the 8th European Workshop on Multi-Agent Systems (EUMAS 2010)*, Paris.
- [Ketenci et al., 2011b] Ketenci, U. G., Grislin-Le Strugeon, E., Brémond, R., and Auberlet, J.-M. (2011b). Simulation de perception humaine limitée : étude de l’influence d’un paramètre de seuil (présentation courte). In *JFSMA*, pages 169–178.
- [Kinny et al., 1992] Kinny, D., Georgeff, M., and Hendler, J. (1992). Experiments in optimal sensing for situated agents. In *The second Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence, PRICAI*.
- [Klügl, 2009] Klügl, F. (2009). Agent-based simulation engineering. Habilitation thesis.
- [Klügl et al., 2005] Klügl, F., Fehler, M., and Herrler, R. (2005). About the role of the environment in multi-agent simulations. In *Proceedings of the First international conference on Environments for Multi-Agent Systems, E4MAS’04*, pages 127–149, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag.

- [Leclercq and Becarie, 2012] Leclercq, L. and Becarie, C. (2012). Meso Lighthill-Whitham and Richards model designed for network applications. *Transportation Research Part B : Methodological*, page 15.
- [Lemonnier, 2012] Lemonnier, S. (2012). Prise d'information sur la route : attention, saillance visuelle et effet du contexte. Session de Poster - 11ème Forum des Sciences Cognitives.
- [Lobjois and Cavallo, 2007] Lobjois, R. and Cavallo, V. (2007). Age-related differences in street-crossing decisions : the effects of vehicle speed and time constraints on gap selection in an estimation task. *Accident Analysis and Prevention*, 39 :934–943.
- [Macal and North, 2008] Macal, C. M. and North, M. J. (2008). Agent-based modeling and simulation : ABMS examples. In *Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation*, WSC '08, pages 101–112. Winter Simulation Conference.
- [Macedo, 2010a] Macedo, L. (2010a). Selecting information based on artificial forms of selective attention. In Coelho, H., Studer, R., and Wooldridge, M., editors, *Proceedings of the 19th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI 2010)*, pages 1053–1054. IOS Press, Amsterdam.
- [Macedo, 2010b] Macedo, L. (2010b). A surprise-based selective attention agent for travel information. In *International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, pages 111–120.
- [Mahmassani and Sheffi, 1981] Mahmassani, H. and Sheffi, Y. (1981). Using gap sequences to estimate gap acceptance functions. *Transportation Research Part B : Methodological*, 15(3) :143–148.
- [Mandiau et al., 2008] Mandiau, R., Champion, A., Auberlet, J.-M., Espié, S., and Kolski, C. (2008). Behaviour based on decision matrices for a coordination between agents in a urban traffic simulation. *Applied Intelligence*, 28(2) :121–138.
- [Marois and Ivanoff, 2005] Marois, R. and Ivanoff, J. (2005). Capacity limits of information processing in the brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(6) :296 – 305.
- [Martens and Fox, 2007] Martens, M. H. and Fox, M. (2007). Does road familiarity change eye fixations ? A comparison between watching a video and real driving. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 10(1) :33–47.
- [Matthews et al., 2001] Matthews, G. M., Bryant, D. J., Webb, R., and Harbluk, J. L. (2001). Model for situation awareness and driving : Application to analysis and research for intelligent transportation systems. *Transportation Research Record*, 1779(1779) :26–32.
- [Michel, 2007] Michel, F. (2007). The irm4s model : the influence/reaction principle for multiagent based simulation. In *AAMAS*, page 133.
- [Michon, 1985] Michon, J. (1985). A critical view of driver behavior models : What do we know, what should we do ? In Evans, L. and Schwing, R., editors, *Human behavior and traffic safety*, pages 485–520. Plenum Press, New York, USA.
- [Miller, 1956] Miller, G. (1956). The magical number seven, plus or minus two : Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63 :81–97.

- [Neisser, 1976] Neisser, U. (1976). *Cognition and Reality*. W.H. Freeman and Company.
- [North, 2010] North, M. (2010). Agent-based modeling with repast simphony including a consumer products modeling example. Technical report, Office of Operations R&D Federal Highway Administration.
- [Occello and Demazeau, 1994] Occello, M. and Demazeau, Y. (1994). Building real time agents using parallel blackboards and its use for mobile robotics. In *Proceedings of the IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics*.
- [ONISR, 2011] ONISR (2011). *La sécurité routière en France, Bilan de l'année 2010*. La Documentation Française.
- [Papadimitriou et al., 2009] Papadimitriou, E., Yannis, G., and Golias, J. (2009). A critical assessment of pedestrian behaviour models. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 12(3) :242 – 255.
- [Papageorgiou et al., 2010] Papageorgiou, M., Papamichail, I., Messmer, A., and Wang, Y. (2010). Traffic simulation with metanet. In Barceló, J. and Hillier, F. S., editors, *Fundamentals of Traffic Simulation*, volume 145 of *International Series in Operations Research & Management Science*, pages 399–430. Springer New York.
- [Parker and Stradling, 2001] Parker, D. and Stradling, S. (2001). Influencing driver attitudes and behaviour. Technical report, Road Safety Research Report 17. Department of the Environment, Transport and the Regions, London.
- [Paruchuri et al., 2002] Paruchuri, P., Pullalarevu, A. R., and Karlapalem, K. (2002). Multi agent simulation of unorganized traffic. In *AAMAS*, pages 176–183.
- [Peters and O'Sullivan, 2003] Peters, C. and O'Sullivan, C. (2003). Bottom-up visual attention for virtual human animation. In *In Computer Animation for Social Agents*, pages 111–117.
- [Petit et al., 2012] Petit, J., Brémond, R., and Tom, A. (2012). Evaluation of tone mapping operators in night-time virtual worlds. *Virtual Reality*, pages 1–10. (in press).
- [Pirjanian, 1999] Pirjanian, P. (1999). Behavior coordination mechanisms-state-of-the-art. *Institute for Robotics and Intelligent Systems, School of Engineering, University of Southern California, Tech. Rep. IRIS-99-375*.
- [Rao and Georgeff, 1991] Rao, A. S. and Georgeff, M. P. (1991). Modeling rational agents within a bdi-architecture. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'91)*., pages 473–484. Morgan Kaufmann.
- [Rasmussen, 1983] Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge : signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 13(3) :257–266.
- [REPAST, 2010] REPAST (2010). Repast <http://repast.sourceforge.net/>.
- [Rigolli and Brady, 2005] Rigolli, M. and Brady, M. (2005). Towards a behavioural traffic monitoring system. In *Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, AAMAS 05, pages 449–454, New York, NY, USA. ACM.

- [Russell and Norvig, 2003] Russell, S. and Norvig, P. (2003). *Artificial Intelligence : A Modern Approach*, chapter Intelligent Agents, pages 31–52. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2nd edition.
- [Salvucci, 2002] Salvucci, D. D. (2002). Modeling driver distraction from cognitive tasks. In *In Proceedings of the 24th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, pages 792–797.
- [Schaap et al., 2009] Schaap, T., van Dijck, T., van Arem, B., and Morsink, P. (2009). A PC microsimulation of a gap acceptance model for turning left at a T-junction. In *Proc. of the 88th Transportation Research Board annual meeting*, Washington.
- [Schneider and Shiffrin, 1977] Schneider, W. and Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing : I. detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84(1) :1–66.
- [Schoelles and Gray, 2003] Schoelles, M. and Gray, W. (2003). Top-down versus bottom-up control of cognition in a task switching paradigm. In *Fifth International Conference on Cognitive Modeling*. Citeseer.
- [Shinoda et al., 2001] Shinoda, H., Hayhoe, M. M., and Shrivastava, A. (2001). What controls attention in natural environments? *Vision research*, 41 :3535–3545.
- [So, 2007] So, R. and Sonenberg, L. (2007). Situation awareness as a form of meta-level control. In *Proc. of the First International Workshop on Metareasoning in Agent-Based Systems at the Sixth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, Honolulu, Hawaii.
- [So and Sonenberg, 2009] So, R. and Sonenberg, L. (2009). The roles of active perception in intelligent agent systems. In Lukose, D. and Shi, Z., editors, *Multi-Agent Systems for Society*, pages 139–152. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [Spek et al., 2006] Spek, A., Wieringa, P., and Janssen, W. (2006). Intersection approach speed and accident probability. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 9(2) :155 – 171.
- [Sperling, 1960] Sperling, G. (1960). The information available in brief visual presentations. *Psychological Monographs : General and Applied*, 74(11) :1–29.
- [Sukthankar et al., 1998] Sukthankar, R., Baluja, S., and Hancock, J. (1998). Multiple adaptive agents for tactical driving. *Applied Intelligence*, 9(1) :7–23.
- [Tatler et al., 2011] Tatler, B. W., Hayhoe, M. M., Land, M. F., and Ballard, D. H. (2011). Eye guidance in natural vision : Reinterpreting salience. *Journal of vision*, 11(5) :art. 5.
- [Treisman and Gelade, 1980] Treisman, A. M. and Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12(1) :97–136.
- [Van Der Molen and Botticher, 1988] Van Der Molen, H. H. and Botticher, A. M. T. (1988). A hierarchical risk model for traffic participants. *Ergonomics*, 31(4) :537–555.
- [Violette and Voisin, 2005] Violette, E. and Voisin, M. (2005). *Projet RADARR : Analyse des trajectoires en carrefour*. CETE Normandie-Centre.

- [Wang et al., 2005] Wang, H., Kearney, J. K., and Cremer, J. (2005). Steering behaviors for autonomous vehicles in virtual environments. In *Proceedings of the 2005 IEEE Conference 2005 on Virtual Reality, VR '05*, pages 155–162, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Weyns et al., 2005a] Weyns, D., Helleboogh, E., and Holvoet, T. (2005a). The packet-world : a test bed for investigating situated multi-agent systems. In *Agent-based applications, platforms, and development kits. Whitestein Series in Software Agent Technology*.
- [Weyns and Holvoet, 2004] Weyns, D. and Holvoet, T. (2004). A formal model for situated multi-agent systems. *Fundamenta Informaticae - Multiagent Systems (FAMAS'03)*, 63(2-3) :125–158.
- [Weyns et al., 2007] Weyns, D., Omicini, A., and Odell, J. (2007). Environment as a first-class abstraction in multi-agent systems. In *International Journal on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, volume 14(1), pages 5–30.
- [Weyns et al., 2005b] Weyns, D., Schelfhout, K., Holvoet, T., and Lefever, T. (2005b). Decentralized control of E'GV transportation systems. In *Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems, AAMAS '05*, pages 67–74, New York, NY, USA. ACM.
- [Weyns et al., 2004] Weyns, D., Steegmans, E., and Holvoet, T. (2004). Towards active perception in situated multi-agent systems. *Applied Artificial Intelligence*, 18(9-10) :867–883.
- [Wolfe, 1994] Wolfe, J. (1994). Guided search 2.0 a revised model of visual search. *Psychonomic Bulletin & Review*, 1 :202–238.
- [Wooldridge and Jennings, 1995] Wooldridge, M. and Jennings, N. R. (1995). Intelligent agents : Theory and practice. *Knowledge Engineering Review*, 10 :115–152.
- [Wykowska and Schubo, 2012] Wykowska, A. and Schubo, A. (2012). Perception and action as two sides of the same coin. A review of the importance of action-perception links in humans for social robot design and research. *Int J Soc Robot*, 4 :5–14.

Annexe A

A.1 Les règles de priorité de la traversée de carrefour

Un signe « stop » rend l'agent plus patient vis-à-vis du temps perdu à l'entrée du carrefour, et il ne force pas le passage jusqu'à un certain seuil d'impatience. Suite au dépassement de ce seuil d'impatience, l'agent x force ou ne force pas le passage selon les 2 règles suivantes :

$$\begin{aligned} & \textit{Impatient}(x) \wedge \textit{FaibleVitesse}(x) \wedge \textit{PeutAtteindre}(x, y) \\ & \rightarrow \textit{Prio}(x, y) \wedge \neg \textit{Prio}(y, x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \textit{Impatient}(x) \wedge \textit{FaibleVitesse}(x) \wedge \neg \textit{PeutAtteindre}(x, y) \\ & \rightarrow \neg \textit{Prio}(x, y) \wedge \textit{Prio}(y, x) \end{aligned}$$

Si l'agent x est impatient et a une vitesse supérieur à 5 m/s , on exécute un autre ensemble de priorités :

$$\begin{aligned} & \textit{Impatient}(x) \wedge \neg \textit{FaibleVitesse}(x) \wedge \textit{Loin}(x, y) \\ & \rightarrow \neg \textit{Prio}(x, y) \wedge \textit{Prio}(y, x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \textit{Impatient}(x) \wedge \neg \textit{FaibleVitesse}(x) \wedge \neg \textit{Loin}(x, y) \wedge \textit{FaibleVitesse}(y) \wedge \textit{Acc}(y) \wedge \textit{PeutAtteindre}(y, x) \\ & \rightarrow \neg \textit{Prio}(x, y) \wedge \textit{Prio}(y, x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \textit{Impatient}(x) \wedge \neg \textit{FaibleVitesse}(x) \wedge \neg \textit{Loin}(x, y) \wedge \textit{FaibleVitesse}(y) \wedge \textit{Acc}(y) \wedge \neg \textit{PeutAtteindre}(y, x) \\ & \rightarrow \textit{Prio}(x, y) \wedge \neg \textit{Prio}(y, x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \textit{Impatient}(x) \wedge \neg \textit{FaibleVitesse}(x) \wedge \neg \textit{Loin}(x, y) \wedge \textit{FaibleVitesse}(y) \wedge \neg \textit{Acc}(y) \\ & \rightarrow \textit{Prio}(x, y) \wedge \neg \textit{Prio}(y, x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \textit{Impatient}(x) \wedge \neg \textit{FaibleVitesse}(x) \wedge \neg \textit{Loin}(x, y) \wedge \neg \textit{FaibleVitesse}(y) \wedge \textit{Acc}(y) \\ & \rightarrow \textit{Prio}(x, y) \wedge \neg \textit{Prio}(y, x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \textit{Impatient}(x) \wedge \neg \textit{FaibleVitesse}(x) \wedge \neg \textit{Loin}(x, y) \wedge \neg \textit{FaibleVitesse}(y) \wedge \neg \textit{Acc}(y) \\ & \rightarrow \textit{Prio}(x, y) \wedge \neg \textit{Prio}(y, x) \end{aligned}$$

Si l'agent x n'est pas impatient, il n'a pas tendance à se considérer comme prioritaire et à forcer le passage. Pourtant, selon la distance à conflit, la vitesse et l'accélération instantanée de l'adversaire y , l'agent x peut choisir de passer avant l'agent y .

$$\neg\text{Impatient}(x) \wedge \neg\text{FaibleVitesse}(x) \wedge \neg\text{Loin}(x, y) \wedge \text{FaibleVitesse}(y) \wedge \text{Acc}(y) \wedge \neg\text{PeutAtteindre}(y, x) \\ \rightarrow \text{Prio}(x, y) \wedge \neg\text{Prio}(y, x)$$

$$\neg\text{Impatient}(x) \wedge \text{FaibleVitesse}(x) \wedge \neg\text{Loin}(x, y) \wedge \text{FaibleVitesse}(y) \wedge \neg\text{Acc}(y) \\ \rightarrow \text{Prio}(x, y) \wedge \neg\text{Prio}(y, x)$$

$$\neg\text{Impatient}(x) \wedge \text{FaibleVitesse}(x) \wedge \neg\text{Loin}(x, y) \wedge \text{FaibleVitesse}(y) \wedge \text{Acc}(y) \wedge \neg\text{PeutAtteindre}(y, x) \\ \rightarrow \text{Prio}(x, y) \wedge \neg\text{Prio}(y, x)$$

$$\neg\text{Impatient}(x) \wedge \text{FaibleVitesse}(x) \wedge \neg\text{Loin}(x, y) \wedge \neg\text{FaibleVitesse}(y) \wedge \text{Acc}(y) \\ \rightarrow \text{Prio}(x, y) \wedge \neg\text{Prio}(y, x)$$

$$\neg\text{Impatient}(x) \wedge \text{FaibleVitesse}(x) \wedge \neg\text{Loin}(x, y) \wedge \neg\text{FaibleVitesse}(y) \wedge \neg\text{Acc}(y) \\ \rightarrow \text{Prio}(x, y) \wedge \neg\text{Prio}(y, x)$$

$$\neg\text{Impatient}(x) \wedge \neg\text{FaibleVitesse}(x) \wedge \neg\text{Loin}(x, y) \wedge \text{FaibleVitesse}(y) \wedge \neg\text{Acc}(y) \\ \rightarrow \text{Prio}(x, y) \wedge \neg\text{Prio}(y, x)$$

$$\neg\text{Impatient}(x) \wedge \neg\text{FaibleVitesse}(x) \wedge \neg\text{Loin}(x, y) \wedge \neg\text{FaibleVitesse}(y) \wedge \text{Acc}(y) \\ \rightarrow \text{Prio}(x, y) \wedge \neg\text{Prio}(y, x)$$

$$\neg\text{Impatient}(x) \wedge \neg\text{FaibleVitesse}(x) \wedge \neg\text{Loin}(x, y) \wedge \text{FaibleVitesse}(y) \wedge \neg\text{Acc}(y) \\ \rightarrow \text{Prio}(x, y) \wedge \neg\text{Prio}(y, x)$$

$$\neg\text{Impatient}(x) \wedge \neg\text{FaibleVitesse}(x) \wedge \neg\text{Loin}(x, y) \wedge \neg\text{FaibleVitesse}(y) \wedge \neg\text{Acc}(y)$$

$$\rightarrow Prio(x, y) \wedge \neg Prio(y, x)$$

Et dans ces situations où l'agent x n'est pas impatient, il se considère comme non-prioritaire :

$$\begin{aligned} & \neg Impatient(x) \wedge FaibleVitesse(x) \wedge Loin(x, y) \\ & \rightarrow \neg Prio(x, y) \wedge Prio(y, x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \neg Impatient(x) \wedge \neg FaibleVitesse(x) \wedge Loin(x, y) \\ & \rightarrow \neg Prio(x, y) \wedge Prio(y, x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \neg Impatient(x) \wedge FaibleVitesse(x) \wedge \neg Loin(x, y) \wedge FaibleVitesse(y) \wedge Acc(y) \wedge PeutAtteindre(y, x) \\ & \rightarrow \neg Prio(x, y) \wedge Prio(y, x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \neg Impatient(x) \wedge \neg FaibleVitesse(x) \wedge \neg Loin(x, y) \wedge FaibleVitesse(y) \wedge Acc(y) \wedge PeutAtteindre(y, x) \\ & \rightarrow \neg Prio(x, y) \wedge Prio(y, x) \end{aligned}$$

Pour ne pas perturber la décision de l'agent avec des règles de décisions qui peuvent changer d'un pas à l'autre, autrement dit pour ne pas créer des instabilités au niveau de la décision, l'agent est doté de ces règles complémentaires :

$$\begin{aligned} & \neg Impatient(x) \wedge FaibleVitesse(x) \wedge \neg Loin(x, y) \wedge \neg FaibleVitesse(y) \wedge Acc(y) \\ & \rightarrow Prio(x, y) \wedge \neg Prio(y, x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \neg Impatient(x) \wedge FaibleVitesse(x) \wedge \neg Loin(x, y) \wedge \neg FaibleVitesse(y) \wedge \neg Acc(y) \\ & \rightarrow Prio(x, y) \wedge \neg Prio(y, x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \neg Impatient(x) \wedge \neg FaibleVitesse(x) \wedge \neg Loin(x, y) \wedge \neg FaibleVitesse(y) \wedge Acc(y) \\ & \rightarrow Prio(x, y) \wedge \neg Prio(y, x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \neg Impatient(x) \wedge \neg FaibleVitesse(x) \wedge \neg Loin(x, y) \wedge \neg FaibleVitesse(y) \wedge \neg Acc(y) \\ & \rightarrow Prio(x, y) \wedge \neg Prio(y, x) \end{aligned}$$

Annexe B

B.1 Coûts de perception

En résumé, le processus de perception se déroule selon l'algorithme suivant :

Algorithm 1 Perception active et limitée

Require: E_p, S_+, fc, r, s, n

$TaskActivation \leftarrow Preattention(E_p)$

$ATD \leftarrow AcquisitionTD(S_+, E_p); ABU \leftarrow AcquisitionBU(E_p)$

$PerceptList \leftarrow Integration(PTD, PBU)$

$LimitedPercept \leftarrow Limitation(PerceptAll, n)$

Return $LimitedPercepts$

L'activation des tâches réalise au plus ns calcul pour les prémisses des sous-tâches à activer. Les prémisses d'activation constituent généralement des simples calculs de distances dont on note le coût $C_{activation}$. Donc le coût maximal de cette étape est $C_{Preattention} = ns \cdot C_{activation}$.

Les opérations d'acquisition TD et BU accèdent chacune au pire à la totalité des ne entités qui appartiennent à la partie perceptible de l'environnement ($ne = \text{card}(E_p)$) : $\text{card}(ATD) \leq ne$, $\text{card}(ABU) \leq ne$. Le coût de cette étape est lié à la lecture des données correspondant à ces ne entités, dont le coût est noté $C_{lecture}$. Également, l'attribution des valeurs de saillance et pertinence se réalise. Au pire, chaque sous-tâche traite les ne entités et on a $\text{card}(ATD) \leq ne \cdot ns$. La classification BU traite une seule fois les ne entités : $\text{card}(ABU) \leq ne$. Le coût de cette étape est lié au calcul des valeurs de pertinence (avec un coût C_r) et de saillance (avec un coût C_s). Le coût maximal de cette étape si les deux opérations TD et BU sont traitées séquentiellement est donc : $C_{acquisition} = 2 ne \cdot C_{lecture} + ne \cdot ns \cdot C_r + ne \cdot C_s$.

L'étape d'intégration consiste à :

- donner une valeur de saillance aux valeurs de PTD, le coût total de ce traitement est $\text{card}(PTD) \cdot C_s$, donc au pire : $ne \cdot ns \cdot C_s$;
- donner une valeur de pertinence « par défaut » aux valeurs de PBU, le coût total de ce traitement est $\text{card}(PBU) \cdot C_r$, donc au pire : $ne \cdot C_r$;
- attribuer aux entités e_i de $PTD \cup PBU$ (au pire $\text{card}(PerceptAll) \leq ne \cdot ns$) la valeur $fc(e_i)$ en fonction de r et s . Si cette fonction fc a un coût C_{fc} , le coût de l'intégration est au pire : $C_{integration} = ne \cdot ns \cdot C_s + ne \cdot C_r + ne \cdot ns \cdot C_{fc}$.

La limitation est un tri qui s'arrête aux n premiers éléments, donc on peut obtenir (avec un algorithme de type « tri par tas » par exemple) $C_{limitation}$ en $ne \cdot ns \cdot \log(ne \cdot ns)$.

Le coût total de traitement pour la perception selon notre modèle peut donc être évalué à :

$$\begin{aligned} C_{perception} &= C_{preattention} + C_{acquisition} + C_{classification} + C_{integration} + C_{limitation} \\ &= ns \cdot C_{activation} + 2 ne \cdot C_{lecture} + ne(ns + 1)(C_r + C_s) + ne \cdot ns(C_{fc} + \log(ne \cdot ns)) \end{aligned}$$

Résumé

Dans le domaine de la modélisation du trafic routier, des améliorations sont nécessaires afin de permettre de simuler des situations accidentogènes. La grande majorité des modèles microscopiques actuels à base d'agents pour la simulation de trafic concerne l'activité décisionnelle du conducteur. Or, l'activité de perception est un préalable important à la décision. Notre objectif est donc de proposer de nouvelles solutions pour la modélisation agent de la perception du conducteur humain. La proposition comprend une double activité de perception (passive et active), couplée à une limitation quantitative des percepts (limite de la mémorisation à court-terme). Le modèle a été implémenté et testé dans le contexte d'un carrefour pour lequel nous possédons un ensemble de données d'observation. Les résultats obtenus confirment l'intérêt du modèle pour simuler des comportements proches des comportements observés et des variations inter-individuelles dans la population de conducteurs.

Mots-clés: Agent, Perception, Modélisation du Trafic Routier, Carrefour, Situation Accidentogène.

Abstract

In the context of traffic modeling, we need some improvements in order to allow to simulate the near accident situations. The most actual agent based traffic simulations tools focus on the decision activity of drivers. However, the activity of perception is an important precondition of decision. We aim to propose new solutions for agent based modeling of human drivers perception. The proposition include a double activity of perception (passive and active), coupled with a quantitative limitation of percepts (depending on the limit of short term memory). The model has been implemented and tested in the context of a crossroad for which we have a set of observation data. The obtained results confirm the interest of the model to simulate the behaviors of drivers more realistically, and to improve interindividual variations in the driver population.

Keywords: Agent, Perception, Traffic Modeling, Crossroad, Near Accident Situation.

