



HAL
open science

Développement d'un modèle du conducteur automobile : De la modélisation cognitive à la simulation numérique

Jean-Charles Bornard

► **To cite this version:**

Jean-Charles Bornard. Développement d'un modèle du conducteur automobile : De la modélisation cognitive à la simulation numérique. Informatique. UNIVERSITÉ BORDEAUX I, 2012. Français. NNT: . tel-01670233

HAL Id: tel-01670233

<https://hal.science/tel-01670233>

Submitted on 21 Dec 2017

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 DE
L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I**

Spécialité
Cognitive

ÉCOLE DOCTORALE
**DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR
ED 209**

Présentée par
Jean-Charles BORNARD

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX I

Sujet de la thèse :
**Développement d'un modèle du conducteur automobile :
De la modélisation cognitive à la simulation numérique**

Obtenu le 21 Décembre 2012

Devant le jury composé de :

Pr. Guy BOY	Rapporteur	Florida Institute of Technology
Pr. Andry RAKOTONIRAINY	Rapporteur	Queensland University of Technology
Pr. Bernard CLAVERIE	Directeur	IMS - Institut Polytechnique de Bordeaux
Dr. Thierry BELLET	Co-Directeur	LESCOT - IFSTTAR
Dr. Dominique GRUYER	Examineur	LIVIC - IFSTTAR
Pr. Jean-Philippe DOMENGER	Examineur	LaBRI - Université Bordeaux 1
Pr. Pascal FOUILLAT	Examineur	IMS - Institut Polytechnique de Bordeaux
Pr. Patrick MILLOT	Examineur	LAMIH - Université de Valenciennes

Conseils aux lecteurs

La connaissance de quelques règles respectées dans cet ouvrage permet une lecture plus pratique.

Tout d'abord, chaque lien interne du document est légèrement coloré en bleu et les références bibliographiques en rouge. Le fait de cliquer sur le lien permet d'aller consulter la page de référence. Par la suite, pour revenir à la lecture, la combinaison de touche **"Alt" + "flèche gauche"** avec la plupart des lecteurs PDF permet de revenir à la source du lien précédemment utilisé. Les liens internes peuvent renvoyer vers une section, vers un terme du glossaire ou de la liste des acronymes, ou enfin vers une figure ou un tableau.

De plus, vous trouverez dans cet ouvrage des **codes QR¹** permettant l'accès rapide vers une vidéo illustrant la situation, le thème, ou les propos décrits dans le texte. Pour consulter la vidéo, cliquez sur le **codes QR** ou flashez-le avec un smartphone.

¹Quick Response code

Résumé

L'activité de conduite automobile prend place dans un environnement dynamique en constante évolution. Le conducteur doit progresser sur la route au moyen de son véhicule, tout en interagissant adéquatement avec l'environnement et les autres usagers. Pour réaliser cette tâche, le conducteur doit percevoir son environnement, interpréter les événements pour se représenter correctement la situation de conduite, anticiper ces changements, et prendre des décisions afin d'engager des actions sur le véhicule lui permettant d'atteindre les buts qu'il se fixe à court et long terme. À cet égard, la complexité et la diversité des processus perceptifs, cognitifs et sensori-moteurs requis pour la conduite automobile font de cette activité un objet d'étude particulièrement riche pour les sciences de la cognition.

Pour étudier l'activité du conducteur automobile afin de la comprendre, l'expliquer et peut-être la prédire, les sciences cognitives se dirigent vers la modélisation de la cognition humaine. Cette démarche permet une représentation et une description plus ou moins fine du système cognitif du conducteur automobile. Cependant, un modèle de la cognition ne permet qu'une description théorique. Grâce à son implémentation informatique, il devient possible de simuler les théories utilisées et déployer numériquement celles mises en jeu dans la modélisation cognitive.

Ce travail de thèse s'articule autour de la modélisation cognitive du conducteur automobile, de son implémentation informatique sur une plateforme de développement virtuel et de sa simulation au sein de cette plateforme. Le modèle théorique que nous avons implémenté est **COSMODRIVE**, en développement au laboratoire du **LESCOT** à l'**IFSTTAR**, et la plateforme de développement accueillant le modèle est **SiVIC**, développée au **LIVIC**.

C'est dans ce contexte que nous nous sommes engagés dans le développement computationnel et informatique du modèle **COSMODRIVE**, afin de pouvoir simuler l'activité perceptive et cognitive du conducteur automobile. Pour cela, nous nous sommes limités à certains processus cognitifs primordiaux, comme les fonctions stratégiques (planification d'itinéraires et réalisation de plans stratégiques), ou les fonctions perceptives (exploration et intégration de l'information visuelle), les fonctions cognitives tactiques (construction de représentations mentales, intégration perceptivo-cognitive de l'information, structuration des connaissances de conduite, etc.), ou encore les fonctions d'exécution d'actions (régulation courte par zones enveloppes ou par points de poursuite).

Par l'implémentation informatique du modèle **COSMODRIVE** sur **SiVIC**, il devient possible « d'incarner numériquement » des théories cognitives et de les « opérationnaliser » pour formuler des hypothèses de recherche sous la forme de prédictions de performances que l'on pourra évaluer empiriquement auprès de conducteurs humains. Ces hypothèses formulées, nous avons conduit des expérimentations sur un simulateur de conduite que nous avons construit. Afin d'éprouver notre modèle théorique et informatique du conducteur automobile, nous avons comparé les performances des conducteurs humains avec les prédictions issues de la simulation. Les résultats obtenus ont permis de valider cette approche et de confirmer l'intérêt de la simulation cognitive pour appréhender les activités mentales du conducteur automobile.

Mots clés : Cognitique, Modélisation cognitive, Simulation cognitive, Modèle conducteur, Représentation mentale, Exploration perceptive, Intégration perceptive, Déploiement cognitif, Stratégie visuelle, Prise de décision, Conscience de la situation.

Abstract

Development of a car driver model : From the cognitive modeling to the digital simulation.

Driving activity takes place in a dynamic and constantly changing environment. The driver has to make his car evolving on the road while ensuring adequate interactions with its close environment and other road users. In order to perform this task, the driver has to perceive the environment he is evolving in, to interpret events in order to correctly understand the current driving situation, to be able to anticipate its evolution and take decisions regarding vehicle control in order to reach his short and long term goals safely. As a result, both complexity and variety of perceptual, cognitive and sensorimotor processes involved in the driving activity make it very rich context for cognitive sciences.

The modeling of human cognition, a specific method which belongs to cognitive sciences field, has been chosen to study driver's activity aiming at understanding, explaining or even predicting it. This approach allows a representation and a description of the driver's cognitive system with different levels of granularity. Thus, such a model offers only a theoretical description. When implemented on a computer, it opens the way to the simulation allowing the digital deployment of the theories involved in the cognitive model design.

This thesis is focused on cognitive modeling of car driver, its implementation and its simulation using a virtual platform. The theoretical model that we implemented is **COSMODRIVE**, developed at **IFSTTAR - LESCOT** laboratory and the implementation platform we used for this, named **SiVIC**, is developed at **IFSTTAR - LIVIC**.

This is the context where we started the computational development of the **COSMODRIVE** model in order to simulate the perceptual and cognitive activity of car driver. Indeed, we chose to limit our implementation to some crucial cognitive processes such as strategic functions (route planning and strategic plans execution), perceptual functions (exploration and integration of visual information), cognitive tactical functions (construction of mental representations, perceptual and cognitive integration of information, structuring of driving knowledge, etc.), or executive functions of actions (short control loop by "envelopes zones" or pursuit points).

Through computer simulation, we used the numerical model as an innovative tool for scientific investigation in the field of cognitive sciences: The numerical simulation of cognitive functions identified and modeled by **COSMODRIVE** allowed us to define experimental hypotheses which led us to conduct experiments in a driving simulator that we have built. To test the theoretical model and computer of the car driver, we compared the performance of human drivers on one hand and the predictions issued from the simulation on the other hand. It opens innovative opportunities for the development and the use of cognitive modeling and simulation of car driver.

Keywords : Cognitic, Cognitive modelling, Cognitive simulation, Driver model, Mental representation, Visual scanning, Perceptive integration, Cognitive deployment, Perceptive strategy, Decision making, Situation awareness.

Remerciements

Je tiens à remercier ici tous ceux sans qui ce travail n'aurait pas été possible, ceux qui m'ont encouragé et soutenu tant sur le plan professionnel que personnel.

En premier lieu, je tiens à remercier ceux qui ont rendu ce travail de thèse possible : Monsieur Bernard Claverie et Monsieur Thierry Bellet pour avoir accepté de diriger ma thèse, Monsieur Guy Boy et Monsieur Andry Rakotonirainy pour avoir été mes rapporteurs, Monsieur Dominique Gruyer, Monsieur Jean-Philippe Domenger, Monsieur Pascal Fouillat et Monsieur Patrick Millot pour l'évaluation de ce travail de trois ans.

L'encadrement, le contexte de recherche et les explications persévérantes et sans failles apportées par Thierry Bellet m'ont permis de mener ce travail dans des conditions optimales. C'est donc avec le plus grand respect que je le remercie tout particulièrement pour ces années de travail que j'ai eu l'honneur de partager avec lui. Je remercie aussi vivement Dominique Gruyer pour le co-encadrement de cette thèse et pour son soutien précieux dans nos développements du modèle sur la plateforme SiVIC.

Je tiens aussi à remercier le LESCOT pour m'avoir accueilli pendant cette thèse, me permettant de travailler dans un contexte professionnel solide. L'ensemble de mes collègues du LESCOT évoluent dans une ambiance chaleureuse et accueillante et ce laboratoire est ainsi un endroit qui favorise le travail de recherche.

Je tiens à remercier mes collègues proches, sans qui le travail n'aurait pas eu la même saveur : Jean-Christophe Paris, Daniel Ndiaye, Arnaud Bonnard, Fabien Moreau, Damien Sornette, etc. C'est grâce à vous que le café et les repas sont restés des moments d'échanges conviviaux et agréables. Mes remerciements vont aussi à Pierre Mayenobe, collègue et ami qui, par ses discussions explicatives et enflammées, m'a permis de saisir l'essence de certains concepts restés flous jusque-là.

Enfin, je tiens à remercier personnellement mon père, pour son aide précieuse, ma mère, pour ses admonestations m'ayant permis de conserver le droit chemin et Lucile, pour son soutien tout au long de ces années de travail.

A mon père.

Table des matières

Conseils aux lecteurs	iii
Résumé	v
Remerciements	vii
Introduction	1
1 Positionnement épistémologique de la thèse : l'activité de conduite, de son analyse à la modélisation du conducteur	9
1.1 Description générale de l'activité de conduite	9
1.2 Les spécificités de l'activité de conduite	12
1.3 L'activité mentale du conducteur humain	13
1.4 Problématique générale de la thèse : comment investiguer l'activité mentale du conducteur ?	14
1.4.1 La démarche « ascendante » : de l'observation de l'activité de conduite à la modélisation cognitive du conducteur	16
1.4.1.1 L'observation de l'activité de conduite	16
1.4.1.2 L'analyse de l'activité de conduite « située »	17
1.4.1.3 Les moyens d'accès indirects à l'activité mentale	18
1.4.2 La démarche « descendante » : de la modélisation cognitive du conducteur à la simulation numérique de la performance	22
1.4.2.1 Définition et caractéristiques d'un modèle scientifique	24
1.4.2.2 Finalité des modèles : décrire, comprendre, prédire	24
1.4.2.3 De la modélisation cognitive à la simulation numérique	25
1.5 Les enjeux scientifiques de la thèse : Modéliser et simuler le conducteur automobile	26
1.5.1 Décrire et expliquer l'activité du conducteur	27
1.5.2 Modéliser et simuler informatiquement les processus perceptifs et cognitifs	27
1.5.3 Prédire des comportements de conduite	28
2 La modélisation du conducteur automobile : état de l'art	31
2.1 Les modèles d'analyse de la tâche de conduite	31
2.2 Les modèles de régulation	32
2.3 Les modèles centrés sur le risque	33
2.4 Les modèles de simulation informatique du conducteur	36
2.4.1 Le modèle DRIVER (basé sur SOAR)	37
2.4.2 Le modèle IDM (basé sur ACT-R)	38
2.4.3 Le modèle de Liu (basé sur QN-MHP)	40
2.4.4 Apports et limites de ces modèles de simulation informatique du conducteur	41
2.5 Modélisation et simulation cognitive du conducteur : le modèle COSMODRIVE .	42
2.5.1 Architecture cognitive de COSMODRIVE	42
2.5.2 Régulation dynamique de la conduite	44

2.5.3	Description modulaire	45
2.5.3.1	Le module Stratégique	45
2.5.3.2	Le module Tactique	46
2.5.3.3	Le module de Perception	46
2.5.3.4	Les modules Opérationnel et Exécution	46
2.5.4	Modélisation des représentations mentales et des connaissances de conduite	47
2.5.4.1	Les représentations mentales : de la « conscience de la situation » à la prise de décision	47
2.5.4.2	Modélisation des connaissances sur l'environnement routier : les « schémas de conduite »	48
2.5.4.3	Modélisation des connaissances d'interaction : les « zones enve- loppées »	50
2.6	Bilan synthétique et objectifs de la thèse	51
2.6.1	Conception et développement de fonctions cognitives stratégiques	52
2.6.2	Conception et développement de fonctions cognitives tactiques	52
2.6.3	Conception et développement de fonctions perceptives	52
2.6.4	Conception et développement de fonctions d'exécution de l'action	53

3 Développement du modèle du conducteur : des théories cognitives à la modélisation computationnelle **55**

3.1	Les fonctions cognitives stratégiques	55
3.1.1	Les principales fonctions stratégiques chez le conducteur humain	56
3.1.2	Modélisation cognitive et computationnelle des fonctions stratégiques . . .	56
3.1.2.1	Le processus de planification d'itinéraires	57
3.1.2.2	Le processus de réalisation d'un plan stratégique	58
3.1.3	Spécifications cognitive du module stratégique	59
3.2	Les fonctions cognitives tactiques	59
3.2.1	Les représentations mentales tactiques	59
3.2.1.1	Des représentations visuo-spatiales	60
3.2.1.2	Des représentations « pour l'action »	60
3.2.2	Modélisation du processus de construction des représentations tactiques .	61
3.2.3	Modélisation du processus d'anticipation	63
3.2.4	Le processus de prise de décision	64
3.2.5	Spécifications cognitives du module tactique	66
3.3	Les fonctions perceptives	67
3.3.1	Première approche de la perception	68
3.3.2	Les théories de la perception : de la cognition à la biologie de l'œil humain	69
3.3.2.1	La « dualité » de la perception humaine	69
3.3.2.2	Pour un « Cycle Perceptif »	70
3.3.2.3	Les champs visuels	72
3.3.2.4	L'œil biologique	73
3.3.3	Modélisation computationnelle de la perception du conducteur	76
3.3.3.1	La perception de l'environnement	76
3.3.3.2	L'exploration perceptive de l'environnement routier	77
3.3.3.3	L'intégration cognitive de l'information	78

3.3.3.4	L'élaboration de la représentation perceptive	79
3.3.4	Spécifications du module de perception	80
3.3.4.1	Spécifications fonctionnelles des processus et de l'architecture du module	81
3.3.4.2	Modélisation du récepteur sensoriel : « l'œil virtuel »	82
3.3.4.3	Modélisation des champs visuels	82
3.3.4.4	Modélisation de la fovéa	83
3.4	Fonctions d'exécution d'actions	83
3.4.1	Modélisation du contrôle latéral et longitudinal	83
3.4.2	Modélisation du processus de gestion des interactions	84
3.4.3	Spécifications cognitives du module d'exécution d'actions	85
4	Implémentation du modèle COSMODRIVE sur la plateforme de simulation virtuelle SiVIC	89
4.1	Outils de développement	89
4.1.1	Description et spécificité de la plateforme SiVIC	89
4.1.2	Environnements de développement	91
4.1.3	Création de protocoles de communication	93
4.2	Implémentation du module stratégique	95
4.2.1	Planification d'itinéraires et déroulement de plan stratégique	95
4.2.2	Réalisation d'un plan stratégique	97
4.3	Implémentation du module tactique	97
4.3.1	Génération des représentations mentales tactiques : Instanciation de schémas de conduite	98
4.3.1.1	Formalisme pour l'implémentation des schémas de conduite : la théorie des graphes	98
4.3.1.2	Processus d'appariement des schémas de conduite	102
4.3.2	Implémentation effective des schémas de conduite et simulation des représentations mentales	107
4.3.3	Prise de décision et anticipation	108
4.4	Implémentation du module de perception	108
4.4.1	Description de l'architecture fonctionnelle du module	109
4.4.2	Fonctionnement algorithmique du module	110
4.4.3	Implémentation du processus d'exploration cognitivo-perceptive	112
4.4.3.1	Les requêtes perceptives descendantes	112
4.4.3.2	La génération du cycle d'exploration cognitivo-perceptive	114
4.4.4	Implémentation du processus d'intégration perceptivo-cognitive	115
4.4.4.1	Définition de la saillance	115
4.4.4.2	Simulation de la saillance visuelle	116
4.4.5	Implémentation d'un « œil virtuel »	119
4.4.5.1	Création de l'œil virtuel au moyen de caméras SiVIC	120
4.4.5.2	Simulation des champs visuels	121
4.4.5.3	Simulation de la fovéa	122
4.5	Implémentation du module d'exécution d'actions	125
4.5.1	Contrôle longitudinal du véhicule	125

4.5.2	Contrôle latéral du véhicule	125
4.5.3	Implémentation des zones enveloppes	126
4.6	Démonstrations : visualisation de résultats obtenus par la simulation numérique	127
4.6.1	Simulation des conflits de zones enveloppes et du déploiement cognitif pour la prise de décision	128
4.6.2	Simulation des représentations mentales et des effets de la distraction visuelle	131
4.6.3	Simulation du cycle d'exploration et d'intégration de l'information et visualisation des stratégies visuelles	134
4.7	Bilan : choix et contraintes d'implémentation	137
4.7.1	Les limites du temps de calcul	137
4.7.2	Les spécificités logicielles	138
4.7.3	La multiplication des machines	139
4.7.4	Les changements de versions	140
5	Utilisation de la simulation numérique comme méthode d'investigation scientifique de la cognition	143
5.1	Conception et développement d'un simulateur de conduite	144
5.1.1	Création du simulateur SiVIC	144
5.1.2	Modifications du logiciel	146
5.1.3	Collecte et stockage des données sur le simulateur SiVIC	147
5.1.3.1	Type de données brutes	148
5.1.3.2	Travail sur les données	149
5.2	Expérimentation 1 : Analyse de stratégies visuelles pour l'exploration perceptive	150
5.2.1	Enjeux et objectifs	150
5.2.2	Protocole expérimental	151
5.2.3	Population	152
5.2.4	Hypothèses et résultats attendus	153
5.2.5	Présentation des résultats	154
5.2.6	Discussion	158
5.3	Expérimentation 2 : Intégration cognitive et effets de la distraction visuelle	159
5.3.1	Enjeux et objectifs	159
5.3.2	Protocole expérimental	160
5.3.3	Population	162
5.3.4	Hypothèses et résultats attendus	162
5.3.5	Présentation des résultats	163
5.3.6	Discussion et modélisation des effets de la distraction visuelle sur la représentation mentale	164
5.4	Expérimentation 3 : Simulation numérique du processus de prise de décision	170
5.4.1	Enjeux et objectifs	170
5.4.2	Protocole expérimental	171
5.4.3	Population	174
5.4.4	Elaboration des hypothèses	174
5.4.5	Présentation des résultats	179
5.4.6	Discussion	186

Conclusion	189
Liste des figures	197
Liste des codes QR	199
Liste des tableaux	201
Bibliographie	213
Publications	215
Glossaire	219
Acronymes	221
Annexes	225
.1 Véhicule instrumenté MARGO	225
.2 Simulateur de conduite du LEPSIS	226
.3 BIND	227
.4 ACT-R	228
.5 Inter-connexion des représentations visuo-spatiales dans SiVIC	230
.5.1 L'intégration de l'information	231
.5.2 L'existence de l'information et son utilisation	233

Introduction

Le contexte de la recherche

La conduite automobile est une activité pratiquée par près de quarante millions de Français¹, avec neuf cent mille nouveaux utilisateurs de véhicules légers en 2009². Cette activité quotidienne pour bon nombre de personnes est d'une apparente simplicité, mais la complexité des mécanismes perceptifs et cognitifs mis en jeu en fait une tâche complexe et dangereuse.

Depuis plusieurs années, les gouvernements font de la sécurité routière une des priorités d'Etat et les recherches mises en œuvre pour étudier la conduite automobile touchent différents domaines, qu'il s'agisse de l'activité des conducteurs eux-mêmes ou de celle des autres usagers de la route avec lesquels ils interagissent, du véhicule qu'ils conduisent et des équipements embarqués dont ils sont dotés, ou bien encore de l'infrastructure routière sur laquelle ils se déplacent. En effet, comprendre la conduite automobile et améliorer la sécurité routière nécessite généralement d'adopter une approche systémique « Homme-Véhicule-Infrastructure ». Telles sont les grandes orientations scientifiques de l'IFSTTAR³, Institut de recherche qui conduit des travaux dans les domaines des transports, des infrastructures, des risques naturels et de la ville⁴.

Cette thèse porte pour sa part sur la modélisation et la simulation cognitive du conducteur automobile. Elle s'inscrit clairement dans le cadre des travaux du LESCOT⁵, dont la thématique de recherche centrale est *l'Homme en situation de déplacement*. Mais cette thèse vise également à concevoir et développer un modèle de simulation numérique d'un conducteur humain immergé dans un environnement de conduite dynamique. A ce titre, elle s'inscrit aussi dans la continuité des travaux d'un autre laboratoire, le LIVIC⁶, spécialisé dans la modélisation et la simulation virtuelle du système routier. Enfin, au regard de ses objectifs de simulation informatique de la cognition humaine, elle s'inscrit aussi pleinement dans le cadre des recherches en « Cognitique »⁷ conduites à l'ENSC⁸/IMS⁹ de l'Institut Polytechnique de Bordeaux.

Les travaux de ces trois laboratoires ont constitué de ce fait un support essentiel pour l'atteinte des objectifs de cette thèse, consacrée au développement d'un modèle de simulation cognitive du conducteur automobile sur une plateforme de simulation informatique. C'est aussi sous ce triple encadrement que cette recherche de thèse a été réalisée, ce qui nous a permis de bénéficier du soutien de ces trois équipes de recherche.

¹<http://permisdeconduire.gouv.fr/>

²<http://www.securite-routiere.gouv.fr>

³Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Amenagement et des Reseaux

⁴<http://www.ifsttar.fr/>

⁵Laboratoire Ergonomie et Sciences COgnitives pour les Transports

⁶Laboratoire sur les Interactions Vehicules-Infrastructure-Conducteurs

⁷Comme le rappelle [Claverie, 2005] p. 11, le mot cognitique a été originellement défini par Jean-Michel Truong en 1983 comme « une discipline scientifique et pratique technique, branche de l'informatique, qui a pour objet l'acquisition et la représentation formelle des connaissances et des modes de raisonnement, en vue de leur simulation à l'aide d'ordinateurs »

⁸Ecole Nationale Supérieure de Cognitique

⁹laboratoire de l'Integration du Matériau au Systeme

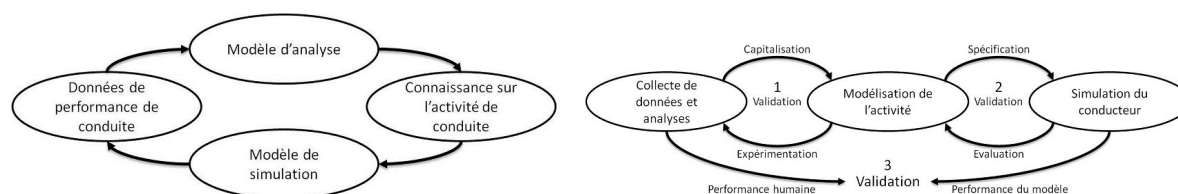
Les objectifs de la thèse

Dans ce contexte institutionnel et scientifique général, cette thèse poursuit plus spécifiquement des objectifs de modélisation et de simulation numérique de la cognition humaine. A cet égard, la complexité et la diversité des processus perceptifs, cognitifs et sensori-moteurs requis pour la conduite d'un véhicule font de cette activité un objet d'étude particulièrement riche pour les sciences de la cognition.

Sans avoir l'ambition de proposer ici un modèle complet et exhaustif du conducteur humain, notre objectif sera cependant d'appréhender ce dernier dans le cadre de ses interactions avec un véhicule et un environnement routier, afin de permettre une investigation de la cognition « *en situation dynamique* » [Hoc and Amalberti, 1994]

Par ailleurs, il s'agira aussi d'appréhender cette activité dans sa complexité naturelle. En effet, même si les expérimentations que nous avons nous-mêmes réalisées dans le cadre de cette thèse ont été conduites sur simulateur, nos travaux s'inscrivent néanmoins dans le cadre d'un programme de recherche à plus long terme du LESCOT, le projet COSMODRIVE¹⁰. Ce programme a déjà fait l'objet de plusieurs thèses en psychologie cognitive ou en informatique et s'appuie sur un corpus de données expérimentales provenant de multiples sources : observations de la conduite naturelle sur route ouverte, à bord de véhicules instrumentés, expérimentation sur pistes d'essai ou sur simulateurs de conduite, enquêtes auprès des conducteurs, etc.

Ce programme de recherche consacré à la modélisation cognitive, initié en 1996 au LESCOT, vise à étudier les activités mentales soutenant l'activité de conduite et à capitaliser les connaissances expérimentales acquises, à travers le développement itératif de modèles du conducteur, en allant de l'analyse des comportements observés jusqu'à la simulation informatique de la cognition du conducteur, et permettre in fine de générer ces mêmes comportements de conduite.



(a) Approche itérative pour développer un modèle cognitif (b) Boucle de validation pour la modélisation cognitive

FIGURE 1 – Méthodes de modélisation cognitive et de validation de modèles, de [Mathern et al., 2010]

Les figures 1(a) et 1(b) présentent de façon synthétique ce cycle de développement itératif de modèles du conducteur dans le cadre du projet COSMODRIVE, alternant des observations de terrain et des phases d'analyse de l'activité et de modélisation cognitive. A un premier niveau, cette démarche repose sur la collecte de données expérimentales auprès de sujets humains volontaires, en environnements naturels (sur route ouverte) ou contrôlés (sur simulateurs, sur pistes, ou en laboratoire). Ces données alimentent ensuite une démarche de modélisation de l'activité qui constitue alors une capitalisation des connaissances empiriques, modélisation qui est susceptible en retour d'orienter la collecte de nouvelles données expérimentales, notamment à des fins de validation des modèles d'activité développés.

¹⁰Cognitive Simulation Model of the DRIVER

Toutefois, modéliser l'activité humaine est une chose, développer des modèles de simulation capable de produire cette activité en est une autre. Sur la base des travaux de modélisation de l'activité de conducteurs humains, les objectifs du **LESCOT** sont aussi de concevoir et de développer un modèle de simulation numérique capable de générer par lui-même des performances de conduite, à l'image de ce que font ces conducteurs.

Avec un tel modèle, il deviendrait alors possible de procéder à des comparaisons entre les performances du modèle, obtenues par simulation, et les performances de conducteurs réels, observées dans des situations de conduite équivalentes. A terme, l'objectif est de recourir à cette démarche comparative pour, d'un côté, tester les limites de validité du modèle développé, et d'un autre côté, utiliser la simulation informatique - en tant « qu'incarnation numérique de théories cognitives » - comme une méthode d'investigation scientifique et de validation de ces théories de la cognition. Dans ce contexte, la programmation informatique vise en effet à concevoir « un support artificiel permettant la mise en œuvre de comportements ou de performances similaires à ceux d'êtres vivants » formant ainsi « des pistes exploratoires ou interprétatives de l'organisation de la cognition naturelle » [Claverie, 2005] p.15.

C'est précisément dans cette perspective d'utilisation de la simulation comme moyen d'investigation et d'évaluation de théories cognitives « incarnées numériquement dans un modèle de conducteur » que s'inscrit notre travail de thèse. Cette démarche scientifique semble particulièrement pertinente et utile dans le cadre des sciences de la cognition. En effet, l'activité mentale du conducteur n'étant pas directement observable, le chercheur en sciences cognitives se doit de procéder le plus souvent par inférence, en s'appuyant sur des théories cognitives plus ou moins bien étayées lui permettant de comprendre et d'interpréter les faits observés, puis d'expliquer l'activité humaine.

La méthode utilisée pour éprouver la validité de théories scientifiques en sciences de la cognition repose le plus souvent sur l'approche expérimentale définie par Claude Bernard. Il s'agit, à partir d'une théorie postulée, de formuler une hypothèse précise sur une performance humaine qui devrait se produire (si cette théorie est exacte) dans le cadre d'un protocole expérimental particulier, spécifiquement conçu pour l'investigation de cette hypothèse. En fonction du résultat obtenu, l'hypothèse sera soit validée (les performances humaines collectées étant conformes à la prédiction initiale formulée à travers l'hypothèse), soit invalidée (les performances observées étant contradictoires avec l'hypothèse de départ), cela pourra alors conduire à remettre en cause partiellement ou totalement la théorie originellement utilisée pour formuler cette hypothèse.

A côté de cette démarche expérimentale, classiquement utilisée en sciences de la cognition comme en sciences de la vie, de la nature ou de la société, les sciences cognitives aspirent également à recourir - à l'image de ce qui peut se faire en sciences physiques, par exemple - à d'autres méthodes d'investigation fondées sur la simulation numérique. Dans ce contexte particulier, le développement d'un modèle de simulation numérique de la cognition sera considéré comme un moyen d'investigation scientifique à part entière, aux côtés d'autres méthodologies de recherche.

D'un point de vue épistémologique, cette démarche nécessite de développer un modèle de simulation capable « d'incarner numériquement » une ou plusieurs théories cognitives particulières, puis à comparer le produit de simulations numériques générées automatiquement par ce modèle avec des comportements humains reposant, a priori, sur les mêmes processus cognitifs que ceux utilisés par le modèle de simulation. Si une telle équivalence est effectivement constatée (c'est-à-dire que le modèle de simulation cognitive prédit bien un comportement ou une perfor-

mance humaine), cela contribuera alors à valider le modèle cognitif tout autant que la théorie sur laquelle il s'appuie. A l'inverse, en cas de résultats contradictoires, cela pourra conduire à remettre en cause, soit le modèle (comme traduction incorrecte de la théorie cognitive), soit la théorie elle-même (dans la mesure où l'on considérerait que le modèle en est une traduction exacte et complète).

C'est précisément dans cette démarche d'investigation scientifique fondée sur la simulation numérique de la cognition que se situe notre travail de thèse. Grâce au modèle informatique du conducteur automobile que nous chercherons à développer, nous espérons pouvoir être en mesure de générer des comportements observables, comme autant de résultats produits par une activité mentale non observable (bien que simulée numériquement par le modèle lui-même), et ceci dans l'objectif de prédire et d'expliquer des comportements humains susceptibles d'être eux-mêmes observés dans des situations de conduite équivalentes. Toute notre démarche de thèse s'inscrit dans cette logique.

Pour mener à bien un tel dessein, il sera tout d'abord nécessaire de concevoir et de développer un modèle de simulation numérique du conducteur. Pour ce faire, nous partirons de travaux antérieurs réalisés au [LESCOT](#) dans le cadre du projet [COSMODRIVE](#) en matière de modélisation cognitive du conducteur. Il s'agira de les faire évoluer progressivement (via des étapes de modélisations computationnelles puis d'implémentations informatiques) dans le sens d'un modèle de simulation numérique des activités perceptives et cognitives de l'humain, capable de générer des comportements observables que nous pourrons comparer ensuite à des performances humaines. Pour atteindre ces objectifs de simulation informatique, nous nous appuierons aussi sur des travaux antérieurs réalisés au [LIVIC](#) consacrés au développement de la plateforme de simulation numérique SiVIC¹¹, au sein de laquelle sera développé puis implanté notre modèle de simulation cognitive du conducteur.

A l'issue de ce travail, nous disposerons alors d'une « incarnation numérique » du modèle [COSMODRIVE](#) (et des théories cognitives sur lesquelles s'appuie ce modèle). L'enjeu sera alors de procéder à la collecte de données expérimentales auprès de conducteurs humains afin de comparer des performances humaines avec des prédictions issues de la simulation numérique. Le résultat de cette démarche comparative nous permettra alors, soit de remettre en cause ce modèle, soit de le spécifier plus précisément (en apportant des données permettant sa calibration, par exemple), soit de valider les fonctions cognitives qui auront été simulées numériquement durant cette thèse (ainsi que les travaux théoriques antérieurs du projet [COSMODRIVE](#) sur lesquels s'appuiera notre propre modèle de simulation).

Organisation du mémoire

Au regard de ces objectifs généraux, ce mémoire va s'articuler en trois grandes parties. La première partie (chapitre 1 et 2) porte sur le positionnement épistémologique de la thèse, l'état de l'art, et la définition des objectifs scientifiques que nous viserons spécifiquement dans le cadre de cette recherche. La seconde partie (chapitres 3 et 4) présentera le travail de modélisation cognitive, computationnelle et informatique que nous avons réalisé durant cette thèse afin de développer un modèle de simulation numérique du conducteur automobile. Enfin, la troisième

¹¹Simulateur Vehicule-Infrastructure-Capteur

partie (chapitre 5 et Conclusion) visera à évaluer ce modèle et à explorer l'intérêt de la simulation numérique pour l'investigation de la cognition du conducteur automobile.

D'une façon plus détaillée, ce mémoire se compose de six chapitres :

Le chapitre 1 nous permettra d'engager notre réflexion sur l'analyse et la modélisation de la cognition humaine, en se situant d'emblée dans le cadre de l'activité de conduite automobile. Après avoir rappelé certaines caractéristiques générales de cette activité complexe, nous présenterons synthétiquement les activités mentales du conducteur, puis nous nous interrogerons sur les moyens d'accéder aux processus cognitifs à l'origine des comportements observables. Cela nous permettra alors de nous interroger sur la démarche méthodologique et sur les enjeux épistémologiques de la thèse en matière de modélisation et de simulation de la cognition du conducteur.

Le chapitre 2 nous permettra de poursuivre notre réflexion sur la modélisation du conducteur, en proposant un état de l'art synthétique des différents types de modèles du conducteur disponibles dans la littérature, avant de nous focaliser plus spécifiquement sur la description du modèle **COSMODRIVE** qui constituera l'un des points d'ancrage majeurs de notre démarche de modélisation. Ce chapitre s'achèvera par une réflexion synthétique sur les objectifs et les moyens nécessaires pour nous permettre de développer un tel modèle de simulation cognitive du conducteur à des fins de simulation numérique de la cognition humaine et des comportements de conduite.

Le chapitre 3 nous permettra d'entrer de plain-pied dans notre démarche de conception et de développement d'un modèle de simulation cognitive du conducteur automobile inspiré de **COSMODRIVE**, en se basant à la fois sur des descriptions cognitives et computationnelles de la cognition du conducteur. Nous y décrirons les différentes fonctions cognitives mises en jeu pendant l'activité de conduite, en commençant par les fonctions cognitives stratégiques puis les tactiques. Ensuite, nous décrirons les fonctions perceptives pour finir par les fonctions d'exécution d'actions. A l'issue de chacune de ces sections, nous définirons des « spécifications cognitives » qui orienteront directement le développement de notre modèle de simulation du conducteur.

Le chapitre 4 sera centré sur les développements informatiques réalisés durant cette thèse. Il traitera de la simulation numérique de la cognition humaine, via l'implémentation effective de notre modèle cognitif sur la plateforme de simulation numérique **SiVIC**. Nous y présenterons tout d'abord l'environnement de simulation **SiVIC** que nous avons utilisé dans le cadre de cette thèse afin de pouvoir implanter **COSMODRIVE** et faire dynamiquement interagir ce modèle avec un environnement routier virtuel. Nous décrirons ensuite finement les différents modules de **COSMODRIVE** sur lesquels nous avons travaillé durant cette thèse (module stratégique, module tactique, module de perception et module d'exécution d'actions), puis nous présenterons enfin quelques exemples de simulations permettant de visualiser les résultats obtenus à l'issue de ces développements informatiques en matière de simulation du conducteur automobile.

Le chapitre 5 nous permettra d'explorer la démarche d'utilisation de la simulation numérique à des fins d'investigation scientifique de la cognition humaine telle que nous l'avons précédemment décrite. Il s'agira d'y présenter trois exemples d'expérimentations réalisées sur simulateur de conduite auprès de conducteurs humains volontaires, en se basant sur des hypothèses de recherche générées par l'entremise de la simulation numérique. Le produit de la simulation sera posé comme des prédictions de performances humaines que nous chercherons précisément à vérifier, soit à des fins de validation de notre modèle de simulation cognitive, soit à des fins

de calibration du modèle développé durant la thèse et/ou de spécification de développements à réaliser ultérieurement.

La conclusion générale, nous permettra enfin de dresser le bilan des principales avancées théoriques, méthodologiques et techniques apportées par notre travail de thèse en Cognitique, d'en souligner certaines limites, puis de discuter d'une façon plus générale de l'apport de la modélisation et de la simulation numérique pour l'analyse de la cognition humaine en général, et de l'activité mentale du conducteur automobile, en particulier.

Positionnement épistémologique de la thèse : l'activité de conduite, de son analyse à la modélisation du conducteur

Ce premier chapitre porte sur les enjeux épistémologiques de la thèse, à savoir la modélisation de l'activité de conduite et la simulation numérique de la cognition humaine à des fins d'investigation scientifique de l'activité mentale du conducteur automobile. Après avoir rappelé certaines caractéristiques essentielles de la conduite automobile, nous traiterons de l'activité mentale du conducteur et de son rôle dans la genèse des comportements de conduite. Cela nous conduira à deux questions. Tout d'abord l'analyse et la modélisation de cette composante « cachée » de l'activité de conduite au regard de nos objectifs de modélisation cognitive du conducteur, puis l'utilisation de la simulation numérique comme méthode et outil d'analyse de la cognition en situation de conduite automobile.

1.1 Description générale de l'activité de conduite

Selon [Neboit, 1980] : « *Conduire un véhicule, c'est effectuer un déplacement dans un environnement en perpétuelle évolution. Ce déplacement est orienté vers un but (e.g. rallier un lieu particulier), il est soumis à différentes règles explicites ou implicites, et il s'effectue au moyen d'un outil particulier : le véhicule.* ». Cette citation, usitée pour décrire l'activité de conduite automobile, met en avant plusieurs points importants inhérents à la conduite automobile.

Tout d'abord, « *effectuer un déplacement* », c'est joindre un point A à un point B, selon un trajet particulier et au moyen d'un véhicule. Cela sous-entend tout d'abord de piloter ce véhicule, activité fortement sensori-motrice qui demande le contrôle de la trajectoire et de la vitesse de déplacement en fonction des exigences externes (comme la limitation de vitesse en vigueur) et personnelles (niveau de risque ou de prise de risque accepté, par exemple). « *Dans un environnement en perpétuelle évolution* » insiste sur le fait que cette activité se déroule dans un système complexe et dynamique. La complexité du système routier provient de ses multiples facteurs de diversité : infrastructures (autoroute, carrefour à feux, route péri-urbaine, etc.), trafic (dense, ralentissement, rapide, etc.), véhicules (taille, capacités dynamiques, visibilité), météorologie (lumière, brouillard, pluie, etc.), conducteurs (âgés, novices, familiers du lieu, etc.). Le conducteur est donc contraint de prendre en compte cette complexité et de s'adapter en permanence aux modifications de son environnement.

De plus, la complexité d'une situation provient souvent de ce caractère dynamique [Woods, 1988], car les problèmes susceptibles d'apparaître sont fréquemment la conséquence d'événements multiples plus ou moins corrélés pouvant se produire à des moments indéterminés, le tout sous une forte contrainte temporelle [Malaterre, 1988] faisant encore accroître la pression sur le conducteur.

Cette dynamique et cette pression temporelle constante font de la conduite automobile une tâche particulièrement exigeante au cours de laquelle le conducteur humain, aux commandes de son véhicule, se devra de prendre les bonnes décisions, au bon moment.

Toutefois, la complexité de cette activité est aussi grandement dépendante du contexte. Ainsi, la conduite dans un environnement routier presque désert (comme la conduite sur une autoroute peu fréquentée) ne demande que le contrôle de son véhicule et peu d'anticipation et/ou de prise de décision. En revanche, la traversée d'un croisement à feux dans une zone urbaine en période de pointe fait appel à des fonctions cognitives de plus haut niveau et plus sollicitantes en termes de ressources cognitives. La conduite est ainsi une succession plus ou moins rapide de sous-tâches à dominante sensori-motrice ou à dominante cognitive ([Saad et al., 1992]), bien que les deux coexistent en permanence : le conducteur doit systématiquement prélever de l'information dans l'environnement, comprendre et anticiper des événements, prendre des décisions, et engager des actions pour contrôler adéquatement la dynamique de son véhicule. Selon le niveau d'expérience du conducteur, cette activité sera relativement automatisée (contrôle de la vitesse ou du positionnement du véhicule sur la voie), ou nécessitera des ressources attentionnelles (compréhension d'une situation complexe et prise de décision, par exemple).

L'aspect dynamique de l'activité de conduite automobile engendre aussi, pour le conducteur, une nécessité de flexibilité afin de s'adapter aux événements. Cela implique une révision de l'évaluation de la situation et une adaptation des plans mis en place en amont. Par ailleurs, le conducteur ne peut pas considérer à chaque instant l'intégralité des informations présentes dans l'environnement. Il lui est nécessaire de sélectionner et d'interpréter ces informations. Cette prise d'information ne peut pas s'effectuer au hasard. Elle doit être efficace pour permettre au conducteur d'agir vite et de manière adaptée aux conditions de conduite [Bellet, 1998]. Il s'agit donc, pour lui, d'identifier les sources principales d'informations et d'organiser leur prélèvement dans l'espace et dans le temps d'une façon synchronisée avec l'activité de pilotage du véhicule. Ces stratégies d'exploration perceptive de l'environnement routier pourront reposer sur des schémas de balayages visuels partagés par la plupart des conducteurs, mais elles sont parfois très variables d'un conducteur à l'autre, notamment en fonction de l'expérience de conduite [Neboit, 1980]. Ces schémas d'exploration perceptive proviennent en effet des connaissances du conducteur qui lui permettent de comprendre une situation et d'engager un diagnostic¹. Ainsi, comme le rappelle [Van-Elslande, 1992] « *l'interaction du conducteur avec la dynamique temporelle des situations a notamment pour conséquence le caractère déterminant de l'utilisation des connaissances disponibles pour lui permettre d'interpréter les informations perçues et d'anticiper les informations à venir, afin de contrôler efficacement le scénario dans lequel il est engagé.* »

L'acquisition d'informations dans l'environnement est par conséquent un aspect crucial de l'activité de conduite. Elle permet la constante adaptation du conducteur aux événements. Toutefois, comme nous l'avons déjà souligné, il est impossible pour un conducteur humain d'intégrer toute l'information visuelle disponible dans une scène routière. Ainsi, le conducteur sélectionne ses informations. Son expertise lui permet d'orienter cette sélection (en termes de pertinence pour la tâche, de mode de consultation ou de traitement des caractéristiques), dans son environnement selon deux processus d'acquisition [Bellet, 1998] :

- Une intégration « dirigée par les données » (processus bottom-up) : l'information n'est pas

¹ [Hoc and Amalberti, 1994]

1.1. Description générale de l'activité de conduite

recherchée délibérément, mais elle est suffisamment prégnante dans l'environnement pour attirer l'attention du conducteur.

- Une intégration « dirigée par les connaissances » (processus top-down) : l'information fait l'objet d'une recherche active de la part du conducteur, et cette recherche est fonction de ses connaissances et d'hypothèses préalables sur la situation de conduite.

Notons aussi qu'une conduite ne reposant que sur un processus d'intégration dirigé par les données serait peu efficace et probablement dangereuse [Shinoda et al., 2001]. Pour bien conduire, il est nécessaire d'activer ses connaissances pour repérer certains éléments significatifs dans la scène routière, comme les panneaux ou le marquage au sol, par exemple.

Au-delà de la perception sensorielle, le traitement de l'information résulte d'un cheminement complexe reposant sur une chaîne de processus perceptivo-cognitifs, transformant progressivement l'information [Wickens and Hollands, 2000] et permettant sa prise en compte dans les raisonnements de plus haut niveau. Le modèle général des activités perceptivo-cognitives du conducteur de [Neboit, 1980] permet de décrire synthétiquement ces différentes étapes de la boucle de traitement de l'information. Il y distingue en particulier quatre étapes principales ([Neboit, 1978], Figure 2) :

- *L'exploration perceptive est l'ensemble des procédures utilisées par le conducteur pour recueillir les indices nécessaires à l'exécution de la tâche de conduite.*
- *L'identification consiste à reconnaître un indice, le rapporter à une classe d'événements.*
- *La prévision consiste à anticiper des événements futurs et des actions potentielles à partir d'indices perçus, en utilisant des règles de transformation.*
- *La décision prend en compte la plupart des sous-processus ci-dessus. C'est l'ensemble des processus de sélection, elle intervient dans la génération du comportement produit, mais ne fait aucunement partie de l'action en elle-même.*

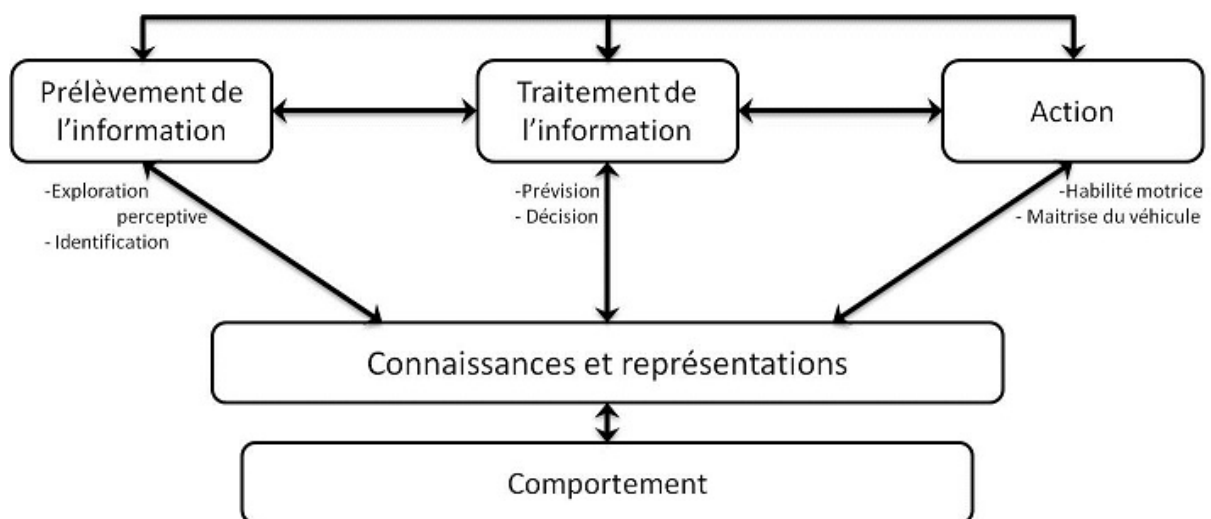


FIGURE 2 – Activités cognitives mises en jeu dans la conduite ([Neboit, 1978])

Neboit insiste également sur le lien entre connaissances, représentations et comportement. Le conducteur doit se construire une représentation mentale simplifiée, mais efficace de la situation, lui permettant non seulement d'appréhender la situation courante, mais aussi d'anticiper son évolution dans le temps [Bellet, 1998]. Cette représentation ne sera qu'une vision parcellaire du réel, ne comportant que les informations pertinentes pour le conducteur, en fonction des objectifs qu'il poursuit à cet instant. C'est grâce à cette représentation fonctionnelle et lacunaire de la situation de conduite, rappelant le concept d'image opérative d'Ochanine [Ochanine, 1977], que des décisions efficaces pourront être prises malgré la complexité des situations et la forte pression temporelle à laquelle est soumis le conducteur.

1.2 Les spécificités de l'activité de conduite

En première analyse, la conduite vise à contrôler un processus dynamique dans un environnement en perpétuelle évolution. D'autres activités humaines ont également cette caractéristique, mais l'une des spécificités de la conduite est de s'inscrire en permanence dans de multiples fenêtres temporelles, chacune se rapportant à un niveau particulier de l'activité. Ainsi, par exemple, la réalisation du trajet dans son ensemble peut nécessiter plusieurs heures de conduite, mais une sortie de l'autoroute se fera sur quelques minutes, le passage d'un carrefour urbain en une dizaine de secondes, l'évitement d'un piéton sur quelques secondes, et les actions de contrôle et de régulation du véhicule sur la chaussée sur quelques centaines de millisecondes.

La gestion en parallèle de ces différents niveaux d'activité, tout en restant toujours soumis à une pression temporelle de l'ordre de la seconde, rend cette activité particulièrement exigeante sur le plan perceptif, cognitif et moteur. Cela fait même de la conduite automobile l'une des activités de pilotage de véhicule les plus difficiles à réaliser. Par comparaison, la conduite de trains ou le pilotage d'avions ou de navires, par exemple, s'inscrivent dans des échéances temporelles généralement plus longues et peuvent souvent bénéficier de l'aide d'opérateurs externes (comme le contrôleur aérien ou le régulateur de trafic), ou d'une assistance en provenance d'automates embarqués.

Malgré cette difficulté, la conduite automobile est néanmoins accessible à la quasi-totalité de la population, après quelques heures de formation (vingt au minimum) et la réussite de l'examen du Code de la route. L'apprentissage et la pratique de la conduite se font donc principalement seul, contrairement à la plupart des activités de contrôle de processus. Ce processus d'apprentissage relevant de l'expérience individuelle peut engendrer des connaissances différentes selon les conducteurs, parfois erronées, ou susceptibles d'entraîner de mauvaises pratiques, voire d'entrer en conflit avec les pratiques d'autres conducteurs.

Enfin, la conduite automobile se fait en interaction constante avec d'autres usagers de la route aux comportements et aux caractéristiques très hétérogènes (autres conducteurs, mais aussi piétons, cyclistes, motocyclistes, chauffeurs de poids lourds ou de bus, etc.), nécessitant non seulement de percevoir l'infrastructure routière, mais aussi de détecter, de comprendre et d'anticiper le comportement d'autrui. Le conducteur doit ainsi être conscient de la présence d'autres usagers, mais aussi de leurs intentions potentielles et de leurs comportements possibles. Cette dimension peut apporter des difficultés supplémentaires, car le fait d'être à l'intérieur d'un véhicule peut parfois altérer la perception, ou rendre la communication inter-usagers très difficile.

Les informations comportementales qui pourraient permettre de comprendre les intentions d'autrui et d'anticiper son comportement ne sont pas toujours accessibles au conducteur, et différents usagers en interaction à un moment donné peuvent ne pas partager la même représentation de la situation [Munduteguy and Darses, 2007].

La forte composante dynamique de l'activité de conduite automobile, sa dimension d'interaction sociale, les risques qu'elle peut présenter et la singularité de chaque situation rencontrée rendent cette tâche très exigeante, monopolisant fortement les ressources perceptives, cognitives et motrices du conducteur. L'activité mentale du conducteur est particulièrement complexe, et son analyse comme sa modélisation constituent des objectifs scientifiques importants en matière de sécurité routière.

1.3 L'activité mentale du conducteur humain

Comme nous venons de le voir, la conduite automobile est composée d'activités perceptives et cognitives plus ou moins automatisées, permettant la gestion de situations dynamiques. Le conducteur doit donc constamment prendre en compte les éléments de l'environnement qui évoluent [Woods, 1988] avec ou sans action de sa part. Il doit aussi prendre des décisions en fonction de la compréhension qu'il a de la situation [Hoc and Amalberti, 1994] et des buts qu'il poursuit à plus ou moins long terme.

En référence à l'usage que fait [Richard, 1990] de ce concept, nous parlerons ici « d'Activité Mentale » pour désigner d'une façon générique toute la partie « cachée » de l'activité de conduite, celle qui permet au conducteur d'engendrer des comportements de conduite dans l'environnement. Cette activité mentale comprend par conséquent à la fois les processus décisionnels et les raisonnements d'anticipation engagés par le conducteur, à partir de la « conscience » qu'il a « de la situation » [Endsley, 1995] [Bailly, 2004], ainsi que les processus de gestion des ressources attentionnelles. Mais il convient d'y intégrer également l'ensemble des traitements plus perceptifs de l'information, ainsi que les étapes de programmation sensori-motrice de l'activité.

Pour appréhender dans son ensemble l'activité mentale du conducteur, nous nous situerons tout d'abord ici dans le cadre du modèle de [Van Der Molen and Bötticher, 1988], inspiré des travaux de [Michon, 1985], auteurs qui se sont intéressés aux processus de prise de décision et d'évaluation cognitive des risques selon trois niveaux hiérarchiques complémentaires. Le premier niveau est le **niveau stratégique**, qui va principalement prendre en compte la planification de l'itinéraire et la tâche de navigation. L'itinéraire sera choisi en fonction des buts globaux (la destination finale du trajet et le temps disponible pour s'y rendre), des intentions et des motivations du conducteur (optimisation du temps, de la consommation en carburant, etc.) et des aléas connus ou prévisibles (météorologie, embouteillages, déviations, etc.). Le second niveau est le **niveau tactique**. Il correspond aux décisions prises face à une situation précise. C'est à ce niveau que le conducteur va interpréter la situation et se la représenter mentalement pour décider des actions à mettre en œuvre [Bellet, 1998]. Par exemple, lorsqu'un conducteur arrive sur une intersection à Stop, il doit percevoir les autres usagers présents pour adapter son comportement, décider de réguler sa vitesse, anticiper son accélération pour traverser la voie, etc. Enfin, le dernier niveau est le **niveau opérationnel**. C'est le niveau de mise en œuvre des décisions prises en amont, permettant de réaliser des tâches élémentaires de l'activité de conduite (contrôle latéral et longitudinal du véhicule, maintien de distances de sécurité), ainsi que celui de la supervision

de la performance de conduite afin de s'assurer que les actions planifiées produisent bien les effets attendus, et de décider si nécessaire de l'engagement d'actions de régulation, de correction ou de récupération.

Mais l'activité mentale ne se limite pas à la seule prise de décision. Pour décider, il faut en effet percevoir, comprendre et anticiper les événements [Endsley, 1991]. Ces trois aspects sont définis par Endsley comme trois niveaux de « conscience de la situation ». Ces trois niveaux sont complémentaires et interdépendants : la perception est nécessaire pour la compréhension, qui est elle-même nécessaire à l'anticipation, qui dirige à son tour une grande partie de la perception. Cette conscience de la situation, que l'on peut assimiler à la représentation mentale que se fait le conducteur de son environnement [Bellet et al., 2009], est fortement liée à l'action en cours [Bailly, 2004]. Il s'agit là d'un processus complexe qui englobe tout un ensemble de sous-activités mentales plus ou moins intégrées, même si la conscience de la situation se rapporte principalement au niveau tactique de l'activité (page 13).

Par ailleurs, une partie de l'activité mentale du conducteur est dédiée à la perception de l'environnement et à l'attention qu'il convient de porter à tel ou tel événement. Comme nous l'avons déjà souligné, la prise d'informations par le conducteur automobile est le fruit de processus complexes et cachés, dont la composante observable (les mouvements oculaires ou les stratégies visuelles, par exemple) ne représente qu'une infime partie. Au vu du nombre d'objets présents autour du conducteur, de leur dynamique et de leurs attributs, il est nécessaire pour ce dernier de sélectionner uniquement certaines informations, imposant un tri permanent parmi les informations disponibles dans l'environnement afin de ne traiter que ce qui est pertinent et utile pour l'activité. Ce processus de sélection peut être plus ou moins automatisé et plus ou moins conscient, mais il est largement caché, reposant sur des processus d'attention visuelle qui sont mis en jeu pour diriger l'attention du conducteur [Hamama, 2010].

Enfin, une dernière composante importante de l'activité mentale du conducteur concerne la planification des comportements et des actions à mettre en œuvre sur les organes de commande du véhicule afin de pouvoir évoluer dynamiquement dans l'environnement routier.

1.4 Problématique générale de la thèse : comment investiguer l'activité mentale du conducteur ?

Au vu de ce qui précède, le concept générique « d'activité mentale » tel que nous l'employons ici recouvre une multitude de processus perceptifs et cognitifs, tous très différents par nature (et que nous chercherons donc à modéliser différemment par la suite), mais qui partagent néanmoins deux caractéristiques communes essentielles pour nos propos actuels : le fait d'être des processus « cachés », d'une part, et le fait que ces processus constituent des déterminants cognitifs des comportements du conducteur et de l'activité observable.

Dans la mesure où cette activité mentale n'est pas observable de façon directe, la question des moyens scientifiques et des méthodes à mettre en œuvre pour procéder à son investigation se pose de façon cruciale. Deux démarches principales d'investigation de la cognition peuvent être proposées (présentées de façon synthétique dans la figure 3).

La première, que l'on peut qualifier ici « d'ascendante », consiste à observer la performance de conduite correspondant à la partie « visible » de l'activité des conducteurs (intégrant les

1.4. Problématique générale de la thèse : comment investiguer l'activité mentale du conducteur ?

comportements mis en œuvre par le conducteur et leurs effets sur la dynamique du véhicule), puis à inférer l'activité mentale « cachée » qui est à l'origine de cette performance observée.

La seconde, que l'on peut qualifier ici de « descendante », consiste à partir d'une modélisation du fonctionnement cognitif de l'humain pour prédire des comportements attendus (ce que l'on cherchera à vérifier expérimentalement), et/ou pour expliquer une performance observée dans une situation de conduite donnée (le « pourquoi » de certains comportements, par exemple).

Comme le souligne la figure ci-dessous, ces deux démarches ne s'opposent pas, bien au contraire. Elles se complètent mutuellement dans le cycle de développement de modèles cognitifs du conducteur.

Cependant, pour que ce cycle de développement soit complet et pour que ces deux approches puissent véritablement « se rejoindre », il est impératif de disposer non seulement de modèles cognitifs du conducteur, mais aussi et surtout de modèles de simulation numérique de la cognition humaine capables de générer une performance de conduite.

C'est précisément au niveau de ce « point de rencontre » entre l'approche *ascendante* et l'approche *descendante* de l'analyse de la cognition humaine - via la simulation numérique - que se situe cette thèse.

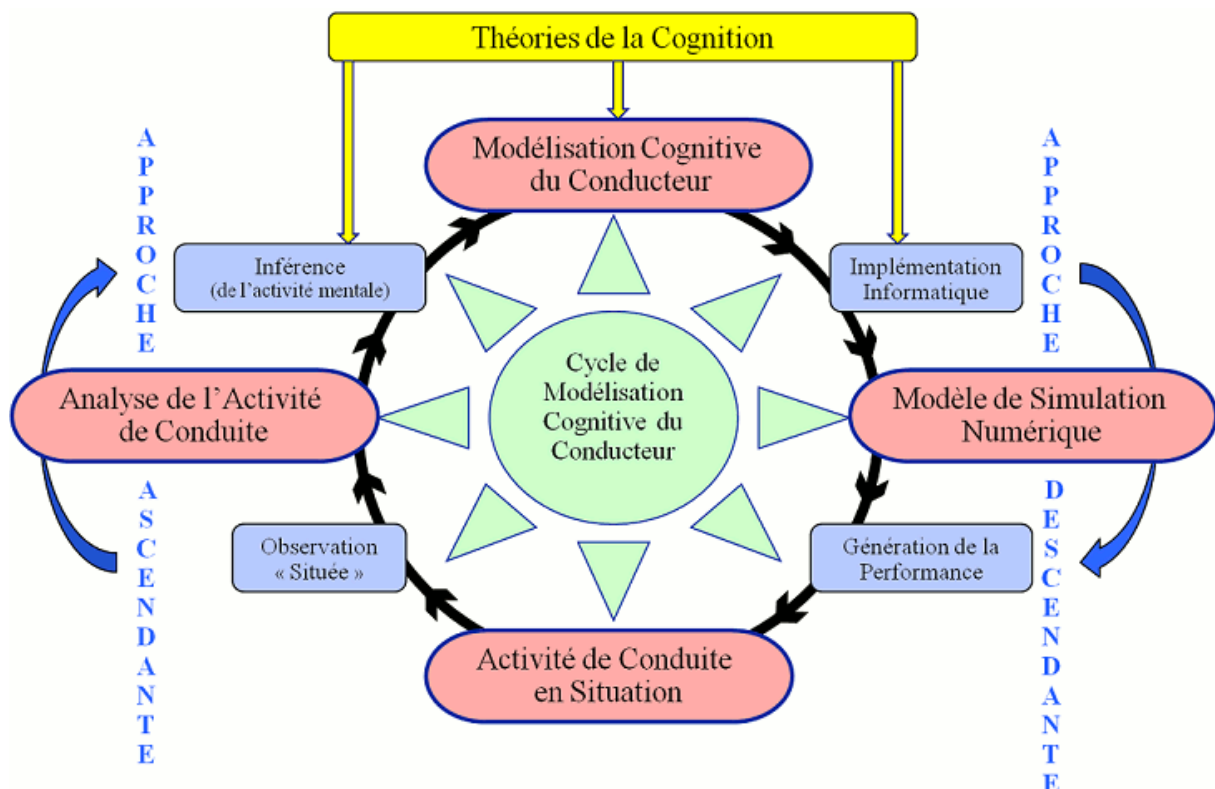


FIGURE 3 – Le cycle de développement d'un modèle de simulation cognitive du conducteur

Afin de pouvoir discuter plus avant de nos propres objectifs scientifiques dans le cadre de cette recherche, il nous faut tout d'abord présenter synthétiquement ces deux démarches d'investigation et de modélisation de la cognition du conducteur.

1.4.1 La démarche « ascendante » : de l'observation de l'activité de conduite à la modélisation cognitive du conducteur

La démarche « ascendante » d'analyse et de modélisation cognitive du conducteur telle que nous la décrivons ici intègre différentes étapes et s'appuie sur différentes méthodes représentées synthétiquement dans la figure 4.

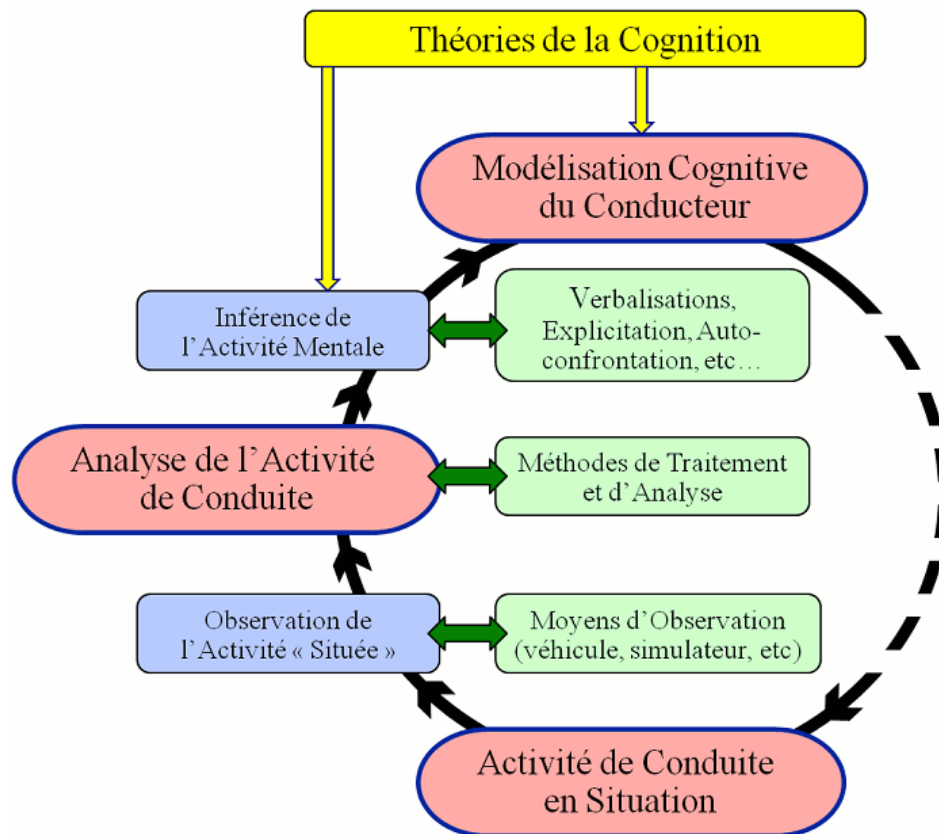


FIGURE 4 – Démarche « ascendante » de la modélisation cognitive

Le point de départ en est *l'observation de l'activité de conduite* dans le cadre de situations routières, réelles ou simulées, en fonction des objectifs scientifiques et des contraintes éthiques de la recherche. Ces observations serviront de base à une démarche *d'analyse de l'activité de conduite* intégrant non seulement les comportements observables, mais aussi l'activité mentale du conducteur qu'il s'agira précisément d'inférer, afin de déboucher sur une *modélisation cognitive du conducteur*. Sans décrire de façon détaillée l'ensemble de ce processus, nous allons en présenter certaines des étapes clés.

1.4.1.1 L'observation de l'activité de conduite

L'observation de l'activité de conduite consiste à observer la performance de conduite réalisée par un conducteur au volant d'un véhicule et en interaction avec un environnement routier dynamique. Nous préférons parler ici de performance plutôt que de comportement, car la performance de conduite intègre non seulement l'ensemble des comportements du conducteur (ses actions sur les commandes, ses stratégies visuelles, ses postures, etc.), mais prend également en compte les

1.4. Problématique générale de la thèse : comment investiguer l'activité mentale du conducteur ?

effets (plus ou moins volontaires et délibérés) de ces comportements au niveau de la performance globale du couple Homme-Véhicule, dans l'environnement routier du moment.

Pour procéder à de telles observations servant des objectifs d'analyse de l'activité de conduite, deux types d'outils sont plus particulièrement utilisés au LESCOT² : les véhicules instrumentés et les simulateurs de conduite.

Les véhicules instrumentés sont des voitures sur lesquelles de multiples capteurs ont été implantés, permettant ainsi l'observation du conducteur et du contexte dans lequel il évolue (cf. annexe .1). Ce type d'outil permet d'observer l'activité de conducteurs immergés dans le trafic routier réel, sur route ouverte. Durant la conduite, de nombreuses mesures sont collectées concernant les actions réalisées par le conducteur sur les commandes, mais également ses stratégies visuelles, ses verbalisations spontanées, l'état du trafic environnant, la position géographique du véhicule, ainsi que tout un ensemble d'informations sur le contexte situationnel de l'activité au moyen de films vidéo synchronisés avec les mesures. Les simulateurs de conduite sont des outils permettant de simuler un environnement de conduite dans lequel le conducteur va pouvoir pratiquer son activité. Ceci peut permettre de tester et évaluer de nouvelles infrastructures routières, d'étudier des populations spécifiques (victimes de traumatismes crâniens, vieillissement sain ou pathologique [Ranchet, 2011]), mettre au point des programmes de rééducation, etc. L'IFSTTAR³ possède plusieurs simulateurs de conduite, le LESCOT utilise celui présent sur le site de Bron, géré par le laboratoire du LEPSiS⁴. (cf. annexe .2)

1.4.1.2 L'analyse de l'activité de conduite « située »

L'analyse de l'activité est au cœur de la démarche scientifique en ergonomie [Leplat, 1985a], y compris lorsqu'il s'agit de s'intéresser au « travail mental » des opérateurs humains [Sperandio, 1980].

L'activité peut être définie comme un ensemble d'actes coordonnés permettant d'atteindre un but global [Leontiev, 1984]. Ainsi, par exemple, l'activité du conducteur automobile est l'ensemble des actes mis en œuvre par ce dernier ayant permis à ce conducteur de se déplacer, au moyen d'un véhicule, d'un point A à un point B (potentiellement identique au point A).

Comme le souligne Leplat [Leplat, 1985a], l'observation est le point de départ de l'analyse de l'activité des opérateurs humains. Mais pour bien comprendre et appréhender l'activité humaine dans sa complexité naturelle, il est essentiel d'observer cette activité « en situation ». Analyser l'activité, c'est en premier lieu observer ce que fait un opérateur particulier dans son environnement naturel, dans le but de la comprendre et d'expliquer ses comportements, en interaction avec le monde qui l'entoure, et au moyen des outils (des « instruments » ou des « artéfacts ») qu'il utilise [Babardel, 1996]. Ainsi, pour analyser l'activité du conducteur automobile, il est nécessaire d'observer ce conducteur au volant d'un véhicule et en interaction avec un environnement routier dynamique dans lequel il doit se déplacer. Analyser l'activité d'un conducteur sans véhicule n'a pas de sens, et vouloir analyser la conduite sans interaction avec un environnement routier dynamique est tout aussi absurde.

²Laboratoire Ergonomie et Sciences COgnitives pour les Transports

³Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Amenagement et des Reseaux

⁴Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations

Ainsi, pour être analysée, l'activité de conduite automobile doit impérativement être observée « en situation », que cette situation soit une situation réelle de conduite au volant d'un véhicule sur route ouverte, ou qu'il s'agisse d'une situation de conduite reproduite sur simulateur de conduite, afin de garantir la sécurité des sujets. L'activité s'en trouve-t-elle modifiée dans ce dernier cas ? Certainement, car un environnement routier simulé n'est qu'une modélisation souvent très imparfaite du monde réel. Malgré cela, nous pouvons estimer que la conduite sur simulateur offre un contexte de conduite *proche* d'une situation réelle préservant les caractéristiques essentielles de l'activité de conduite, au premier rang desquelles le fait de devoir se déplacer et interagir avec un environnement dynamique. Par ailleurs, un simulateur de conduite se pilote grâce à un pédalier similaire à celui d'une voiture, tout comme le volant. Nous pouvons donc considérer qu'observer l'activité de conduite qu'un humain réalise sur simulateur se rapproche sensiblement de l'activité de conduite réelle. Cela autorise le recours à cette méthode, malgré les biais que cela peut occasionner, lorsqu'il s'agit d'étudier des situations dangereuses (situation d'urgence ou environnement accidentogène), ou lorsqu'on souhaite contrôler rigoureusement certaines conditions expérimentales et confronter différents conducteurs à des situations de conduite totalement identiques, ce qui est impossible sur route ouverte.

Il est important d'être conscient de ce problème particulier concernant les limites de validité des simulateurs de conduite, mais l'idée essentielle sur laquelle nous voudrions insister ici est que l'analyse de l'activité de conduite automobile doit être réalisée en situation et en interaction avec l'environnement routier. En effet, être « en activité » signifie modifier l'état de quelque chose présent dans un environnement. L'activité est grandement liée à son environnement et l'observable de cette activité n'est que le résultat d'un processus visant à réaliser l'activité située dans l'environnement. Nous parlons ici du *comportement*, c'est-à-dire de ce que l'humain produit pour atteindre le but global de son activité. Mais l'activité de conduite automobile ne se limite pas au comportement, une multitude de processus cognitifs sous-jacents entrent en jeu avant que le comportement ne soit mis en œuvre.

1.4.1.3 Les moyens d'accès indirects à l'activité mentale

Pour appréhender ces processus cognitifs à partir de l'activité observée, il est donc nécessaire de disposer de moyens d'accès indirects à l'activité mentale du conducteur⁵. Deux types d'approches indirectes de l'activité mentale du conducteur sont utilisés au LESCOT. Le premier consiste à faire verbaliser le conducteur sur son activité de conduite. Le second consiste à procéder par inférence, à partir de l'analyse des traces d'activité.

Le recours aux verbalisations : Le principal moyen d'accès à la pensée utilisé en ergonomie cognitive comme en sciences de la cognition est le recours à la verbalisation des sujets.

Interroger l'opérateur sur sa tâche semble indispensable pour permettre d'entrevoir une partie de l'activité cognitive mise en jeu pendant l'activité. Mais l'explicitation est toujours sujette à la subjectivité de l'opérateur et de l'ergonome qui veut la comprendre, il est donc nécessaire de collecter des données qui feront l'objet d'une interprétation débattue ou questionnée. Ces

⁵L'observation de « l'activité mentale » du conducteur au sens où nous l'avons définie dans cette thèse sera toujours indirecte, y compris dans le cadre des recherches mesurant l'activité cérébrale pendant la conduite [Fort et al., 2010], car si celles-ci observent bien de façon directe l'activité « du cerveau », elles ne permettent pas pour autant d'observer directement son produit, « la pensée », qui est précisément l'objet de ce que nous dénommons l'activité mentale

1.4. Problématique générale de la thèse : comment investiguer l'activité mentale du conducteur ?

données collectées peuvent provenir de plusieurs techniques différentes, qui vont du questionnaire spécifique au dialogue ouvert avec l'ergonome. Chacune des techniques reste limitée pour la possibilité d'explicitation de la part de l'acteur de l'activité et donc de la capacité du sujet à exprimer consciemment une activité souvent automatisée.

Nous allons décrire tout d'abord les données qui peuvent être récoltées pendant la phase d'activité grâce à la verbalisation du sujet. Cette verbalisation est parfois instinctive ou automatique, mais l'ergonome peut pousser le sujet à verbaliser son activité pour faciliter la compréhension de l'activité en cours. L'intérêt de ces données, c'est qu'elles sont fortement contextualisées et permettent donc d'avoir une explicitation de l'activité et une compréhension de la part de l'ergonome en pleine situation [Guérin et al., 2006]. Mais la verbalisation de la part du sujet lui demande une partie de son attention et de ses ressources cognitives. Il est donc parfois difficile, voire impossible, d'obtenir une verbalisation contextuelle pendant une phase critique de l'activité, ou celle-ci sera très imparfaite, car l'explicitation d'une situation d'urgence demande le plus souvent un retour intellectuel sur la situation. Enfin, cette verbalisation peut être sujette à une demande en amont de la part de l'expérimentateur, comme exprimer à haute voix un chiffre compris entre zéro et dix pour caractériser la criticité d'une situation. Cela permet de structurer la masse de données récoltées par la verbalisation, et permet d'avoir dans certains cas une verbalisation complémentaire à la note donnée par le sujet.

Une seconde phase peut permettre d'améliorer la compréhension de l'activité du conducteur : les entretiens a posteriori. Pour cela on peut réaliser des entretiens d'explicitation [Vermerisch, 1994] permettant d'aider le sujet dans son explicitation en lui posant des questions dirigeant la description précise de ses actions passées, mais portant aussi sur les raisons ou les motivations de ces actions. Cela vise à l'inciter à décrire le vécu des situations sous plusieurs aspects comme le sensoriel (se souvenir d'un regard permettant de prendre en compte une information), l'émotionnel (ressentir un autre usager comme agressif), décisionnel (prise de distance par rapport à une situation pour décider d'une action), ou anticipatoire (se souvenir d'une anticipation importante pour une action d'évitement d'un piéton). Cette explicitation a posteriori permet souvent à l'ergonome d'améliorer sa compréhension de certaines situations. Mais l'entretien d'explicitation n'est pas la seule technique d'entretien a posteriori, il existe aussi l'autoconfrontation.

L'autoconfrontation consiste à faire revivre au sujet, grâce aux données véhicule enregistrées pendant le trajet, certaines situations particulières (et particulièrement intéressantes pour l'ergonome). Cela permet de faire revivre au conducteur un cas particulier, qu'il va pouvoir se remémorer et expliciter. L'intérêt est de lui faire revivre depuis l'extérieur une situation qu'il a connue pour qu'il puisse expliciter son activité, expliquer ses actions, exprimer ses souvenirs de décisions sur un cas, et donc expliciter certaines facettes de son activité mentale telle qu'elle s'est engagée en situation [Guérin et al., 2006]. Plusieurs solutions sont possibles dans ces autoconfrontations : on peut laisser le sujet libre dans ses commentaires ou bien le diriger en sélectionnant des situations particulières et en posant des questions précises. Il est aussi possible de demander au sujet de répondre à une série de questions permettant l'estimation de critères plus ou moins objectifs sur la situation (par exemple, qualifier une situation routière ou une manœuvre de conduite qu'il aurait engagée en se situant sur des échelles de criticité bipolaire, allant de « pas du tout critique » à « extrêmement critique »).

Le recours à l'inférence En complément des méthodes de verbalisation, la démarche de modélisation cognitive peut reposer sur un processus d'inférence reposant sur l'analyse des faits

observés, étayée par des modèles ou des théories cognitives.

Comme le souligne Leontiev, l'une des sources de la psychologie ergonomique [Saussez and Yvon, 2010], une fois que nous admettons qu'il existe « *une structure commune de l'activité pratique externe, et de l'activité mentale interne, nous pouvons comprendre l'échange d'éléments qui prend place constamment entre elles, nous pouvons comprendre que certaines actions internes peuvent devenir une partie de la pratique directe, l'activité physique, et inversement, que les actions sensori-motrices externes peuvent servir la performance mentale dans une structure de pure activité cognitive* »⁶[Leontiev, 1981]

Cela signifie qu'il est possible d'entrevoir l'activité mentale d'un opérateur en observant son activité comportementale, car les fonctions psychologiques mises en œuvre se reflètent dans l'activité effective. C'est en fonction de l'activité observée, et du produit d'une transformation résultant de l'inférence, que l'activité mentale de l'opérateur pourra être déduite.

Toutefois, inférer l'activité mentale ne peut pas uniquement reposer sur la description d'un comportement particulier, observé dans une situation particulière. Cela nécessite de considérer un ensemble d'observations convergentes, puis d'en proposer une explication commune reposant sur des processus cognitifs cachés jugés identiques, le tout accompagné d'une formalisation de ces processus permettant de traduire explicitement et intelligiblement une ou plusieurs activités internes du système cognitif humain, et pouvant alors permettre de comprendre l'origine, ou la cause, des comportements observés.

Cette démarche d'analyse systématique d'une grande quantité de *traces d'activité* observées sur véhicule instrumenté et en conditions réelles de conduite⁷, dans l'objectif de permettre une modélisation ascendante de l'activité de conduite et de la cognition du conducteur, a fait l'objet de deux thèses au LESCOT dont les résultats ont permis d'alimenter directement le modèle COSMODRIVE⁸. Ces deux thèses ont été réalisées en collaboration avec le LIRIS⁹ et ont permis de concevoir des outils informatiques (issus des méthodes d'ingénierie de la connaissance) pour l'analyse de données collectées sur véhicule, et permettant d'inférer progressivement, à partir de *traces « brutes » d'activité*, des *schémas de conduite* (formalisme de représentation des compétences de conduite utilisé dans COSMODRIVE, sur lequel nous reviendrons ultérieurement) correspondant à des phases d'activité plus complexes (comme réaliser un dépassement sur autoroute ; cf. figure 5).

La thèse de [Georgeon, 2008] a permis de concevoir l'atelier logiciel ABSTRACT¹⁰, visant à inférer la *conscience* que le conducteur a *de la situation* dans laquelle il évolue (e.g. la façon dont il se la représente mentalement), à partir des données véhicule. Le principe de cette méthode d'analyse consiste à générer un certain nombre de variables quantitatives et qualitatives permettant de décrire l'activité de conduite, puis de proposer un mode d'analyse et d'indexation de ces

⁶ « *Once we acknowledge the common structure of external, practical activity and internal, mental activity we can understand the exchange of elements that constantly takes place between them, we can understand that certain mental actions may become part of the structure of direct* »

⁷Pour faciliter l'exploitation des données ainsi récoltées, une plateforme logicielle a été développée au LESCOT permettant de structurer le développement d'applications de traitement et d'analyse spécifiques (cf. plateforme BIND présentée en annexe .3)

⁸COgnitive Simulation Model of the DRIVER

⁹Laboratoire d'InfoRmatique en Images et Systèmes d'information; UMR CNRS 5205 / Université Lyon1

¹⁰Analysis of Behavior and Situation for menTal Representation Assessment and Cognitive acTivity modeling

1.4. Problématique générale de la thèse : comment investiguer l'activité mentale du conducteur ?

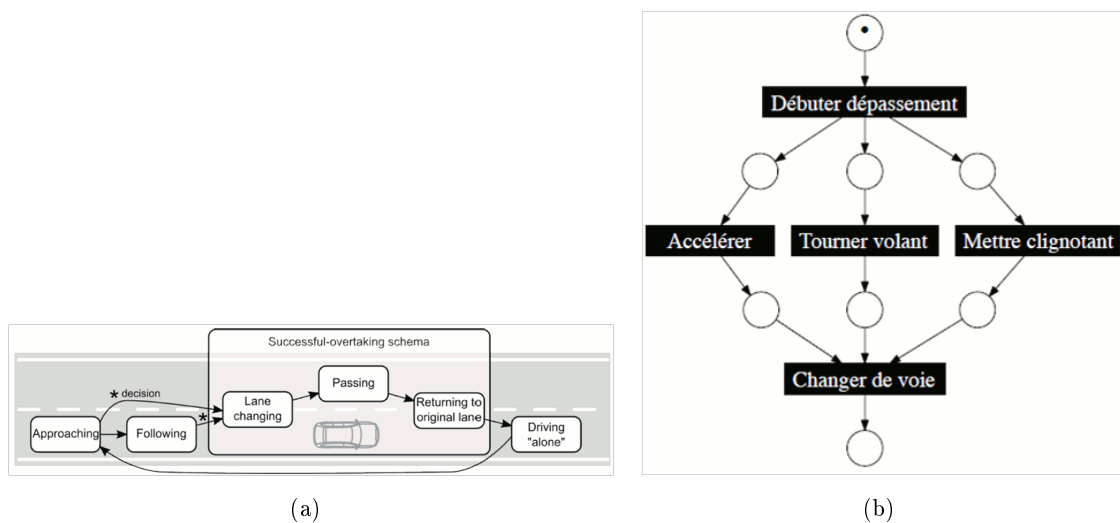


FIGURE 5 – Exemple de découverte d'un schéma tactique de dépassement à partir de l'analyse de traces d'activité (extrait de [Mathern, 2012])

variables qui « fasse sens » pour un analyste souhaitant investiguer la Conscience de la Situation des conducteurs. Ces données sont organisées sous forme d'une succession d'observables, datés et localisés. Ces observables correspondent à des comportements (actions sur les commandes, stratégies visuelles, etc.), à des éléments caractérisant le contexte de conduite (événements extérieurs, nature de l'infrastructure, etc.), ainsi qu'à des informations relatives à la dynamique du véhicule (vitesse, accélération latérale, etc.). Ces données constituent une « trace brute », un premier niveau de modélisation de l'activité qui est ensuite utilisé comme support afin de mettre en évidence, par abstractions successives, les schémas de conduite tactiques élaborés par le conducteur. Cet atelier contient des outils de traitement du signal, de modélisation des connaissances sous forme d'ontologies et de graphes, et des méthodes d'élaboration de règles d'inférence symboliques. Mais c'est aussi un outil de visualisation permettant d'afficher une séquence de conduite sous la forme de représentations graphiques symboliques construites de manière automatique à partir de règles définies manuellement par l'analyste. Elle prend notamment la forme d'un graphe dont les nœuds sont des concepts et les arcs des relations, chacun étant défini parallèlement dans une ontologie. La principale relation utilisée est la relation de séquentialité, qui définit la chronologie de l'activité, mais d'autres relations sont également définies, telles que celles d'inférence permettant de dériver des descriptions plus abstraites à partir d'observables de plus bas niveau, selon des règles que cet outil permet de modéliser.

La thèse de [Mathern, 2012], pour sa part, a permis de prolonger cette démarche d'analyse et de modélisation ascendante de l'activité de conduite, fondée sur l'ingénierie des connaissances. Cette thèse propose une méthode de découverte interactive et progressive de connaissances à partir de traces d'activité : AUTOMATA. Synthétiquement, les données de conduite sont tout d'abord considérées comme des *M-Traces*, associant une sémantique explicite aux informations collectées sur véhicule, puis elles sont exploitées en tant que connaissances dans un Système à Base de Traces (SBT). Ce SBT permet alors de filtrer, transformer, reformuler et abstraire les séquences qui alimentent la synthèse de modèles automates de l'activité de conduite. A ce niveau, AUTOMATA utilise des techniques de fouille de workflow permettant de construire des réseaux

de Petri à partir de logs. Ces techniques nécessitent des données complètes ou statistiquement représentatives. Or les données collectées à bord d'un véhicule en situation de conduite sont par nature des cas uniques, puisqu'aucune situation ne sera jamais reproductible à l'identique. La gageure de cette thèse a donc été de procéder à une forme de généralisation sous la forme de modèles, à partir d'un nombre de cas limités, mais jugés pertinents, représentatifs, ou particulièrement révélateurs par des experts en analyse de l'activité de conduite. Pour permettre cette démarche de modélisation, les algorithmes de synthèse de réseaux de Petri à partir de traces utilisés par AUTOMATA ont été rendus interactifs, afin de permettre à des experts-analystes de l'activité de conduite de guider le processus de découverte de connaissances.

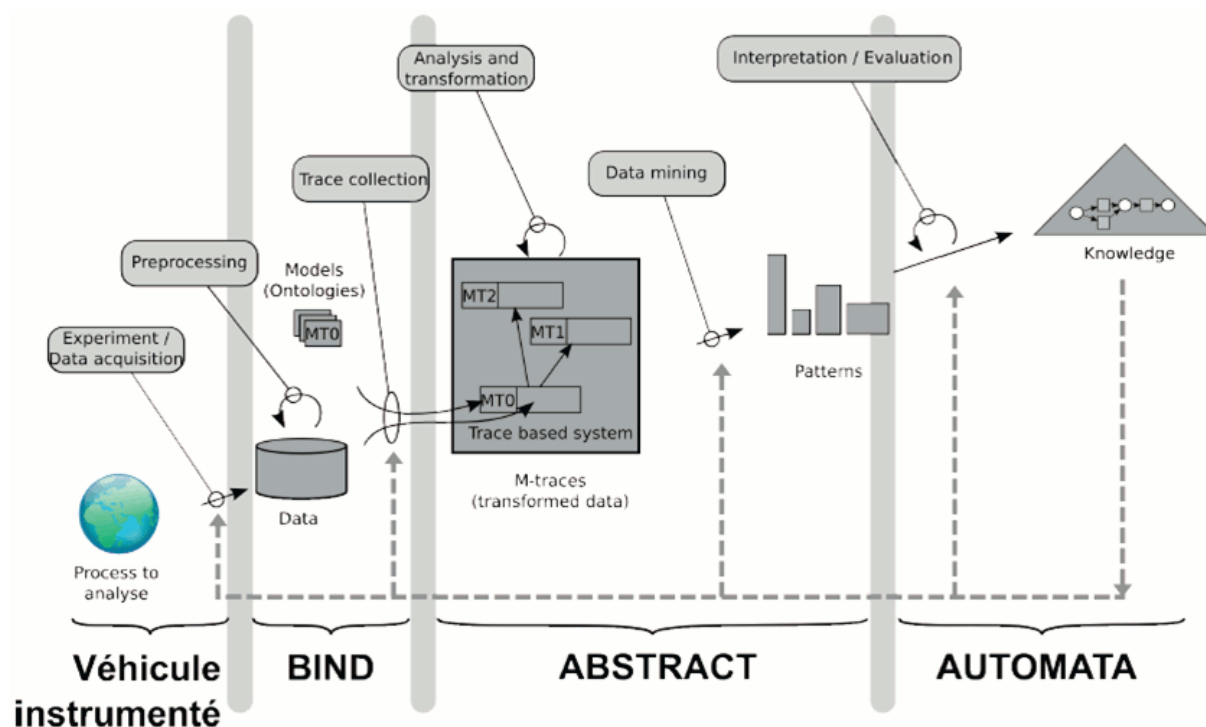


FIGURE 6 – Représentation synthétique des méthodes d'analyse ascendante de l'activité de conduite pour la modélisation cognitive du conducteur développée au LESCOT (extrait de [Mathern, 2012])

La figure 6 présente cette chaîne d'analyse de l'activité de conduite à des fins de modélisation cognitive du conducteur automobile. L'ensemble de ce cycle a été développé, évalué puis validé durant la thèse de Mathern, à partir de données réelles de conduite.

Dans la continuité de cette chaîne d'analyse et de modélisation sur laquelle s'appuie la démarche « ascendante » de modélisation cognitive du projet COSMODRIVE, cette thèse vise désormais à bâtir la démarche « descendante » du cycle de modélisation cognitive, afin de permettre d'évaluer ce modèle COSMODRIVE au moyen de la simulation numérique.

1.4.2 La démarche « descendante » : de la modélisation cognitive du conducteur à la simulation numérique de la performance

Avant de décrire la démarche descendante d'investigation de la cognition du conducteur à laquelle contribuera notre thèse, il convient de rappeler que les approches descendante et ascen-

1.4. Problématique générale de la thèse : comment investiguer l'activité mentale du conducteur ?

dante sont complémentaires. En effet, d'un côté l'inférence de l'activité mentale cachée à partir de l'activité observable ne peut s'imaginer sans se référer à des théories ou des modèles cognitifs permettant de réaliser ces inférences. Mais de l'autre côté, une théorie de la cognition qui ne serait étayée par aucune observation et/ou qui ne se traduirait dans aucun comportement ou fait observable ne remplirait pas les conditions requises d'une théorie scientifique qui se doit précisément, selon [Popper, 1979], de pouvoir être soumise à l'épreuve des faits (elle doit être « falsifiable »).

Dans ce cadre général, et bien que le modèle de simulation numérique que nous cherchons à développer ici se situe clairement sur le versant descendant de ce cycle (figure ci-dessous), il s'inspire en amont de tous les travaux de modélisation cognitive « ascendante » réalisés au LESCOT depuis 1998, dans le cadre de 6 thèses en Ergonomie, en Psychologie et en Informatique ([Bellet, 1998] ; [Bailly, 2004] ; [Mayenobe, 2004] ; [Georgeon, 2008] ; [Banet, 2010] et [Mathern, 2012]).

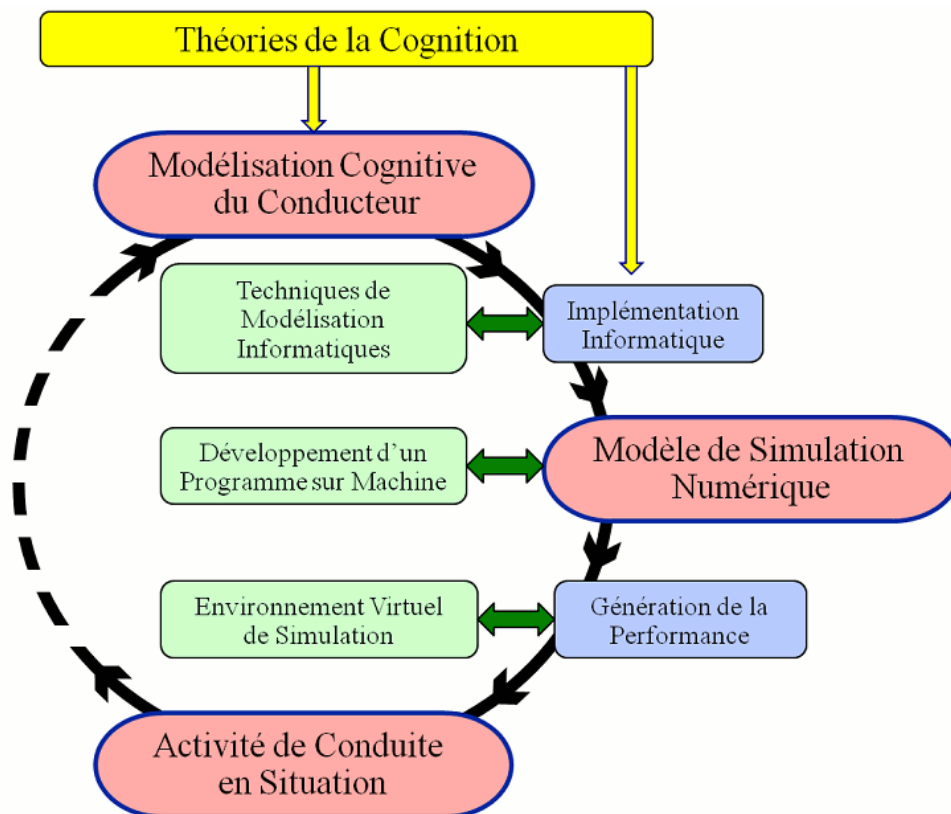


FIGURE 7 – Démarche « descendante » de la modélisation cognitive

La figure 7 présente les principales étapes de la démarche « descendante » de modélisation cognitive du conducteur automobile. Au cœur de ce cycle se situe le développement d'un modèle de simulation numérique basé, d'un côté, sur des travaux de modélisation cognitive - parmi lesquels le modèle COSMODRIVE - et de l'autre côté, sur des techniques informatiques permettant de « traduire numériquement » ce modèle COSMODRIVE afin de disposer d'un programme capable de simuler sur ordinateur les activités mentales du conducteur et, au-delà de cette partie « cachée » de l'activité, de générer des performances de conduite observables qui pourront être comparées avec des performances humaines (collectées auprès de conducteurs réels).

Avant de pouvoir présenter de façon plus précise les objectifs scientifiques de cette thèse en matière de simulation numérique de la cognition du conducteur automobile, il est nécessaire de discuter en amont ce qu'est un *modèle* en général, et un *modèle de simulation cognitive* en particulier.

1.4.2.1 Définition et caractéristiques d'un modèle scientifique

Un modèle scientifique vise à représenter un objet ou un phénomène réel particulier, au moyen d'une expression formelle explicite permettant de décrire cet objet ou ce phénomène naturel.

Tous les modèles, quel que soit le domaine scientifique, ne sont que des réductions simplificatrices des objets ou des phénomènes du monde réel qu'ils visent à décrire (sans quoi, ce ne serait plus des modèles, mais la réalité elle-même) au moyen de représentations formelles plus ou moins complexes. Cette réduction dépendra des objectifs du chercheur à l'origine du modèle, mais également de la nature des observations qu'aura réalisées ce chercheur. Le formalisme adopté pour créer le modèle définira un cadre qui permettra de structurer la connaissance et d'orienter les recherches futures engendrées par le modèle lui-même. La représentation que propose un modèle de la réalité objective est par conséquent imparfaite et soumise aux observations faites, mais elle permet en revanche une généralisation des données empiriques récoltées permettant de les comprendre et de les interpréter, ce qui peut favoriser la découverte de connaissances et ouvrir de nouvelles pistes de recherche. Cela peut aussi réorienter l'observation du phénomène et changer ainsi la nature des données collectées, ce qui modifiera en retour le modèle. C'est l'architecture du modèle qui est une base posée, c'est le formalisme et le langage qu'utilise le chercheur pour le modèle qui engendre sa création, mais ensuite, le modèle devient à la fois le produit et l'outil de la recherche. La simplification que le modèle représente dans un premier temps n'empêche pas, bien au contraire, sa complexification progressive ultérieure visant ainsi à créer une représentation des phénomènes de plus en plus complexe et fidèle à la réalité.

1.4.2.2 Finalité des modèles : décrire, comprendre, prédire

La compréhension du monde est la finalité première de toute démarche scientifique : décrire les phénomènes, puis les expliquer, pour ensuite réussir à les prédire est le grand enjeu de la science. Les modèles permettent de simplifier le monde et de le représenter, ceci pour en permettre une meilleure compréhension.

Néanmoins, il peut y avoir différents niveaux de description et de compréhension d'un phénomène et, partant de là, différents types de modèles. Une distinction importante est à faire entre modèles *explicatifs* et modèles *prédictifs*. Un modèle explicatif n'est pas forcément un modèle prédictif, et inversement.

En effet, il n'est pas toujours nécessaire d'expliquer un phénomène pour faire des prédictions. A l'inverse, lorsque nous nous intéressons à la désintégration de noyaux radioactifs, par exemple, nous pouvons trouver des modèles explicatifs de ce phénomène, mais il n'est pas possible avec ces modèles de prédire avec précision la prochaine désintégration. Cette dualité entre modèles prédictifs et modèles explicatifs se retrouve également en matière de sécurité routière. Ainsi, un modèle statistique peut parfaitement permettre de prédire qu'il y aura environ 3500 morts sur les routes françaises en 2013, mais il ne permet ni de savoir qui sera tué ni où se produiront ces accidents mortels, et encore moins d'en expliquer les causes précises. A l'inverse, un modèle

1.4. Problématique générale de la thèse : comment investiguer l'activité mentale du conducteur ?

de simulation cognitive du conducteur pourra potentiellement permettre d'expliquer les causes d'un accident dans un contexte donné, au regard d'erreurs qu'aurait commises le conducteur en matière de perception ou de compréhension d'un événement, de prise de décision inadéquate, ou de mauvaise estimation des risques associés à une manœuvre de conduite particulière.

Ainsi, les modèles prédictifs peuvent être relativement lacunaires du point de vue explicatif tout en permettant néanmoins de faire de bonnes prédictions. A l'inverse, certains modèles explicatifs peuvent être tellement complexes qu'ils ne permettent pas de générer de prédictions précises. Chaque modèle a donc un champ de validité et d'application qui lui est propre et qu'il est nécessaire de définir avec le modèle lui-même. Toutefois, cette dualité prédictif versus explicatif n'est pas le résultat d'une volonté délibérée des modélisateurs, ni d'une caractéristique intrinsèque des modèles scientifiques en général. Il s'agit bien souvent d'une conséquence purement pratique face à l'ampleur de la tâche que représente le développement de modèles " puissants ", à la fois du point de vue explicatif et du point de vue prédictif.

Face à cette difficulté, la simulation numérique peut être d'un grand secours, en permettant de concevoir des modèles à la fois prédictifs et explicatifs. En effet, l'arrivée de l'informatique et la puissance de calcul colossale des ordinateurs permet de dépasser les limites cognitives du chercheur en rendant possible, grâce à la simulation numérique, la prise en compte et la reproduction de phénomènes extrêmement complexes. Dès lors qu'il peut s'incarner dans un logiciel capable de générer des simulations numériques, un modèle explicatif peut se complexifier progressivement et devenir prédictif, prendre en compte de nombreuses données expérimentales et simuler des processus de traitement hétérogènes permettant de mieux appréhender la complexité naturelle des situations ou des phénomènes qu'il cherche à modéliser.

1.4.2.3 De la modélisation cognitive à la simulation numérique

En matière d'analyse et de modélisation de l'activité humaine, les modèles visent eux aussi des objectifs de description, d'explication ou de prédiction [Sperandio, 2003]. Un modèle descriptif de l'activité permet de décrire ce que fait effectivement l'opérateur. Un modèle explicatif permet de comprendre les raisons sous-jacentes qui ont engendré cette activité effective (nécessitant d'appréhender la partie « cachée » correspondant à l'activité mentale). Un modèle prédictif permet de prédire le comportement futur de l'opérateur.

Un modèle peut posséder une ou plusieurs de ces facettes, en fonction de ses propres limites de validité. Mais dans l'idéal, et bien que cela soit difficile à réaliser d'un point de vue pratique, un modèle d'opérateur complet devrait à la fois offrir une description fidèle de l'activité effective de l'opérateur, un support explicatif des processus cognitifs mis en œuvre au-delà de l'activité observable, et permettre de prédire des comportements à venir avant même que l'humain ne les mettent en œuvre.

C'est précisément dans cet objectif que s'inscrit notre démarche de modélisation et de simulation cognitive du conducteur automobile. Cela nécessite en premier lieu de disposer d'un modèle cognitif du conducteur. La modélisation cognitive vise en effet à rendre compte des processus cognitifs mis en jeu pendant l'activité de conduite permettant non seulement de comprendre le comportement du conducteur, mais aussi et surtout d'en expliquer la genèse. En modélisant l'activité mentale, celle qui est mise en œuvre pour percevoir et comprendre la situation de conduite, prendre des décisions et planifier des actions, il devient alors possible d'expliquer une partie du

fonctionnement de l'humain pendant son activité, tant le fonctionnement visible (les actions qu'il entreprend), que son fonctionnement cognitif (son activité mentale). La modélisation cognitive rend donc intelligible des phénomènes internes à l'humain et par là même permet de théoriser son fonctionnement cognitif pendant et pour son activité, dans le but de la comprendre et de la reproduire. C'est dans cette optique que la simulation cognitive prend tout son sens.

Au-delà de la modélisation cognitive, la simulation numérique de la cognition aspire à reproduire virtuellement le fonctionnement du système cognitif humain pendant son activité. La simulation numérique permet non seulement de rendre compte des processus cognitifs, mais elle permet également de les explorer dans *leur fonctionnement dynamique, et en interaction les uns avec les autres*. « L'objectif de la modélisation [cognitive] est précisément de tenter de reconstruire de telles entités cognitives à partir d'une démarche expérimentale produisant un ensemble de lois mettant en jeu des phénomènes directement observables (situations et comportements). Cette reconstruction peut n'être que formelle, mais elle peut également aboutir à la production de phénomènes cognitifs à partir de systèmes calculatoires artéfactuels. C'est dans ce dernier cas qu'il convient de parler de simulation » ([Tiberghien, 1993] p. 51). C'est ce « système calculatoire artéfactuel » qui permet la simulation, et donc d'obtenir un produit de la modélisation cognitive autre que formel, qui permettra de simuler une partie de l'humain située entre le comportement visible et l'activité neuronale : les processus cognitifs.

Modulo les différences fondamentales qui existent entre l'ordinateur utilisé pour supporter la simulation cognitive et le cerveau humain qui soutient la cognition naturelle, et sous réserve que l'on dispose des techniques informatiques adéquates, les sciences cognitives aspirent au final à créer des systèmes cognitifs artificiels isomorphes, sur le plan fonctionnel, au système cognitif humain (on parle aussi de plausibilité psychologique) [Bellet and Tattegrain-Veste, 2003]. Dans ce contexte, il devient possible de construire une représentation formelle de la cognition humaine et de la mettre en action. En s'incarnant dans la simulation numérique, une théorie ou un modèle cognitif devient alors capable de produire des phénomènes observables, qu'il s'agisse de comportements mesurables susceptibles d'être comparés aux comportements de sujets humains, ou qu'il s'agisse de l'activité mentale « cachée », ainsi révélée « à l'air libre » au moment de la simulation.

Ce faisant, la simulation numérique devient alors un moyen d'investigation scientifique à part entière de la cognition humaine.

1.5 Les enjeux scientifiques de la thèse : Modéliser et simuler le conducteur automobile

Au regard de ce positionnement épistémologique de notre thèse dans le cycle de modélisation cognitive du conducteur présenté en figure 7, les objectifs que nous viserons seront (1) de proposer un modèle cognitif du conducteur automobile capable de décrire son activité mentale, (2) de concevoir et développer une version informatique de ce modèle afin de pouvoir réaliser des simulations, non seulement des processus perceptifs et cognitifs mais également de l'activité de conduite dans son ensemble, et (3) d'utiliser la simulation numérique comme un générateur d'hypothèses prédictives de certaines performances de conduite susceptibles d'être comparées à des performances humaines.

1.5.1 Décrire et expliquer l'activité du conducteur

Développer un modèle du conducteur vise en premier lieu à décrire cet opérateur humain et son activité. Mais que décrire exactement ? Avec quel niveau de précision ? Et pour quel usage ? Telles sont les questions que doit se poser en amont tout modélisateur. Par exemple, un modèle statistique du conducteur basé sur des corrélations entre, d'un côté, des états de la situation externe et, de l'autre côté, des comportements de conduite peut permettre de décrire avec une certaine précision des comportements de conduite génériques observables auprès de la plupart des conducteurs. En revanche un tel modèle ne permettra pas véritablement de comprendre « comment » et « pourquoi » ces conducteurs adoptent tel ou tel comportement dans ces situations.

En matière de description, l'objectif d'un modèle cognitif est de plus haut niveau : il vise en effet à décrire le fonctionnement cognitif « interne » permettant la production d'un comportement « externe » de la part du conducteur. Décrire les processus cognitifs mis en jeu, c'est décrire l'activité mentale du conducteur et les états internes du système cognitif humain, mais c'est aussi décrire les liens existant entre ces processus et ces états, dans le cadre d'une architecture cognitive particulière, le tout apportant une représentation formelle du fonctionnement du système cognitif humain. Dans ces conditions, un modèle de simulation cognitive du conducteur n'est plus simplement descriptif, mais il devient alors explicatif des comportements de conduite observés.

Tel sera le premier objectif de notre travail : proposer un modèle cognitif du conducteur capable de rendre intelligible l'activité de conduite observée en situation dynamique, au regard de processus et des états cognitifs internes mobilisés d'un côté par le conducteur durant son activité, et modélisés et simulés par notre modèle de l'autre côté.

A ce niveau, notre démarche consistera tout d'abord à partir de l'existant, qu'il s'agisse de modèles théoriques du conducteur disponibles dans la littérature, ou qu'il s'agisse des travaux de modélisation cognitive d'ores et déjà réalisés au [LESCOT](#) dans le cadre du projet [COSMODRIVE](#) dont s'inspirera directement notre démarche de modélisation cognitive. Cette revue de la littérature, comme la présentation synthétique du modèle [COSMODRIVE](#), sera réalisée dans le prochain chapitre (chapitre 2). A l'issue de cet état de l'art, nous serons en mesure d'affiner nos objectifs scientifiques en matière de modélisation cognitive du conducteur, en inscrivant pour partie notre travail dans le prolongement du modèle [COSMODRIVE](#), mais en identifiant aussi certains manques du modèle actuel qu'il conviendra de combler pour pouvoir atteindre nos propres objectifs.

1.5.2 Modéliser et simuler informatiquement les processus perceptifs et cognitifs

Sur la base de cette réflexion, nous présenterons alors dans le chapitre 3 une version « étendue » du modèle [COSMODRIVE](#) enrichie des éléments nouveaux nécessaires à nos objectifs de simulation numérique.

En effet, l'enjeu de cette thèse n'est pas simplement de proposer un modèle cognitif du conducteur. Il s'agit de concevoir un programme informatique capable de simuler sur ordinateur une partie des processus perceptifs et cognitifs correspondant à l'activité mentale « cachée » du conducteur. Mais il s'agit aussi de pouvoir faire évoluer ce modèle en interaction avec un environnement routier virtuel, afin d'appréhender la cognition humaine « en situation dynamique ».

Pour permettre cette simulation dynamique, il sera nécessaire de développer un programme informatique capable de rendre compte du fonctionnement cognitif et des stratégies perceptives du conducteur automobile. Il s'agira aussi d'immerger notre modèle dans un environnement routier virtuel afin qu'il puisse s'y déplacer, à la façon d'un conducteur humain.

A partir de la modélisation cognitive réalisée dans le chapitre 3, il s'agira donc de concevoir et de développer cette version informatique de **COSMODRIVE** sur une plateforme de simulation virtuelle dynamique.

Ce travail de modélisation, de conception, de développement et d'implémentation informatique de notre modèle de simulation cognitive sera présenté dans le chapitre 4.

1.5.3 Prédire des comportements de conduite

Enfin, l'objectif de cette thèse n'est pas uniquement de développer un modèle de simulation informatique du conducteur. Il s'agit également de concevoir une méthodologie pour l'investigation scientifique de la cognition humaine. Comme nous l'avons largement discuté dans ce premier chapitre, l'enjeu est de pouvoir « incarner numériquement » des théories cognitives à travers notre modèle de simulation afin de pouvoir en tester la validité scientifique (selon la démarche de validation « descendante »).

A cette fin, notre objectif sera de proposer, grâce à la simulation numérique de la cognition du conducteur automobile, des prédictions concernant certains comportements humains, comme la conséquence, en quelque sorte, des processus cognitifs modélisés.

En d'autres termes, et à l'inverse de la méthode expérimentale utilisée plus classiquement pour modéliser la cognition en observant des « conséquences » (la performance des sujets) afin d'inférer puis de modéliser les « causes » des comportements (les processus cognitifs), il s'agit ici de partir des « causes » (le fonctionnement du système cognitif humain) pour générer - via la simulation numérique - des « effets » (tel comportement ou telle performance de conduite), que l'on cherchera alors à comparer avec des comportements humains observés dans des situations de conduite équivalentes.

Dans la mesure où les comportements effectifs des sujets humains seraient conformes aux prédictions générées par la simulation, cela contribuera alors à valider le modèle de simulation cognitive développé et, au-delà, les théories cognitives qu'il incarne numériquement.

Le chapitre 5, via trois expérimentations réalisées durant cette thèse, s'attellera précisément à évaluer la validité des prédictions de notre modèle de simulation cognitive, et à juger de l'intérêt de la démarche de simulation numérique pour l'investigation scientifique de la cognition humaine.

Dans la mesure où les résultats obtenus seraient concluants, cela signifiera que nous aurons atteint nos objectifs, à savoir développer une version numérique du modèle **COSMODRIVE** permettant de boucler le cycle général de modélisation et de simulation cognitive du conducteur automobile tel qu'il a été présenté en Figure 7.

1.5. Les enjeux scientifiques de la thèse : Modéliser et simuler le conducteur automobile

La modélisation du conducteur automobile : état de l'art

Durant les cinquante dernières années, différentes approches de modélisation du conducteur ont été proposées. Ces modèles sont très hétérogènes, à la fois du point de vue de ce qu'ils cherchent à modéliser (la tâche de conduite, le comportement, les processus perceptifs et cognitifs, etc) que de celui des formalismes utilisés pour représenter le conducteur. Il est néanmoins possible de dégager différentes catégories de modèles, chacune relevant d'objectifs scientifiques différents ayant dominé les travaux de sécurité routière pendant un certain temps, avant de laisser la place à de nouveaux courants de pensée, plus ou moins inspirés des anciennes approches. Cet état de l'art s'achèvera par la présentation du modèle COSMODRIVE¹. Nous ferons ensuite le bilan de l'existant, afin de définir plus précisément nos objectifs en matière de modélisation et de simulation informatique du conducteur.

2.1 Les modèles d'analyse de la tâche de conduite

Cette première catégorie de modèles d'analyse de la tâche de conduite apparaît au début des années soixante et va rester très populaire pendant une quinzaine d'années. Ces modèles, essentiellement descriptifs, visent à identifier les différentes tâches que doit réaliser un conducteur au volant de son véhicule. Formellement, ils se présentent le plus souvent sous la forme de taxinomies plus ou moins exhaustives de tâches et sous-tâches de conduite.

Un exemple typique de cette démarche de modélisation est le modèle de McKnight et Adams [McKnight and Adams, 1970] dans lequel ces auteurs ont recensé plus de 1700 *comportements de conduite*, regroupés en 45 *tâches de conduite* (« s'arrêter », « accélérer », « s'insérer dans une file », « conduire en ville », « négocier un virage », « entretenir le véhicule », « obtenir le permis de conduire », « conduire de nuit ») elles-mêmes agrégées en 9 *catégories* (« tâches de contrôle de base du véhicule », « tâches en relation avec le trafic », « tâches en relation avec l'infrastructure »). Ces quelques exemples illustrent parfaitement les difficultés posées par la démarche taxinomique : la volonté d'exhaustivité, l'hétérogénéité des tâches de conduite et leur enchâssement peuvent rapidement déboucher sur une classification redondante, voire incohérente. Ainsi, par exemple, les auteurs identifient un type particulier de tâches qualifiées de « tâches en relation avec les conditions météorologiques » alors qu'il s'agit plutôt d'un facteur situationnel que d'une tâche de conduite à proprement parler (on peut démarrer, accélérer ou franchir une intersection par temps de pluie).

Plus pertinente, en revanche, la classification proposée par [Allen et al., 1971] basée sur le *niveau de performance*. Ces auteurs distinguent trois niveaux de performance en fonction de leur

¹Cognitive Simulation MOdel of the DRIVER

fenêtre temporelle : la *macroperformance* s'inscrit dans le long terme (d'une dizaine de secondes à plusieurs heures), la *performance situationnelle* dans le moyen terme (quelques secondes) et la *microperformance* dans le très court terme (souvent inférieur à la seconde). La macroperformance concerne l'ensemble des tâches de conduite en rapport avec la planification et la réalisation de l'itinéraire (e.g. préparation de l'itinéraire avant de prendre le volant, tâches de navigation lors de la réalisation de parcours, et adaptation en temps réel du trajet initialement prévu si nécessaire). La *performance situationnelle* se rapporte à la gestion de la situation courante (comme franchir une intersection, s'insérer sur l'autoroute ou réaliser un dépassement). Enfin, la *microperformance* intègre l'ensemble des tâches en rapport avec le contrôle latéral et longitudinal du véhicule (au moyen d'actions sur les commandes). Cette classification des tâches de conduite en fonction du *niveau de performance* constitue sans conteste la contribution la plus intéressante, à notre niveau, des travaux d'analyse de la tâche. Pour le reste, cette démarche descriptive des tâches de conduite nous renseigne finalement très peu sur la cognition du conducteur.

2.2 Les modèles de régulation

Les modèles de régulation sont issus de la théorie du contrôle. Une synthèse récente des principaux modèles de conducteurs reposant sur la théorie du contrôle a été réalisée par [Jürgensohn, 2007]. Conçus par des ingénieurs plus que par des spécialistes de l'humain, ces modèles visent à représenter le conducteur, non pas comme un sujet pensant, mais sous la forme d'équations mathématiques. La source d'inspiration principale est clairement l'approche *Cybernétique* telle qu'elle a été définie originellement par [Wiener, 1948]². Pour cet auteur, les humains peuvent être définis comme des systèmes auto-adaptatifs qui régulent leurs interactions avec l'environnement par l'entremise d'un processus de rétroaction (feed-back).

L'activité de conduite y est donc appréhendée comme une boucle de régulation dynamique dans le cadre de laquelle le conducteur produit des comportements, observe leurs effets sur la situation, puis adapte son activité en retour, ceci afin d'atteindre les objectifs qu'il se fixe. Du point de vue cognitif, cette approche ne traite pas ou que très peu de l'activité mentale du conducteur, excepté sous cette forme générale d'un processus de rétro-action et d'ajustement dynamique des comportements. Concrètement, le conducteur y est le plus souvent décrit comme une « boîte noire » agissant en continu sur le véhicule, et il est en général modélisé sous la forme d'équations différentielles, à la façon d'un contrôleur servomoteur. Ce modèle mathématique est alors paramétré à l'aide de données empiriques issues de mesures de performances de conduite. La figure ci-dessous illustre bien ce type de modèle issu de la théorie du contrôle.

²Cybernétique vient du grec kubernêtês : homme de barre. [Wiener, 1948] précise que ce nom a été choisi en référence à l'article de J.C. Maxwell : « On Governors ». En choisissant ce terme, déclare Wiener (p.17, tr. fr. in Pélissier et Tête), « nous avons voulu reconnaître que le premier papier significatif sur les mécanismes de feed-back était un article sur les régulateurs publié par Maxwell et que le terme anglais pour régulateur (governor) est dérivé d'une corruption latine de kubernêtês. Nous souhaitons aussi rendre compte du fait que les servomécanismes d'un navire constituent une des toutes premières formes des mécanismes de feed-back.)

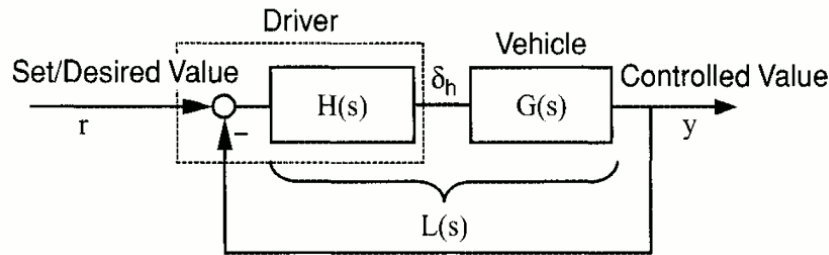


FIGURE 8 – Modèle de conducteur issu de la théorie du contrôle. Repris de [Jürgensohn, 2007].

Si les modèles de régulation ne cherchent pas à modéliser l'activité mentale du conducteur, ils sont néanmoins intéressants pour notre approche de modélisation cognitive car ils inscrivent l'activité de conduite dans un cycle d'adaptation continue, par exemple, une boucle de régulation dynamique utilisée par le conducteur pour réguler sa vitesse de déplacement, ou pour contrôler la position latérale du véhicule sur la voie de circulation.

Ces modèles sont loin d'avoir été abandonnés et ils sont même largement utilisés aujourd'hui dans le domaine de l'ingénierie, tant pour représenter de façon simplifiée le conducteur humain (dans des modèles de trafic, par exemple) que pour concevoir des automates embarqués. En effet, couplé à un modèle de véhicule, lui-même représenté sous la forme d'équations différentielles, ce type d'approche peut permettre, par exemple, de calculer efficacement la stabilité du couple Conducteur-Véhicule dans différentes situations de conduite.

Ces modèles sont aussi tout à fait pertinents pour décrire le comportement du conducteur humain dans le contexte de situations de régulation (maintien de distances de suivi, contrôle de la vitesse et de la position latérale, etc.). Cependant, ils ne décrivent qu'une partie de l'activité de conduite automobile, appréhendée sous l'angle de la performance globale du système Homme-Véhicule dans son ensemble. Ils ne permettent pas de modéliser les processus cognitifs, tels que les représentations mentales et prises de décisions sous-jacentes à l'activité, nécessaires pour comprendre et expliquer le comportement du conducteur.

2.3 Les modèles centrés sur le risque

C'est avec l'augmentation du trafic sur les routes et donc l'augmentation du nombre d'accidents que va naître la nécessité de comprendre l'origine de ces accidents. De nouveaux modèles vont voir le jour à partir de 1975, visant à comprendre et à modéliser les processus psychologiques intervenant lors de la prise de risque au volant.

Ces modèles mettent notamment l'accent sur les motivations du conducteur pour prendre ou ne pas prendre de risque durant la conduite. Certains auteurs postulent que les conducteurs ne prennent jamais de risque d'une façon délibérée (c'est la théorie du *risque zéro* de [Näätänen and Summala, 1976]) et que la prise de risque serait le résultat d'une erreur d'appréciation (sous-estimation du risque objectif), tandis que d'autres chercheurs postulent au contraire que la prise de risque est le résultat d'un processus de comparaison gain/coût. C'est typiquement le cas du modèle de *l'homéostasie du risque* de [Wilde, 1982a]. Selon ce modèle, le conducteur ajuste constamment sa conduite pour conserver un niveau de *risque subjectif* acceptable, sans dépasser un seuil critique, ni même viser le risque zéro.

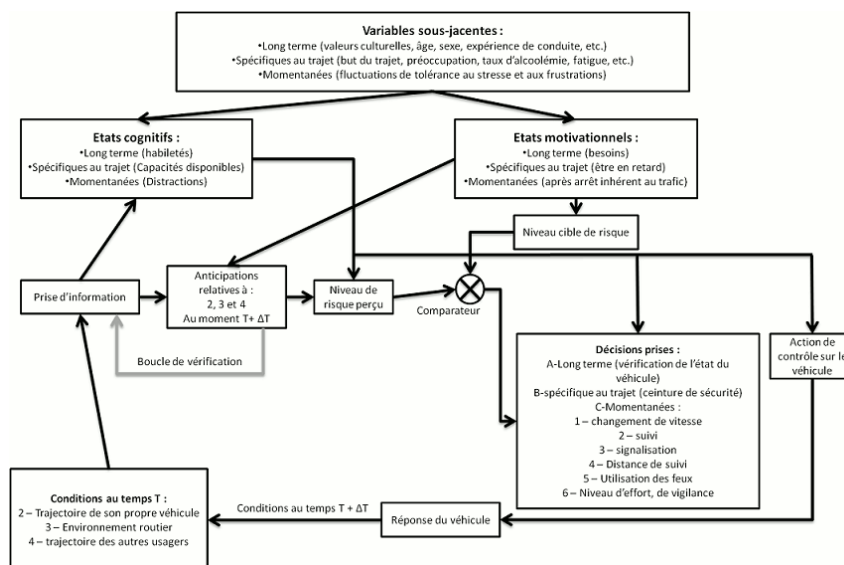


FIGURE 9 – Modèle du conducteur basé sur l'homéostasie du risque ([Wilde, 1982b])

Le modèle d'homéostasie du risque part du principe que dans toute situation l'humain accepte un certain niveau de risque lorsque le *gain* qu'il va en retirer justifie cette prise de risque. Wilde insiste sur ce rapport gain/risque : le conducteur peut prendre délibérément la décision d'engager une action qu'il sait dangereuse si le gain qu'il pense en retirer le justifie (par exemple, griller un feu orange pour gagner du temps lorsque je suis pressé). Pour Wilde, le conducteur cherche donc constamment à atteindre un équilibre entre son gain et son risque, c'est le *niveau cible*, calculé en fonction d'un *risque perçu* (correspondant à une évaluation subjective du risque situationnel) et de ses gains/coûts en risque propres à chaque alternative comportementale. Sur la base de ce principe d'homéostasie, Wilde [Wilde, 1982b] propose un modèle du conducteur basé sur la comparaison risque perçu/niveau cible (figure 9). Il fait appel à la dimension anticipatrice de la conduite, qui entraîne de la part du conducteur une constante dérivation mentale des états futurs possibles de la situation courante, lui permettant ainsi d'anticiper des changements critiques pour différentes alternatives comportementales, par exemple. Cette anticipation peut ensuite être vérifiée grâce à une *boucle de vérification* qui permet au conducteur de prendre des informations perceptives à l'instant $T + \Delta T$ pour s'assurer que l'anticipation faite à l'instant T est bien conforme à la situation rencontrée à $T + \Delta T$.

Cette théorie de Wilde a été l'une des sources d'inspiration majeures de la modélisation du processus de prise de décision dans le modèle COSMODRIVE, sur lequel nous reviendrons plus tard. Elle est également au cœur de travaux plus récents réalisés au LESCOT³ visant à modéliser la « Conscience du Risque » du point de vue cognitif [Banet, 2010] [Bellet and Banet, 2012]

Un autre modèle du conducteur appartenant à cette catégorie mérite d'être discuté ici, c'est le Hiérarchique du risque de [Van Der Molen and Bötticher, 1988], inspiré des travaux de [Michon, 1979]. A travers ce modèle, l'objectif des auteurs était de proposer « un cadre structurel qui permette de décrire les processus de perception, de jugement et de décision à tous les niveaux de la tâche » (p. 538). Ce modèle décrit la conduite comme une activité structurée hiérarchiquement selon trois niveaux : le niveau stratégique, le niveau tactique et le niveau opérationnel (figure 10).

³Laboratoire Ergonomie et Sciences COgnitives pour les Transports

- **Le niveau stratégique** englobe la planification de l'itinéraire et la tâche de navigation permettant sa réalisation, y compris la replanification en temps réel du trajet en cas d'imprévu (déviation, embouteillages, etc). Il prend aussi en compte les contraintes et les motivations générales que s'impose le conducteur (temps imparti pour réaliser le trajet, respect strict ou non des limitations de vitesse, plaisir de conduire, etc.).
- **Le niveau tactique** concerne la gestion de la situation de conduite courante (franchir une intersection, par exemple), via la prise de décisions et la planification d'actions à mettre en œuvre en fonction des buts locaux que vise le conducteur (comme tourner à gauche ou dépasser) et des contraintes situationnelles (limites de vitesse, par exemple).
- **Le niveau opérationnel** se scinde en deux modes de fonctionnement alternatifs, sélectionnés par un *relais* d'urgence permettant d'activer ou non le mode d'urgence. Le premier mode correspond à la gestion de situations normales et conformes aux prévisions du conducteur. Dans ce contexte, le niveau opérationnel permet d'assurer la réalisation du plan tactique via la mise en œuvre d'actions motrices sur les commandes du véhicule. Il permet également d'effectuer de manière presque autonome une partie de la tâche de conduite (automatismes de régulation pour le contrôle longitudinal et latéral). Le mode d'urgence n'intervient qu'en cas de situation critique. Il s'active automatiquement (via le *relais d'urgence*) en cas de danger perçu, et il permet alors la sélection et l'exécution d'une réaction d'urgence (freinage fort ou coup de volant, par exemple).

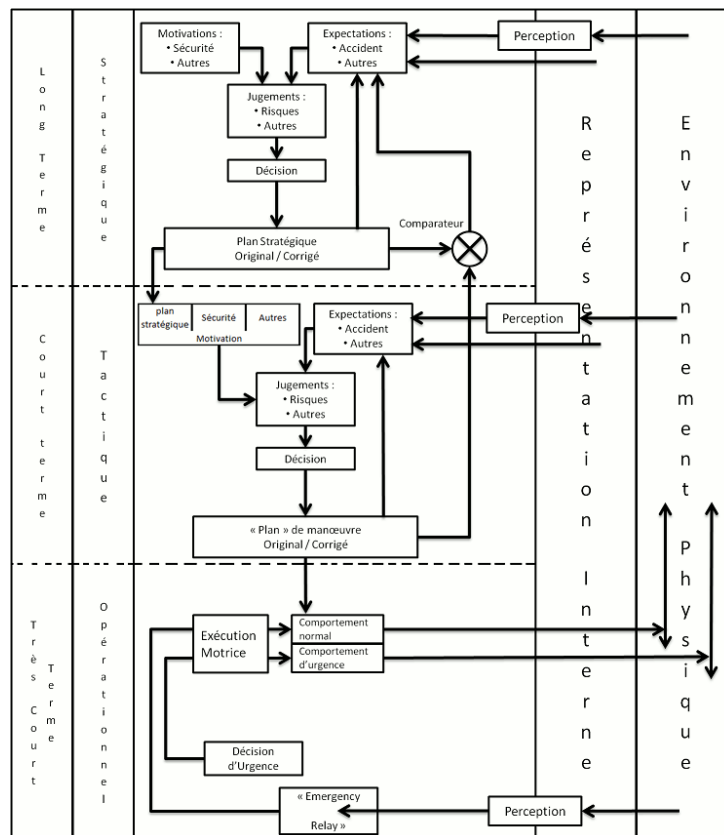


FIGURE 10 – Modèle Hiérarchie du risque ([Van Der Molen and Bötticher, 1988])

Il convient aussi de souligner l’emboîtement de ces trois niveaux hiérarchiques : les décisions prises au niveau stratégique deviendront des motivations au niveau tactique, qui les prendra en compte pour proposer des décisions tactiques envoyées au niveau opérationnel, qui lui-même les mettra en œuvre sous la forme d’actes moteurs. Ce modèle intègre aussi une fonction de perception permettant la collecte d’informations dans l’environnement. Cette fonction de perception informe en parallèle les trois niveaux d’activité. Par exemple, les informations relatives au suivi de l’itinéraire (signalisation, déviation, etc.) seront directement intégrées au niveau stratégique. Au niveau tactique, la perception permet l’analyse de la situation routière (infrastructure et événements) afin de prendre des décisions d’action. Au niveau opérationnel, la perception alimente le processus de régulation et de contrôle du véhicule, ainsi que la détection et la gestion des événements critiques.

Enfin, Van der Molen et Bötticher rapprochent leurs travaux avec ceux de [Rasmussen, 1986], concernant le contrôle de l’activité. Cependant, les niveaux hiérarchiques de Van der Molen et Bötticher et les « levels » de Rasmussen ne se superposent pas toujours, notamment en fonction de l’expérience de conduite. Ainsi, par exemple, le changement de vitesse qui relève du niveau opérationnel, reposera sur des *habiletés* chez un conducteur expérimenté, mais sur des *règles* pour un novice et sur des *connaissances* pour conducteur débutant. Le tableau 1 permet de comparer les niveaux identifiés d’une part par [Michon, 1979] et d’autre part par [Rasmussen, 1986] :

	Niveau Stratégique	Niveau Tactique	Niveau Opérationnel
Knowledge Level	Naviguer en site inconnu	Carrefour atypique & complexe	Conducteur novice
Rule Level	Choix entre routes familières	Dépassement de véhicule	Usage véhicule non familier
Skill Level	Usage itinéraire quotidien	Négociation intersect. familière	contrôle de la trajectoire

TABLEAU 1 – Comparaison des niveaux identifiés par [Michon, 1979] et [Rasmussen, 1986]

Ce modèle est intéressant pour notre démarche de modélisation cognitive, car il apporte une description assez précise de la façon dont s’imbriquent mutuellement les différents niveaux d’analyse, de raisonnement et de contrôle de l’activité de conduite, ce que nous chercherons aussi à appréhender dans notre modèle cognitif.

2.4 Les modèles de simulation informatique du conducteur

Les années 90 sont marquées par l’apparition des premiers modèles de simulation informatique de la conduite et/ou du conducteur automobile. Deux grandes catégories de modèles méritent néanmoins d’être distinguées dans ce contexte : les modèles de simulation de performance, aux visées essentiellement prédictives, et les modèles de simulation cognitive, fortement inspirés par la théorie du traitement de l’information, aux visées plus explicatives.

Les modèles de performance visent à simuler le conducteur selon une approche « boîte noire » permettant de générer en sortie des performances de conduite similaires à celles de conducteurs

humains (e.g. [Levison, 1993], [Jürgensohn, 2007]). Fréquemment issus de la théorie du contrôle, ils modélisent le conducteur comme une fonction de calcul (sous la forme d'équations différentielles, le plus souvent, ou de règles d'inférences statistiques) et ne prennent pas en considération les processus cognitifs humains. Cela en fait des modèles purement prédictifs des comportements, dont les objectifs sont assez éloignés de notre démarche de modélisation.

Les modèles de simulation cognitive, généralement inspirés par les théories du traitement de l'information, visent pour leur part à simuler les processus et les états internes du système cognitif humain à l'origine des comportements du conducteur. Ils décrivent le conducteur comme un système naturel de traitement de l'information, et ils s'appuient sur des architectures cognitives complexes. Compte tenu de leur proximité avec notre propre problématique, nous allons décrire de façon plus détaillée trois de ces modèles, chacun reposant sur une architecture cognitive particulière (SOAR⁴, ACT-R⁵ ou QN-MHP⁶).

2.4.1 Le modèle DRIVER (basé sur SOAR)

Le modèle DRIVER, développé par [Wierda et al., 1992], vise à modéliser les mécanismes de prise et de traitement de l'information visuelle par le conducteur, ainsi que les stratégies d'exploration perceptive d'une scène routière. Ce modèle, dont les premiers travaux remontent au début des années 90 ([Aasman and Michon, 1991], [Aasman and Michon, 1992]) se base sur l'architecture cognitive SOAR et propose une modélisation computationnelle de la perception humaine issue de la théorie de [Marr et al., 1982]. Il vise notamment à simuler les processus d'identification et de reconnaissance des objets présents dans une scène visuelle, afin de construire un modèle mental du monde environnant et de conduire des raisonnements.

D'une façon synthétique, l'architecture SOAR repose sur la génération d'un espace d'hypothèses associées au problème à traiter, et utilisant des stratégies d'exploration des possibles et de résolution du problème. SOAR dispose d'une MDT⁷ chargée de contenir des buts, des espaces-problèmes, des états et des opérateurs permettant de procéder à des transformations d'états. L'ensemble est codé sous la forme d'un réseau sémantique. La combinaison de ces différents éléments (buts, états, etc.) constitue le contexte et celui de départ correspond à l'état initial du problème. Au fur et à mesure de la résolution, le système génère de nouveaux contextes (contextes courants) intégrant les sous-buts, les opérateurs et l'espace problème associé à l'état courant de résolution.

Un aspect du modèle DRIVER a particulièrement retenu notre attention et nous servira de source d'inspiration : pour la perception par l'oeil, l'information n'est pas traitée de la même façon selon qu'elle est perçue en zone fovéale ou en zone périphérique. Le modèle s'appuie à ce niveau sur l'approche computationnelle de [Marr et al., 1982] concernant le traitement des informations perçues. Selon cette théorie, une « primal sketch » (esquisse fondamentale) est tout d'abord générée, suivie par l'élaboration d'une esquisse en deux dimensions et demie, elle-même utilisée pour construire un modèle en trois dimensions. Dans ce modèle en trois dimensions, l'identification et la reconnaissance des objets reposent sur un processus d'appariement entre ce modèle en trois dimensions et des connaissances visuo-spatiales stockées en mémoire sous la forme

⁴State, Operator And Result

⁵Adaptive Control of Thought-Rational

⁶Queueing Network-Model Human Processor

⁷Mémoire De Travail

de prototypes (bien que selon Marr, les associations de prototypes puissent aussi être initiées au moment de la génération du modèle en deux dimensions et demie). Ces prototypes conceptuels stockés en mémoire à long terme, sont des représentations symboliques des objets visuels et sont utilisés par DRIVER-SOAR pour générer son modèle mental du monde. La création de ce modèle mental fait appel à des connaissances stockées sous la forme d'une hiérarchie de *frames* que l'on peut définir comme des prototypes d'infrastructure. Ces prototypes sont sélectionnés en fonction de l'appariement fait en amont, et peuvent être sujets à erreurs, ce qui générera un modèle mental erroné.

Les auteurs précisent qu'une fois instanciés aux caractéristiques de la situation courante, ces frames d'infrastructure constituent des prototypes de situation. Ces prototypes de situation pourront varier selon l'expérience du conducteur. Selon [Wierda et al., 1992], les prototypes de situation des conducteurs expérimentés offriraient une plus grande précision dans la localisation spatiale des objets (notamment des objets dynamiques tels que les autres usagers), ce qui leur permettrait de détecter plus rapidement les situations anormales. C'est à partir de ce modèle mental, élaboré en mémoire de travail, que DRIVER construit ses raisonnements, prend des décisions, prélève l'information, et enclenche des actions en vue d'interagir avec l'environnement de conduite.

Bien que reposant sur des techniques de modélisation informatique très différentes, nous verrons que le modèle COSMODRIVE s'est fortement inspiré de ces travaux pour la modélisation de certaines fonctions cognitives tactiques. Ils constitueront également l'un des cadres de référence que nous utiliserons pour concevoir notre module de perception de l'environnement.

2.4.2 Le modèle IDM (basé sur ACT-R)

Le modèle computationnel IDM (figure 11), pour Integrated Driver Model, a été développé par Salvucci ([Salvucci et al., 2001], [Salvucci, 2006]) dans le but de proposer un modèle informatique de simulation du conducteur « intégré », articulé autour de trois composants principaux (inspirés de la théorie de Michon⁸ à l'origine du modèle Hiérarchique du risque de [Van Der Molen and Bötticher, 1988]) :

- Une fonction de *Contrôle*, correspondant au niveau opérationnel, gère les aspects de perception du monde extérieur et prélève les variables perceptives nécessaires pour permettre le contrôle de véhicule (usage du volant, de l'accélérateur et du frein).
- Une fonction de *Monitoring* (supervision), relevant du niveau tactique, permet de maintenir à jour la « conscience de la situation courante » (i.e. modèle interne du modèle) en intégrant périodiquement les informations prélevées dans l'environnement.
- Une fonction de *Prise de Décision*, relevant elle-aussi du niveau tactique, prend en charge les décisions tactiques pour l'engagement de manœuvres de conduite (comme changer de voie) en fonction de la connaissance du modèle concernant l'état de l'environnement actuel.

⁸The control component, analogous to Michon's (1985) operational level, manages all aspects of perception of the external world and mapping of specific perceptual variables to manipulation of vehicle controls (i.e., steering, acceleration, braking). The monitoring component, part of Michon's (1985) tactical level, maintains awareness of the current situation by periodically perceiving and encoding the surrounding environment. The decision making component, also part of Michon's (1985) tactical level, handles tactical decisions for individual maneuvers (e.g., lane changes) based on knowledge of the current environment.

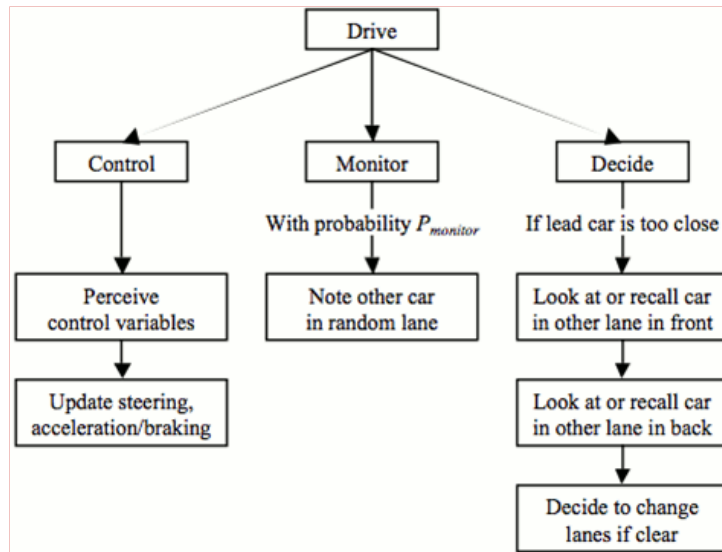


FIGURE 11 – Le modèle du conducteur IDM (extrait de [Salvucci et al., 2001])

Ces trois composants ont été implémentés dans l’architecture cognitive **ACT-R**⁹ afin de développer un modèle computationnel du conducteur, capable d’explorer visuellement l’environnement, de prendre des décisions et de générer des comportements de conduite (comme le suivi d’un véhicule ou le changement de voie sur autoroute). Pour ce faire, ce modèle utilise des connaissances propositionnelles (formalisme inhérent à **ACT-R**) pour se représenter la situation de conduite et prendre ses décisions, et il utilise deux points de repère, situés respectivement dans l’espace *proche* et dans l’environnement *lointain* afin de contrôler la position du véhicule sur sa voie de circulation.

Malgré les résultats de simulation intéressants obtenus par [Salvucci, 2006] (notamment en matière de simulation des effets de la distraction cognitive sur le contrôle latéral du véhicule), le modèle IDM présente néanmoins de très fortes limites pour simuler la cognition du conducteur, limites inhérentes aux caractéristiques de l’architecture **ACT-R** sur laquelle il repose. En recourant essentiellement aux règles de production, cette architecture cognitive engendre en effet, selon nous, des difficultés considérables lorsqu’il s’agit de bâtir et de manipuler des représentations mentales visuo-spatiales de l’environnement routier. Nous reviendrons sur ce point ultérieurement, car il constitue l’une des difficultés récurrentes à laquelle se heurtent la plupart des modèles de simulation informatique du conducteur disponibles dans la littérature, difficulté que l’approche conceptuelle **COSMODRIVE** a permis de résoudre, et que notre modèle informatique cherchera précisément à dépasser.

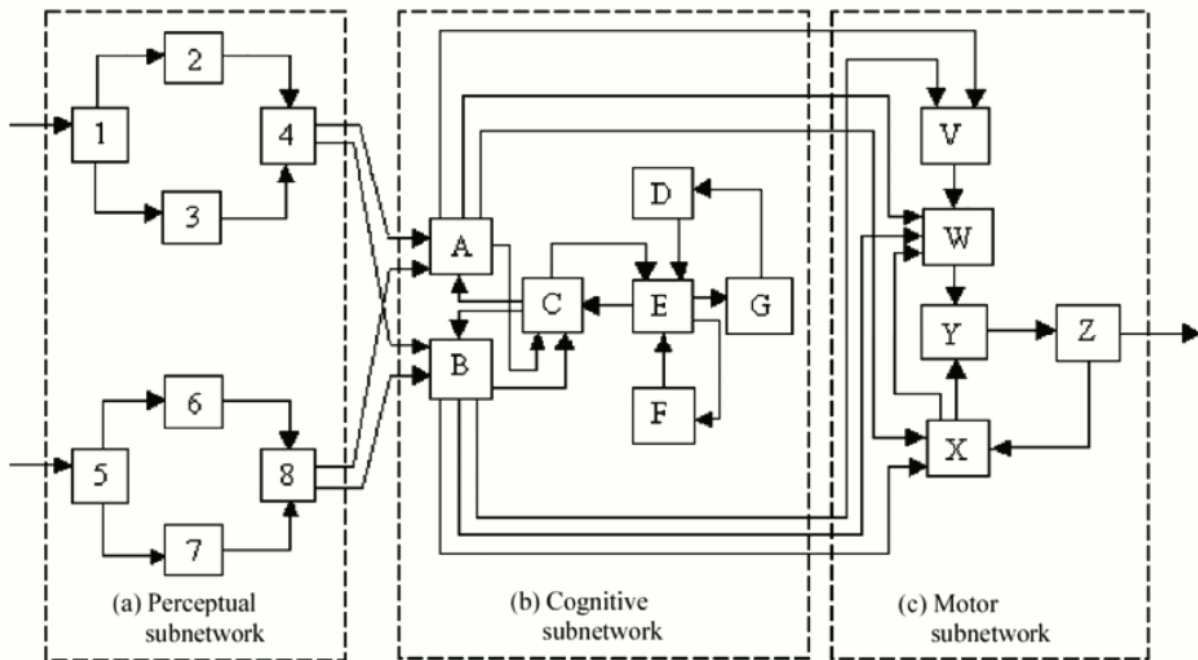
⁹L’architecture cognitive **ACT-R** a été initialement définie par [Anderson, 1983], sous une forme tout d’abord simplifiée qui s’est progressivement complexifiée afin de se présenter comme une théorie unifiée de la cognition humaine susceptible de s’appliquer à la modélisation cognitive dans de nombreux domaines différents. Synthétiquement ([Anderson et al., 1993], [Anderson and Lebiere, 1998]) **ACT-R** se base sur des connaissances déclaratives conceptuelles et des connaissances procédurales correspondant aux savoir-faire, qui sont utilisées en Mémoire de Travail pour faire des raisonnements et prendre des décisions. Dans les versions récentes, l’architecture **ACT-R** dispose de modules de perception visuelle et auditive lui permettant d’intégrer des informations en provenance de l’environnement, ainsi que des modules d’action motrice ou de production verbale, lui permettant d’interagir avec le monde extérieur.

2.4.3 Le modèle de Liu (basé sur QN-MHP)

Le modèle du conducteur automobile de [Tsimhoni and Liu, 2003] et [Liu et al., 2006], a pour sa part été développé dans l'objectif de prédire la performance de conducteurs en situation de multiples tâches, avec l'ambition de concevoir un outil de simulation pour l'ergonomie des interfaces Homme-Machine. Ce modèle permet ainsi de simuler le conducteur en situation de multi-activités, par exemple réaliser le contrôle latéral du véhicule en parallèle de la lecture d'une carte visuelle afin d'en extraire les informations. Ce modèle se base sur l'architecture cognitive QN-MHP. QN-MHP est une architecture computationnelle intégrant deux approches différentes de modélisation cognitive : l'approche *file d'attente* et l'*approche symbolique*. La première permet facilement de modéliser les activités parallèles et les structures complexes, alors que l'approche symbolique offre une force pour la modélisation de la tâche d'un opérateur dans une situation particulière. Partant de cette architecture, le modèle de Tsimhoni et Liu intègre à la fois la démarche de modélisation de la connaissance et de l'action (comme ACT-R ou SOAR) mais peut aussi s'appuyer sur l'approche mathématique utilisée dans la théorie des files d'attente. Cette approche mathématique modifie l'approche des modèles MHP en ajoutant des serveurs de files d'attente transformant les trois niveaux discrets de MHP en niveaux continus. Tout en reprenant les paramètres du modèle initial pour paramétrer les serveurs, ils permettent d'effectuer les processus modélisés [Liu et al., 2006]. La figure 12 présente l'architecture du modèle QN-MHP, séparé en trois structures composées de modules effectuant des processus comparables à ceux de l'humain.

Sous-réseau perceptif : Ce sous-réseau est composé de huit serveurs représentant les fonctions visuelle et auditive. Quatre de ces serveurs sont dédiés au système visuel : (1) le traitement visuel général, (2) l'identification visuelle, (3) la localisation visuelle et (4) l'intégration visuelle.

1. Le traitement visuel général (serveur 1 dans la figure 12) représente l'oeil jusqu'aux aires cérébrales visuelles primaires. Le champ visuel est séparé en trois parties : la fovéa, la para-fovéa et la vision périphérique. Chaque champ visuel traite l'information de manière différente, et une comparaison avec les informations passées est faite. Si une différence significative est détectée, l'information est envoyée à un système de traitement parallèle composé de la reconnaissance de l'objet vu et de sa localisation spatiale.
2. L'identification visuelle, pour la reconnaissance d'objets, fonctionne sur les caractéristiques de l'objet (comme la couleur, la taille, etc.), et reste en cours de développement selon les travaux de Biederman [Biederman, 1987].
3. La localisation spatiale se fait dans le champ visuel, grâce aux caractéristiques intrinsèques de l'objet. Le positionnement de l'objet pertinent se fait dans le champ visuel global, permettant de lui associer des caractéristiques de mouvements.
4. L'intégration visuelle se fait en regroupant les caractéristiques des deux systèmes précédents (serveur 2 et 3 dans la figure 12) puis en les transmettant au sous-réseau cognitif avec un temps relatif au temps de disparition de l'information visuelle, basé sur le temps de demie-vie et le temps de désintégration ($\lambda = \ln(2)/t_{1/2}$).



(a) Perceptual: 1 = common visual processing; 2 = visual recognition; 3 = visual location; 4 = location and recognition integrator; 5 = sound localization; 6 = linguistic processing; 7 = processing of other sounds; 8 = linguistic and other sounds integrator. (b) Cognitive: A = visuospatial sketchpad; B = phonological loop; C = central executor; D = goal procedures; E = performance monitoring; F = high-level cognitive operations; G = goal selection. (c) Motor: V = sensorimotor integration; W = motor element storage; X = movement tuning; Y = motor programming; Z=actuators.
Note: Although not shown in this figure, environmental and device servers receive output customers from server Z and supply input customers to server 1 and server 5.

FIGURE 12 – QN-MHP tiré de [Feyen and Liu, 2001] et [Liu et al., 2006]

Sous-réseau cognitif : Il inclut une MDT et un système d'exécution de buts. La MDT est basée sur les travaux de Baddeley [Baddeley, 1992], elle contient un tableau noir visuo spatial, une boucle phonologique et un centre d'exécution. De plus, ce réseau contient un système d'exécution de buts, un serveur dédié aux opérations cognitives de haut niveau, un sélecteur d'objectifs et un serveur dédié à la surveillance des performances.

Sous-réseau moteur : Toutes les réponses motrices que peut produire le modèle proviennent de la MDT pour contenir des informations perceptives nécessaires à leur bon déroulement. Ce sous-réseau contient quatre serveurs et deux actionneurs.

2.4.4 Apports et limites de ces modèles de simulation informatique du conducteur

Les trois modèles computationnels de simulation informatique du conducteur que nous venons de décrire sont basés sur des architectures cognitives différentes (SOAR, ACT-R ou QN-MHP) et apportent tous des approches intéressantes pour modéliser la cognition humaine. L'approche de la perception du conducteur proposée par le modèle DRIVER-SOAR ou modélisée dans le modèle IDM à travers les buffers sensoriels d'ACT-R nous semble particulièrement intéressante. De même, la possibilité de réaliser des traitements en parallèle grâce à l'approche « serveurs »

de **QN-MHP** nous paraît constituer une approche intéressante pour modéliser certains processus cognitifs. Ces modèles disposent aussi de fonctions sensori-motrices plus ou moins élaborées, mais leur permettant d’interagir dynamiquement avec l’environnement routier, ce qui sera également l’un de nos objectifs. Enfin, ces modèles reposent tous sur l’idée que le conducteur élabore un modèle mental de l’environnement dans sa Mémoire de Travail (structure de stockage temporaire des informations) et qu’il utilise cette représentation mentale pour prendre des décisions. L’ensemble de ces points guidera le développement de notre propre modèle de simulation informatique du conducteur.

En revanche, une limite centrale de ces trois modèles réside dans l’approche propositionnelle et symbolique (base de règles) utilisée pour représenter les connaissances du conducteur ou pour simuler sa représentation mentale de l’environnement routier. Cette caractéristique générale est liée aux formalismes de représentation des connaissances utilisés dans les différentes architectures cognitives sur lesquelles ils s’appuient. Que ce soit **SOAR**, **ACT-R** ou **QN-MHP**, ces architectures reposent toutes sur des règles de production ou des formalismes de représentations symboliques du monde et des objets qui s’y trouvent.

Or, la conduite automobile est avant tout une activité de déplacement dynamique dans un environnement tridimensionnel. Pour réaliser efficacement cette tâche, le conducteur humain doit utiliser des représentations mentales visuo-spatiales ([Kosslyn and Koenig, 1995], [Baddeley, 1992], [Bellet et al., 2009]) lui permettant à la fois de comprendre la situation et de se projeter mentalement dans le temps, par anticipation, pour prendre des décisions et planifier des actions qui lui permettront d’évoluer dans ce monde. C’est un point qui nous paraît essentiel pour la modélisation et la simulation informatique de la cognition du conducteur automobile. C’est précisément dans cet objectif qu’a été conçu le modèle **COSMODRIVE**, centré dès son origine sur l’élaboration et l’utilisation de représentations mentales visuo-spatiales.

2.5 Modélisation et simulation cognitive du conducteur : le modèle **COSMODRIVE**

Dans cette partie nous allons décrire synthétiquement le modèle théorique **COSMODRIVE**. Nous décrirons tout d’abord l’architecture cognitive sur laquelle il repose, puis nous présenterons les principales fonctions cognitives de ce modèle ayant déjà fait l’objet d’une modélisation conceptuelle. Enfin, nous réaliserons un bilan concernant l’existant et les manques de cette modélisation cognitive du point de vue de nos objectifs de simulation numérique de la cognition du conducteur automobile.

2.5.1 Architecture cognitive de **COSMODRIVE**

A un niveau très général (figure 13), l’architecture cognitive de **COSMODRIVE** repose sur deux types de structures mnésiques différentes : la **MLT**¹⁰, permettant de stocker des connaissances permanentes, et la **MDT** permettant le traitement et le maintien temporaire des informations pertinentes pour l’activité en cours. Ces deux types de « mémoires » se retrouvent dans de nombreux travaux de sciences cognitives, des premiers modèles issus de la théorie de traitement de l’information comme celui de [Atkinson and Shiffrin, 1971], jusqu’aux architectures cognitives

¹⁰Mémoire à Long Terme

2.5. Modélisation et simulation cognitive du conducteur : le modèle COSMODRIVE

contemporaines comme ACT-R ou SOAR, en passant par le modèle classique de la MDT défini par [Baddeley, 1990] ou par celui des activités mentales proposé par [Richard, 1990].

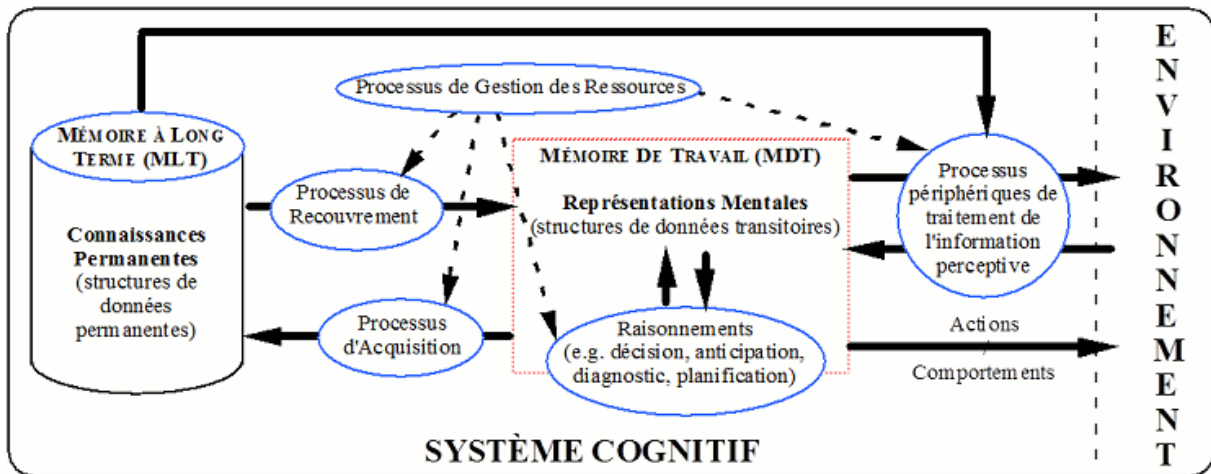


FIGURE 13 – Architecture cognitive simplifiée (tiré de [Bellet, 1998])

D'une façon synthétique, la MLT « contient l'ensemble des souvenirs, savoir et savoir-faire acquis par le sujet au cours de son existence. Bien qu'il puisse s'agir d'informations de natures très différentes (connaissances théoriques, savoirs pratiques, croyances, représentations permanentes diverses) nous utiliserons comme [Richard, 1990] le terme générique de Connaissances Permanentes pour qualifier ces structures de données stockées en MLT. En outre, l'organisation des connaissances en MLT n'est pas le fruit du hasard. Elle procède, d'une part, de l'expérience empirique et, d'autre part, des mécanismes impliqués dans leur acquisition comme dans leur recouvrement. » ([Bellet, 1998], p. 85).

La seconde structure mnésique, la MDT, est au centre de l'architecture cognitive de COSMODRIVE. Le concept de Mémoire de Travail utilisé dans ce modèle se réfère, d'une part, aux travaux de Baddeley ([Baddeley, 1990]), mais il s'inspire aussi largement des travaux de Bisseret ([Bisseret, 1970], [Bisseret, 1995]) portant sur la *mémoire opérationnelle*. Cette MDT contient les représentations mentales de la situation routière. Ces représentations sont *occurrentes*, c'est-à-dire que ce sont « des constructions circonstancielle faites dans un contexte particulier et à des fins spécifiques » ([Richard, 1990], p.10). Ce sont des modèles mentaux élaborés par le conducteur et correspondant à son interprétation de la situation dans laquelle il évolue, en fonction de ce qu'il en a perçu et des objectifs qu'il poursuit à cet instant.

Une fois élaborées en MDT, ces représentations vont permettre au conducteur d'interagir avec son environnement et de raisonner sur la situation au moyen de différents processus cognitifs. Dans l'approche COSMODRIVE, ces processus cognitifs concernent notamment, outre l'élaboration de représentations mentales, l'activation de connaissances de conduite stockées en MLT, l'anticipation, la prise de décision, et la planification d'actions. Les informations perceptives sont intégrées dans la MDT par le biais de processus périphériques de traitement de l'information perceptive, et les actions du conducteur constituent les sorties du modèle cognitif lui permettant d'interagir avec l'environnement. Enfin, la limite de capacité de traitement du système cognitif est le résultat d'un processus de gestion des ressources cognitives qui alloue les ressources attentionnelles en fonction des besoins des différents processus cognitifs actifs à un moment donné.

Pour mieux comprendre le fonctionnement de cette architecture cognitive, il est nécessaire de se situer dans le cadre de la boucle de régulation dynamique de l'activité de conduite automobile.

2.5.2 Régulation dynamique de la conduite

La boucle de régulation dynamique décrite dans la figure 14 s'inspire des modèles issus de la *théorie du contrôle* que nous avons présentés en 2.2, mais s'applique ici à la cognition du conducteur. Elle constitue un cadre conceptuel dans lequel s'inscrit depuis l'origine le modèle **COSMODRIVE**, approche théorique que notre travail de thèse doit précisément permettre de concrétiser informatiquement et de réaliser de façon effective au moyen de la simulation numérique du conducteur.

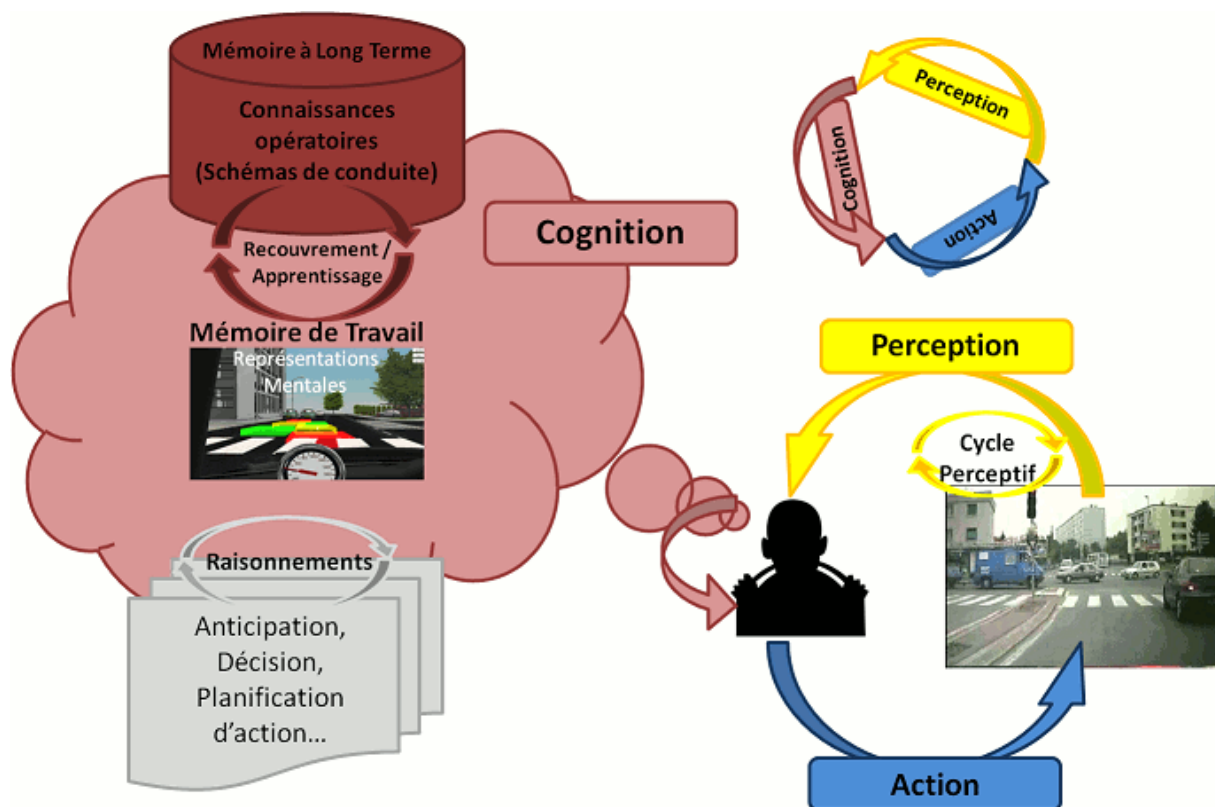


FIGURE 14 – La boucle de régulation dynamique dans l'approche **COSMODRIVE** [Bellet et al., 2010b]

Cette description schématique du modèle **COSMODRIVE** en interaction dynamique avec l'environnement routier distingue (1) des fonctions perceptives, (2) des fonctions cognitives et (3) des fonctions d'exécution d'actions de conduite.

- Les fonctions perceptives de **COSMODRIVE** doivent permettre au modèle de percevoir l'environnement routier et d'élaborer la représentation mentale de la situation. Cela nécessite de disposer d'un processus d'intégration de l'information perceptive (processus bottom-up). Mais, comme nous l'avons souligné dans le chapitre 1, la prise d'information par le conducteur est aussi un processus actif d'exploration perceptive, orienté par les connaissances du conducteur et par sa représentation mentale de la situation. Ces deux processus forment

2.5. Modélisation et simulation cognitive du conducteur : le modèle COSMODRIVE

ainsi un cycle que nous chercherons à modéliser et à implémenter informatiquement durant cette thèse.

- Les fonctions cognitives de **COSMODRIVE** doivent permettre au modèle de se représenter la situation de conduite afin de prendre des décisions et de planifier des actions. Ces fonctions ont déjà fait l'objet d'une modélisation cognitive assez poussée dans le projet **COSMODRIVE**, modélisation dont s'inspirera du reste notre propre modèle, mais avec l'objectif cette fois-ci de les implémenter et de les simuler informatiquement.
- Les fonctions d'exécution visent à mettre en œuvre les actions de conduite planifiées cognitivement afin de faire progresser le véhicule dans l'environnement. Cela suppose d'agir sur les commandes du véhicule et de réguler en continu l'activité de conduite pour contrôler la position latérale et longitudinale de la voiture sur la chaussée, et adapter en permanence la trajectoire en fonction des risques de collision avec les objets et/ou les autres usagers présents sur la route. Notre modèle implémentera une large partie de ces fonctions d'exécution.

2.5.3 Description modulaire

Au-delà de l'architecture cognitive sur laquelle s'appuie **COSMODRIVE**, ce modèle s'inscrit aussi dans la continuité des travaux de [Van Der Molen and Bötticher, 1988], et distingue de ce fait différents niveaux dans l'activité de conduite, modélisés sous la forme de *Modules*. Chaque module est spécialisé dans la réalisation d'une partie de l'activité de conduite (et possède ses propres processus cognitifs et ses propres connaissances), et c'est de leur coopération qu'émerge la performance de conduite globale. Tous les modules de **COSMODRIVE** ne seront pas présentés ici, car cette description vise avant tout à mettre en lumière les modules ayant fait l'objet de développements informatiques (présentés dans les chapitres 3 et 4). A cet égard, nous indiquerons ici pour chaque module l'état de l'existant et les objectifs de développement que nous viserons dans cette thèse.

2.5.3.1 Le module Stratégique

Ce module est responsable de la planification de l'itinéraire et de la tâche de navigation. Il doit gérer les contraintes globales telles que le temps de trajet et les objectifs généraux comme le déplacement d'un point A à un point B en passant par C. L'itinéraire ainsi généré en début de trajet peut être sujet à modifications en cours de parcours. Ces modifications durant le trajet et le réaménagement de l'itinéraire initial sont aussi sous la responsabilité du module stratégique. Ce module fait parvenir ensuite les différents buts à atteindre au module tactique.

Ce module n'a fait l'objet d'aucun développement dans le cadre du projet **COSMODRIVE**. L'un des objectifs de la thèse sera donc d'en réaliser une implémentation informatique minimale. L'ambition ne sera pas de modéliser fidèlement la cognition humaine à ce niveau, mais plus modestement de rendre autonome notre modèle pour la réalisation complète d'un itinéraire défini de façon préalable. Ce seront donc avant tout les fonctions cognitives de navigation que nous chercherons à simuler informatiquement, et non celles de planification d'itinéraires.

2.5.3.2 Le module Tactique

Le module tactique est, en termes imagés, une forge à représentations mentales. Il gère principalement les prises de décision comme le fait d’engager un dépassement ou comme définir les modalités de franchissement d’un tourne-à-gauche. Il est aussi chargé de la catégorisation et de la reconnaissance de l’environnement routier, ce qui permet la récupération de connaissances stockées en *MLT* adaptées au contexte de la situation courante. Ce module est doté de processus d’anticipation capables de dériver une représentation courante en un ensemble de représentations futures potentielles, permettant ainsi de déterminer quelles actions peuvent être engagées ou quels comportements adopter pour maintenir par exemple la sûreté du contexte. Une fois les actions à mettre en œuvre sélectionnées, elles sont communiquées au module opérationnel.

C’est principalement sur ce module que se sont focalisés les efforts de modélisation dans le projet *COSMODRIVE*. A ce niveau, notre travail consistera donc à s’inspirer du modèle cognitif existant pour en réaliser une implémentation informatique sur une plateforme virtuelle, à des fins de simulation numérique de la cognition du conducteur.

2.5.3.3 Le module de Perception

Le module perception est le lien entre le modèle et l’environnement routier. Il est responsable du traitement des informations sensorielles avant leur intégration dans les différentes représentations internes du modèle.

Une première approche des fonctions de perception visuelle de *COSMODRIVE* a été réalisée par [Mayenobe, 2004] dans l’objectif de concevoir des systèmes d’assistance à la conduite avancés. Toutefois, à ce niveau, notre travail de thèse devra proposer une modélisation cognitive complète des fonctions perceptives, puis concevoir et développer un module informatique capable de simuler ces fonctions perceptives, en interaction dynamique avec, d’un côté, les autres modules de *COSMODRIVE* et, de l’autre côté, l’environnement routier extérieur. Nous nous focaliserons durant cette thèse sur les processus de traitement et d’intégration de l’information visuelle dans *COSMODRIVE*, mais avec le souci de pouvoir appréhender ultérieurement d’autres fonctions perceptives.

2.5.3.4 Les modules Opérationnel et Exécution

Ces deux modules interagissent mutuellement pour permettre la réalisation effective de l’activité de conduite. Le module opérationnel se focalise sur la planification fine de l’activité, à partir de *schémas de conduite* provenant du module tactique. Il permet de décomposer les schémas en une suite d’actions élémentaires exécutables par le module d’exécution. Par exemple, si le schéma à réaliser est « dépasser un véhicule », le module opérationnel va décomposer cette action en « accélérer », « actionner le clignotant gauche », « contrôler la position latérale du véhicule pour le translater sur la voie de gauche », « accélérer jusqu’à X km/h », etc. De plus, ce module est aussi en charge de réguler en continu le contrôle latéral et longitudinal du véhicule ainsi que de générer les interdistances véhiculaires et de détecter des situations critiques pour pouvoir activer une réaction d’urgence si nécessaire. Le module d’exécution s’inscrit dans le prolongement direct du module opérationnel. Il est l’effecteur des actions définies en amont et c’est lui qui va permettre le contrôle des commandes du véhicule pour qu’il évolue dans l’environnement.

2.5. Modélisation et simulation cognitive du conducteur : le modèle COSMODRIVE

Dans le cadre de sa thèse, [Mayenobe, 2004] a réalisé un premier démonstrateur informatique intégré d'un module d'action utilisant les formalismes de représentation des connaissances de COSMODRIVE (les *schémas de conduite* et les *zones enveloppes*, que nous présenterons dans la section suivante) pour piloter un véhicule. Ces travaux constitueront le socle sur lequel s'appuiera le module d'exécution de COSMODRIVE que nous développerons dans le cadre de cette thèse, afin de faire progresser dynamiquement notre modèle dans un environnement routier virtuel.

2.5.4 Modélisation des représentations mentales et des connaissances de conduite

Nous avons décrit les principaux modules de COSMODRIVE, mais ces modules construisent et manipulent des représentations et des connaissances qu'il est nécessaire d'explicitier. Nous allons donc présenter de façon plus précise les concepts de *représentations mentales*, de *schémas de conduite* et de *zones enveloppes* essentiels au fonctionnement du modèle.

2.5.4.1 Les représentations mentales : de la « conscience de la situation » à la prise de décision

Comme le souligne [Richard, 1990] (p. 11) : « *Comprendre une situation, c'est se la représenter* ». Les représentations mentales du conducteur ne sont pas des copies exactes de la réalité, elles constituent ([Bellet, 1998], p.85) « *une interprétation (modèle interne) de la situation courante. Elles sont finalisées, c'est-à-dire qu'elles s'inscrivent dans la poursuite d'un objectif particulier et prennent en compte les exigences ponctuelles ou générales de la tâche. C'est par l'entremise de ces représentations mentales fonctionnelles que l'humain interagit dynamiquement avec son environnement, et qu'il s'y adapte. Elles vont intervenir dans le traitement de l'information, comme dans la régulation des comportements du sujet* ». A la façon des « images opératives » de [Ochanine, 1977], elles intègrent des déformations fonctionnelles augmentant l'importance de certaines informations pour la conduite (l'état de la voie sur laquelle je me déplace, par exemple) et minimisant des détails secondaires pour cette activité (l'état des trottoirs, par exemple). Elles ne contiennent donc qu'une partie de l'information de l'environnement, en privilégiant les informations utiles pour l'activité en cours et l'atteinte des buts visés par le conducteur à cet instant. Mais ces représentations peuvent aussi contenir des informations non présentes dans l'environnement à l'instant t, comme des feux perçus de loin mais masqués depuis par la végétation, ou comme l'enfant susceptible d'apparaître derrière le ballon qui vient de surgir devant notre véhicule.

Ainsi définies, les représentations mentales correspondent à la « conscience de la situation » du conducteur ([Endsley, 1995], [Bailly, 2004], [Bellet et al., 2009]), et le contenu de ce modèle mental sera fonction de ce qu'il a perçu, intégré et compris de son environnement. A ce titre, elles jouent un rôle central dans le fonctionnement de COSMODRIVE. « *En tant que modèles mentaux dynamiques de la situation courante, les représentations vont servir de guide à la réalisation de l'activité de conduite, en interaction directe avec l'environnement. Elles jouent un rôle central dans le processus de traitement de l'information, qui s'inscrit lui-même dans une boucle de contrôle de l'activité : les représentations pilotent activement les stratégies d'exploration perceptive de l'environnement, tout autant qu'elles guident l'activité comportementale, à des fins d'adaptation contextuelle et de régulation dynamique, en continu, de la conduite* » [Bellet et al., 2009].

Par ailleurs, l'activité de conduite ne se limite pas à réagir face aux événements. La pression temporelle oblige à anticiper en permanence des situations critiques ou à estimer les risques potentiels associés à une action avant de l'engager. Ce processus d'anticipation repose, dans le modèle COSMODRIVE, sur un processus de *déploiement cognitif* [Bellet et al., 2009] permettant de créer des *représentations mentales anticipées* à partir de la représentation courante. Ce processus de simulation mentale permet au modèle (comme au conducteur) de se projeter mentalement dans l'avenir et d'anticiper des évolutions futures possibles de la situation de conduite. Il joue par conséquent un rôle essentiel dans la prise de décision, car il permet d'estimer les conséquences potentielles de différents comportements de conduite susceptibles d'être enclenchés à un moment donné, et de choisir celui dont les effets seront jugés les plus bénéfiques (selon un principe d'homéostasie inspiré de [Wilde, 1982b]).

Enfin, ces représentations mentales sont construites en MDT à partir des informations perçues dans l'environnement routier, mais aussi à partir de connaissances stockées en MLT. Dans le modèle COSMODRIVE, ces connaissances portent tout d'abord sur l'environnement routier : ce sont les *schémas de conduite* qui permettent au conducteur de structurer l'espace et de se construire une représentation de situation, une fois que les schémas activés en MDT auront été instanciés au réel [Bellet and Tattegrain-Veste, 2003]. Mais d'autres connaissances, modélisées sous la forme de *zones enveloppes*, jouent aussi un rôle essentiel dans la planification de l'action et dans la gestion des interactions avec les autres usagers.

2.5.4.2 Modélisation des connaissances sur l'environnement routier : les « schémas de conduite »

L'origine du concept de « schéma » en psychologie cognitive vient des travaux de [Bartlett, 1932]. Pour cet auteur, un schéma correspond à une structure organisée qui intègre nos connaissances et nos attentes relatives à un aspect quelconque du monde. En d'autres termes, il s'agit d'un modèle qui synthétise, en fonction de l'expérience du sujet, certaines caractéristiques de l'environnement. De ce fait, les schémas facilitent la compréhension du réel, mais peuvent aussi occasionner des déformations de ce réel. La théorie de schémas sera utilisée par [Minsky, 1975], [Minsky, 1988] en intelligence artificielle pour permettre à des robots de se déplacer dans un environnement tridimensionnel. En s'inspirant des *schèmes* de [Piaget and Inhelder, 1975], Minsky définira le formalisme de *frame*, permettant de représenter des prototypes d'objets, de situations ou d'environnements. D'autres auteurs insisteront aussi sur la dimension temporelle de ces structures mentales, comme les *scripts* et les *scénarii* de [Schank and Abelson, 1977], permettant de décrire une suite temporelle stéréotypique d'événements, ou d'actions.

Inspirés de ces théories, les *schémas de conduite* de COSMODRIVE constituent tout d'abord « un modèle fonctionnel de l'environnement routier » [Bellet, 1998] que va utiliser le conducteur pour découper mentalement l'espace qui l'entoure en différentes zones : des *zones de déplacement* permettant de faire évoluer le véhicule sur une trajectoire, et des *zones d'exploration perceptive* permettant de prélever des informations utiles pour piloter le véhicule. La figure 15 nous présente un exemple de schéma de conduite correspondant à une situation de Tourne-à-Gauche dans un carrefour à feux [Bellet et al., 2007]. Ce schéma se caractérise tout d'abord par un *but tactique* à atteindre dans cette infrastructure : « Tourner à Gauche ». Ce but correspond à « l'état final » du schéma (en fin de Z4) que devra rejoindre le conducteur à partir de « l'état initial » correspondant à la position du véhicule à l'entrée de l'infrastructure (début de Z1). Un « état » correspond à

une « *position* » et une « *vitesse* » du véhicule. Pour atteindre ce but tactique, le conducteur va devoir passer par différents « *états intermédiaires* » (e.g. : fin Z2) en empruntant des « *zones de déplacement* » (Zi). Les zones de déplacement correspondent aux zones d'évolution du véhicule, et elles définissent les différentes « *trajectoires* » que le véhicule peut suivre pour atteindre l'état final à partir de l'état initial du schéma. A chaque zone de déplacement sont associées des « *actions* » à mettre en œuvre pour progresser dans l'infrastructure. Ces actions dépendent de « *conditions* » que le conducteur va devoir vérifier en examinant des « *zones d'exploration perceptive* » (Exi) associées aux différentes zones de déplacement (en Z1, par exemple, il est nécessaire de regarder Ex1 pour connaître la couleur des feux. Si celle-ci est « rouge », alors la « *vitesse* » à atteindre en fin de Z1 sera de « 0 km/h »). Un schéma contient aussi des *points de décision*, notamment lorsque des trajectoires alternatives sont possibles. Dans la figure 15, un exemple de point de décision apparaît en fin de Z2, permettant soit d'emprunter la trajectoire de contournement soit la trajectoire d'évitement.

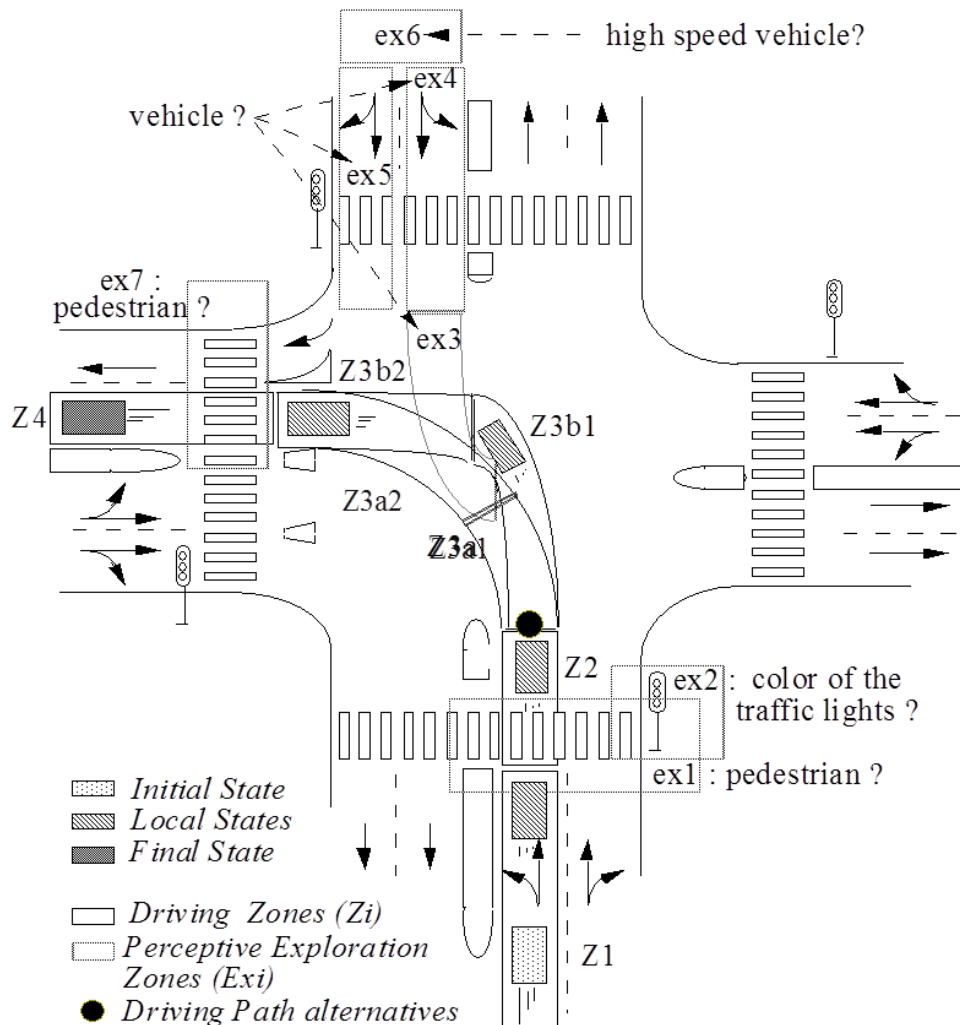


FIGURE 15 – Un schéma de conduite de Tourne-à-gauche dans un carrefour à feux (de [Bellet, 1998])

Une fois activés en MDT, les schémas de conduite sont appariés au réel (processus d’instanciation) afin de produire la *représentation tactique courante de la situation* qui servira alors de guide à COSMODRIVE pour progresser dans l’infrastructure routière [Bellet and Tattegrain-Veste, 2003]. Mais pour pouvoir évoluer dans l’environnement routier, il est aussi nécessaire de prendre en compte les éventuels obstacles situés sur sa trajectoire. Pour cela, COSMODRIVE utilise un second type de connaissances : les zones enveloppes.

2.5.4.3 Modélisation des connaissances d’interaction : les « zones enveloppes »

Pour se déplacer dans l’environnement, le conducteur n’a pas seulement besoin de se représenter mentalement l’infrastructure routière. Il doit aussi considérer les obstacles qui se trouvent sur sa trajectoire, qu’il s’agisse d’objets statiques situés dans les zones de déplacement, ou qu’il s’agisse d’objets dynamiques (les autres usagers de la route : véhicules, piétons, cyclistes) dont la trajectoire est susceptible de croiser celle de son véhicule. Pour réaliser ces analyses, COSMODRIVE utilise des connaissances opératoires fortement intégrées : les *Zones Enveloppes*.

Ce concept de zone enveloppe se réfère à trois origines théoriques qui s’intègrent mutuellement dans l’approche COSMODRIVE. La théorie des *marges de sécurité* de [Gibson and Crooks, 1938], la théorie des *schémas corporels* de [Schilder, 1950], et la théorie de la *proxémie* de [Hall, 1992].

En référence à la théorie des marges de sécurité [Gibson and Crooks, 1938], les zones enveloppes permettent tout d’abord de maintenir des distances de sécurité avec les autres usagers de la route (par exemple, distances de suivi de véhicule, distances à respecter lorsqu’on se rabat après un dépassement, distances d’interaction lorsqu’on croise la trajectoire d’un autre mobile, etc). A ce niveau, l’approche COSMODRIVE se réfère aux travaux de [Otha, 1993] qui distinguent trois zones : une « zone de danger » dans laquelle aucun objet ne devrait pénétrer, une « zone de menace » qui permettra de mettre le conducteur en alerte face à une menace imminente, et une « zone de sécurité » que le conducteur cherchera en général à préserver.

En référence à la théorie des « Schémas corporels » de [Schilder, 1950], définissant ces schémas comme « *l’image tridimensionnelle que chacun a de soi-même* » ([Schilder, 1968], p.35), les zones enveloppes peuvent être vues comme une « seconde peau » que projetterait le conducteur autour de son véhicule (ainsi considéré comme une extension de son propre corps), permettant ainsi à l’entité conducteur-véhicule de se déplacer dans l’espace sans heurter les obstacles situés sur sa trajectoire.

En référence aux travaux de [Hall, 1992] ayant montré que les distances d’interaction sociale entre les individus reposaient sur des « Bulles de proximité » propres à chaque culture (par exemple, les distances d’interaction homme-femme au Japon et en France sont très différentes), les zones enveloppes sont aussi utilisées par COSMODRIVE pour gérer socialement les interactions avec les autres usagers : on peut maintenir une distance de courtoisie avec le véhicule qui nous précède ou, au contraire, adopter délibérément une attitude plus agressive en s’approchant très près de lui, pour qu’il accélère ou qu’il nous laisse dépasser.

La figure 16 représente les différentes zones enveloppes de COSMODRIVE. Ces zones ont des dimensions relatives, car leur taille s’exprime en temps de collision entre le véhicule et l’obstacle, et non en une simple distance métrique. Leur dimension varie par conséquent en fonction de la vitesse du véhicule (à 45 km/h, 1 seconde correspondra à une distance de 12,5 mètres, mais cela représentera 25 mètres à 90 km/h).

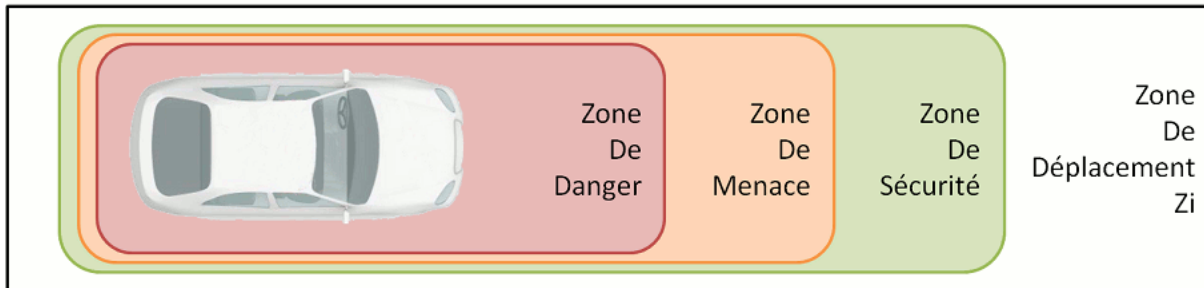


FIGURE 16 – Zones enveloppes de COSMODRIVE (inspiré de [Bellet, 1998])

Une autre caractéristique des zones enveloppes, résultant de leur caractère social, est que le conducteur ne les applique pas seulement à son propre véhicule (représentation ego-centrée), mais qu'il les projette aussi mentalement sur les autres véhicules (représentation allo-centrée), en fonction de ce qu'il a perçu de leur vitesse et inféré de leurs intentions.

Enfin, comme nous l'avons souligné, ces zones enveloppes sont utilisées par le conducteur pour évaluer les risques de collision, éviter les conflits de trajectoire, et gérer les interactions physiques et sociales avec les autres usagers de la route (véhicules, vélos, piétons, etc.). Mais ce processus d'évaluation n'a pas seulement lieu au moment de l'exécution d'une action. Il est également au cœur du processus d'anticipation de COSMODRIVE : lorsque le conducteur déploie son schéma cognitif, ce qui revient à « l'exécuter mentalement », cela lui permet également de détecter des conflits de trajectoire potentiels, prenant la forme de superpositions entre, d'une part, les zones enveloppes de son propre véhicule et, d'autre part, celles des véhicules des autres usagers. Les résultats obtenus par ce processus de dérivation mentale (que l'on peut représenter sous la forme d'une *matrice de conflits* que nous présenterons plus tard) constituent le fondement du processus de prise de décision tel qu'il est appréhendé dans le modèle COSMODRIVE.

2.6 Bilan synthétique et objectifs de la thèse

A l'issue de cette revue de la littérature en matière de modèles du conducteur en général et du modèle COSMODRIVE en particulier, il est possible de dresser un premier bilan de l'existant sur lequel pouvoir appuyer notre démarche de modélisation. Mais l'enjeu est aussi ici d'identifier les principaux manques qu'il conviendra de dépasser pour atteindre nos objectifs d'implémentation informatique du modèle COSMODRIVE sur une plateforme de simulation numérique.

Compte tenu du positionnement épistémologique de la thèse défini dans le chapitre précédent, l'objectif de cette thèse n'est pas d'implémenter un modèle de simulation numérique exhaustif et complet du conducteur humain, ce qui serait particulièrement ambitieux, mais de développer un modèle de simulation numérique doté d'un ensemble de fonctions cognitives, perceptives et motrices lui permettant d'interagir avec un environnement routier virtuel, et ceci afin de pouvoir investiguer la cognition « en situation dynamique ».

Nous allons par conséquent examiner successivement, fonction par fonction, l'état de l'existant et les principaux manques à pallier durant cette thèse.

2.6.1 Conception et développement de fonctions cognitives stratégiques

Le modèle **COSMODRIVE** n'avait fait l'objet, avant notre thèse, d'aucun développement en matière de simulation des fonctions cognitives stratégiques, responsables de la planification de l'itinéraire et de la gestion en temps réel du trajet (correspondant à la tâche de navigation). L'un des objectifs de la thèse sera d'en réaliser une implémentation informatique minimale. A ce niveau, l'ambition ne sera pas de modéliser fidèlement la cognition humaine, mais simplement de rendre le modèle autonome pour la planification et la réalisation complète d'un itinéraire. Ce seront donc avant tout les fonctions cognitives de planification et de navigation que nous chercherons à simuler informatiquement afin de les intégrer à l'activité tactique.

2.6.2 Conception et développement de fonctions cognitives tactiques

L'analyse et la modélisation de ces fonctions cognitives sont au cœur du projet **COSMODRIVE**. Il y a donc un existant considérable en matière de modélisation cognitive, mais qui nécessitera des efforts d'opérationnalisation et d'implémentation conséquents pour pouvoir réaliser des simulations informatiques.

D'un point de vue conceptuel, le module tactique de **COSMODRIVE** est, en termes imagés, une forge à représentations mentales. Il gère principalement la prise de décision, comme le fait d'engager un dépassement ou de définir les modalités de réalisation d'un tourne-à-gauche. Il est aussi chargé de catégoriser l'environnement routier, via l'activation d'un schéma de conduite stocké en **MLT**, adapté au contexte de la situation courante. Une autre fonction cognitive essentielle au niveau tactique est la prise de décision. Ce processus est intimement lié dans **COSMODRIVE** à un processus d'anticipation capable de dériver des représentations mentales anticipées à partir de la représentation courante, permettant ainsi de déterminer quelles actions peuvent être engagées ou quels comportements à adopter pour garantir, notamment, la sécurité de la conduite.

A ce niveau, notre travail consistera donc à s'inspirer du modèle cognitif existant pour en réaliser une implémentation informatique sur une plateforme virtuelle, à des fins de simulation numérique de la cognition du conducteur. Sans prétendre vouloir simuler de façon exhaustive l'ensemble de ces fonctions cognitives, il s'agira néanmoins d'en permettre une simulation informatique minimale. A cet égard, un effort important devra être consacré à l'opérationnalisation des concepts de *schémas de conduite* et de *zones enveloppes*. Si leur justification théorique et leur description conceptuelle semblent bien abouties, une formalisation plus précise est indispensable pour permettre leur implémentation informatique et leur utilisation par un modèle de simulation numérique du conducteur. Il conviendra donc de préciser dans les chapitres suivants le fonctionnement informatique de ces structures du point de vue de leur activation et de leur utilisation pour piloter un véhicule dans un environnement routier virtuel.

2.6.3 Conception et développement de fonctions perceptives

Le développement de fonctions perceptives est essentiel pour permettre à notre modèle de conducteur d'interagir dynamiquement avec l'environnement routier. Ceci est tout particulièrement vrai pour ce qui concerne la perception visuelle, sur laquelle repose principalement l'activité de conduite automobile. Le développement d'un module de perception visuelle constituera par conséquent un objectif majeur de cette thèse. Au regard de la description des processus de

prise et de traitement de l'information que nous avons réalisée dans ce chapitre et dans le précédent, ce module devra non seulement être capable d'intégrer cognitivement l'information visuelle disponible dans l'environnement, mais aussi d'explorer dynamiquement la scène routière.

Comme nous l'avons souligné, une première approche des fonctions de perception visuelle de **COSMODRIVE** a été réalisée par [Mayenobe, 2004], ce qui constituera une première base de travail. Toutefois, notre objectif sera plus ambitieux. En s'inspirant des modèles de conducteurs présentés dans ce chapitre et à l'image des architectures cognitives sur lesquelles ils s'appuient respectivement (**SOAR**, **ACT-R** et **QN-MHP**), il s'agira de concevoir et de développer un module de perception capable de générer une représentation visuelle de l'environnement. Pour y parvenir, nous serons aussi amenés à nous inspirer des modèles biologiques de l'œil humain afin de concevoir un « œil virtuel » capable d'observer l'environnement et de faire « remonter » l'information perçue dans le modèle.

2.6.4 Conception et développement de fonctions d'exécution de l'action

Pour pouvoir interagir avec l'environnement, notre modèle devra non seulement percevoir le monde, mais il devra également pouvoir piloter un véhicule dans un environnement routier tridimensionnel. Il s'agit là aussi d'un enjeu essentiel pour notre thèse. Dans le cadre de sa recherche, [Mayenobe, 2004] a réalisé un premier démonstrateur intégré d'un module d'action utilisant les *schémas de conduite* et les *zones enveloppes* de **COSMODRIVE** pour piloter un véhicule. Mais le micro-monde virtuel utilisé par ce démonstrateur est un « outil maison », mono-représentationnel et totalement encapsulé, qui n'avait pas vocation à accueillir de futurs développements pour permettre une complexification progressive du modèle. L'objectif de cette thèse est bien différent : il va s'agir de concevoir et de développer une première version informatique du modèle **COSMODRIVE** sur une plateforme de simulation virtuelle « avancée » (la plateforme **SiVIC**¹¹ du **LIVIC**¹² que nous présenterons plus tard) . Pour ce faire, il sera nécessaire de refondre complètement l'existant afin de concevoir et de développer de toutes pièces un module d'exécution capable de piloter un véhicule virtuel dans l'environnement **SiVIC**. Ce module devra notamment permettre de contrôler les déplacements latéraux et longitudinaux du véhicule, en utilisant entre autres les zones enveloppes. Bien que la théorie **COSMODRIVE** apporte des informations importantes sur la cognition du conducteur à ce niveau, elle ne permet pas un transfert direct vers un système informatique. Pour doter notre modèle de fonctions motrices minimales, il sera nécessaire de préciser le fonctionnement des zones enveloppes et les actions transmises au module d'exécution ainsi que le fonctionnement de ce dernier pour pouvoir les mettre en place sur une plateforme numérique.

Les deux prochains chapitres vont nous permettre de présenter le travail de modélisation cognitive et computationnelle ainsi que les développements informatiques réalisés durant cette thèse, afin de répondre aux différents objectifs que nous venons d'identifier.

Le chapitre 3 présentera le versant plus cognitif de cette démarche de modélisation, tandis que le chapitre 4 sera un peu son « miroir », mais focalisé cette fois-ci sur les développements informatiques des fonctions cognitives, perceptives et motrices du modèle de conducteur **COSMODRIVE** implanté sur la plateforme **SiVIC**.

¹¹Simulateur Vehicule-Infrastructure-Capteur

¹²Laboratoire sur les Interactions Vehicules-Infrastructure-Conducteurs

Développement du modèle du conducteur : des théories cognitives à la modélisation computationnelle

Dans ce chapitre, nous allons décrire les principaux éléments du modèle du conducteur développés durant ce travail de thèse, qui prendront ensuite place au sein d'une plateforme de simulation virtuelle du conducteur et de son activité de conduite. L'objectif sera ici de présenter les fondements théoriques et les résultats de notre démarche de modélisation cognitive permettant de progresser vers l'implémentation informatique du modèle et la simulation numérique (qui sera traitée dans le chapitre suivant).

Dans la progression de cet ouvrage, ce chapitre fait ainsi office de transition entre des « spécifications cognitives », provenant des sciences de la cognition, et des « développements informatiques » permettant la simulation numérique de la cognition, ce que cherche à réaliser notre travail de thèse via l'implémentation du modèle COSMODRIVE¹ sur une plateforme virtuelle. Une approche computationnelle sera donc parfois utilisée ici, afin d'apporter une description plus formelle et technique de certains aspects du modèle. La description computationnelle est une approche logico-algébrique d'une théorie, permettant une traduction informatique plus facile que le passage d'une théorie provenant de la psychologie cognitive vers une implémentation informatique.

Ce chapitre se compose de quatre parties : nous allons tout d'abord présenter notre démarche de modélisation cognitive des niveaux stratégique et tactique de l'activité de conduite, puis nous traiterons ensuite de la modélisation de la perception visuelle, avant de conclure par la description des fonctions d'exécution d'actions nécessaires pour pouvoir piloter une automobile.

Chaque partie se terminera par une section synthétique qui reprendra les principales conclusions des travaux de modélisation cognitive et/ou computationnelle des différentes fonctions cognitives, perceptives ou motrices présentées, afin de proposer les « spécifications cognitives » des différents « modules informatiques » dont devra être doté COSMODRIVE pour pouvoir simuler numériquement le conducteur humain (modules informatiques qui seront présentés pour leur part dans le chapitre 4).

3.1 Les fonctions cognitives stratégiques

Comme nous l'avons déjà souligné, notre objectif ne sera pas de modéliser de façon détaillée la cognition du conducteur au niveau stratégique de la conduite. Il s'agit simplement de réaliser une implémentation informatique « minimale » des fonctions stratégiques de planification et de

¹Cognitive Simulation MOdel of the DRIVER

suivi d'itinéraires, afin de rendre notre modèle autonome pour la réalisation complète d'un trajet routier. Pour cela, nous allons tout d'abord rappeler quelques résultats « de base » issus de la littérature, afin de proposer une modélisation computationnelle des processus de planification et de suivi d'itinéraires, ce qui nous permettra ensuite de spécifier les principales fonctions stratégiques dont devra être doté notre modèle de conducteur.

3.1.1 Les principales fonctions stratégiques chez le conducteur humain

Dans une étude ancienne (mais particulièrement poussée et sans équivalent depuis) consacrée aux représentations de l'espace urbain chez les chauffeurs de taxi, [Pailhous, 1969] a montré que les connaissances d'itinéraires chez le conducteur automobile pouvaient revêtir plusieurs aspects. D'une part, les conducteurs utiliseraient une représentation du « réseau » routier dans son ensemble qui est décrite par l'auteur comme « *une sorte de vue d'avion* » ou une *carte routière mentale*, sur laquelle ils définissent un plan stratégique du trajet à réaliser. D'autre part, ils disposeraient aussi de connaissances plus locales correspondant à des « vues » de lieux particuliers (ou des séquences de vues) telles qu'elles sont perçues au volant d'une voiture. Tandis que les connaissances de type « plan » donnent au conducteur des informations sur le parcours à suivre (comme tourner à droite à la prochaine intersection, par exemple) lui permettant d'anticiper un futur allant bien au-delà de la situation actuellement perçue, les « vues » contiendraient des repères visuels (*bâtiments importants, façades colorées, détails insolites, etc*) lui permettant d'agir et de se repérer localement dans son déplacement en se positionnant mentalement sur le plan.

Cette distinction n'est pas sans rappeler celle, plus récente, proposée par [Thinus-Blanc, 1991]. Pour sa part, cet auteur distingue trois niveaux d'organisation des représentations spatiales chez l'humain se déplaçant. Le premier niveau serait constitué de « *tableaux perceptuels* » correspondant à des « *vues locales* » de sites particuliers. Le second niveau spécifierait les relations spatio-temporelles (le séquençement) qui unissent ces vues locales dans le cadre des déplacements familiers. Le troisième niveau correspondrait à des « *cartes mentales* » plus ou moins abstraites à partir desquelles seraient stockés et/ou élaborés les itinéraires.

Pour [Bellet, 1998], il serait possible de représenter ces *cartes mentales* « sous la forme de graphes dont les nœuds correspondraient à certains points caractéristiques du trajet (assurant une fonction de repérage, indiquant un changement de direction nécessaire, ou représentant une jonction possible entre différents itinéraires, par exemple) et les arcs spécifieraient la direction à suivre au niveau de ces points, ainsi que le temps nécessaire estimé pour rallier le point suivant ». A partir de ces cartes mentales, le conducteur élaborerait un *plan stratégique* correspondant à l'itinéraire à suivre pour atteindre une destination donnée.

Cette modélisation du réseau routier et du trajet à réaliser sous la forme d'un graphe est aussi proposée par [Wood, 1993] dans son ouvrage consacré à la planification et la prise de décision en situation dynamique. Elle constitue l'un des supports d'élaboration de « plan » et d'exécution d'itinéraires routiers dans le modèle de conducteur AUTODRIVE développé par cet auteur.

3.1.2 Modélisation cognitive et computationnelle des fonctions stratégiques

La modélisation cognitive et computationnelle des fonctions stratégiques que nous proposons ici part de ces notions de « réseau routier », de « cartes mentales » et de « plan stratégique ».

Du point de vue cognitif, la réalisation d'un trajet routier suppose de disposer a minima de deux processus : un *processus de planification d'itinéraires*, permettant de définir le plan stratégique à suivre, et un *processus de suivi d'itinéraires* qui permettra de réaliser effectivement ce trajet et de s'y repérer spatialement, lorsque le conducteur se déplacera au volant de son véhicule.

3.1.2.1 Le processus de planification d'itinéraires

Les processus cognitifs en charge de la planification d'itinéraires doivent permettre au conducteur de prévoir son trajet d'un point A à un point B. Cette tâche de construction d'un plan stratégique suppose de disposer d'une carte mentale représentant le réseau routier ainsi que des connaissances concernant les buts à atteindre et les contraintes à respecter liés aux objectifs de l'itinéraire. Ces connaissances peuvent être stockées en MLT² pour certains trajets familiers, ou stockées formellement sur des cartes routières que le conducteur pourra utiliser pour planifier son trajet (définition d'un itinéraire pour partir en vacances dans un endroit inconnu, par exemple).

Les processus stratégiques doivent donc être capables de planifier un itinéraire en prenant en compte des contraintes, pour pouvoir superviser le trajet global. Cette planification se base donc sur des connaissances stockées dans la MLT, comportant une construction mentale d'un plan intégrant des vues locales reliées ensemble dans un espace spatio-temporel. Ces vues locales correspondent à des sites particuliers permettant par exemple un changement de direction inclus dans l'itinéraire ou une perte importante de temps entre 17 et 19H. Elles comportent aussi des repères visuels permettant au conducteur de se repérer dans son itinéraire par rapport à sa carte mentale (e.g. pour aller à la salle de sport, je dois passer devant le grand bâtiment blanc).

Pour les besoins du modèle, il est donc nécessaire de créer une fonction cognitive stratégique capable de calculer un itinéraire basé sur une carte mentale construite depuis une structure spatiale, pondérée par des contraintes diverses et contenant des informations additionnelles. Cette représentation mentale stratégique ainsi créée permettra de calculer un plan stratégique respectant les contraintes et permettant d'activer des vues locales contenues dans les informations additionnelles.

Pour proposer une modélisation computationnelle des cartes mentales et des plans stratégiques, la théorie mathématique des graphes nous semble être un outil bien adapté. En effet, un graphe, par définition, est un ensemble de points (sommets) reliés ou non par un ou plusieurs liens (arcs), orientés ou non. Pour l'anecdote historique, la théorie des graphes est née grâce au *Problème des sept ponts de Königsberg*³, résolu par Leonhard Euler, qui prenait pour exemple la ville de Pregel et sept de ses ponts reliant deux de ses îles. Ce problème expose la recherche d'un itinéraire permettant de passer une fois et une seule sur chaque pont et de revenir au point de départ.

Le graphe représentant la carte mentale du conducteur doit être composé d'un ensemble de points correspondant à des points caractéristiques de l'environnement. Ces points peuvent représenter des changements de direction (e.g. intersection), une zone caractéristique permettant de se repérer (e.g. le grand bâtiment blanc le long de la route), etc. Ils sont caractérisés par une position absolue (latitude, longitude) permettant de les faire correspondre à une carte réelle. De plus, la structure informatique créant le point du graphe permet d'ajouter des informations

²Mémoire à Long Terme

³Problème des sept ponts de Königsberg sur Wikipédia

additionnelles comme le type de changement de direction intervenant à cet endroit, le niveau de connaissance et d'affinité avec le croisement en question, une représentation visuelle d'un point de repère, etc.

L'ensemble des arcs, second composant d'un graphe, est défini comme l'ensemble des directions reliant les sommets entre eux. Cette description permet d'obtenir des arcs de longueur égale à la distance métrique effective entre deux sommets, pondérés par un facteur temps relatif au temps nécessaire pour parcourir ce tronçon (temps relatif au trafic, à la vitesse moyenne, etc.). Les directions sont données par l'orientation de l'arc et comprennent plusieurs voies de circulation. Ces voies sont définies dans une information additionnelle permettant de donner le nombre de voies dans la rue considérée. De plus, il est possible d'ajouter la vitesse limite, la vitesse habituellement usitée, le nom de la rue, une valeur d'habitude d'utilisation, etc. Tout cela permet de simuler au mieux la prise de décision effectuée lors de la planification d'itinéraire faite par un conducteur humain.

Avec ces deux ensembles, un graphe est défini de manière spatiale, prenant en compte l'aspect temporel d'un itinéraire grâce à la pondération des arcs et le degré d'affinité du conducteur avec un itinéraire grâce à la pondération des sommets. Le graphe global est donc une carte mentale que le modèle utilise pour définir un itinéraire correspondant au plan stratégique du modèle. Ce plan stratégique est créé par l'extraction d'un sous-graphe inclus dans le graphe global. Dans le cas d'une erreur au moment de l'exécution du plan stratégique (oubli de tourner à l'intersection) ou de la présence d'un élément imprévu empêchant le bon déroulement de l'itinéraire calculé (déviation en raison de travaux, par exemple), la fonction cognitive de planification stratégique redémarre une recherche d'un nouvel itinéraire avec les nouveaux éléments intégrés dans la carte mentale, comme un conducteur humain.

3.1.2.2 Le processus de réalisation d'un plan stratégique

Une fois l'itinéraire construit et le sous-graphe extrait, le modèle dispose d'un plan stratégique correspondant au trajet qu'il doit réaliser. Mais il lui est également possible de « zoomer » sur sa position courante pour extraire les informations relatives aux arcs ou aux sommets proches de la position actuelle du conducteur. Par exemple, le modèle se trouve sur un arc possédant l'information « vitesse limite 50 » qui conduit jusqu'à un point « boulangerie sur la gauche, dans l'angle », pour ensuite tourner à droite afin d'emprunter l'arc correspondant à la « rue de la liberté ».

Grâce à ces fonctions stratégiques, le modèle possède en permanence une connaissance de sa position sur l'itinéraire et il récupère les informations nécessaires pour les transmettre au niveau tactique, afin que celui-ci puisse mettre en œuvre les actions permettant la réalisation du plan stratégique (comme tourner à gauche à l'intersection, par exemple). Ces informations peuvent être liées à la situation courante, comme le fait de se remémorer la vitesse limite en vigueur sur le tronçon emprunté, mais elles peuvent aussi porter sur un futur plus lointain permettant d'orienter localement la prise de décision (comme différer un dépassement grâce à la connaissance d'un créneau de dépassement à double voie dans 50 mètres) ou d'engager des actions par anticipation (Il y a un carrefour à stop dans 150 mètres ; il est donc nécessaire de réduire la vitesse dès à présent).

Comme le montrent ces exemples, les niveaux tactique et stratégique de l'activité s'interpénètrent au moment de la réalisation de l'itinéraire. Cette réalisation est sous la double respon-

sabilité du niveau stratégique, qui permet de définir le plan à suivre, et du niveau tactique, qui sera en charge d'en contrôler l'exécution en situation. Ce sera aussi au niveau tactique que seront potentiellement détectées certaines impossibilités du plan stratégique (impossibilité de tourner à droite en raison d'une déviation pour travaux, par exemple), nécessitant alors une replanification en temps réel de l'itinéraire par le module stratégique.

3.1.3 Spécifications cognitive du module stratégique

Pour doter **COSMODRIVE** de fonctions cognitives lui permettant de réaliser un trajet routier, il conviendra d'implémenter dans le module stratégique un algorithme de planification d'itinéraires capable de générer des graphes permettant de rallier un point B à partir d'un point A, selon un certain trajet ou plan stratégique. Cet algorithme devra le cas échéant pouvoir planifier cet itinéraire en fonction de contraintes à respecter et/ou de points de passage à emprunter (par exemple, le point C où se trouve une station service).

Lors de la réalisation du trajet, cette représentation mentale stratégique devra aussi permettre au modèle de savoir à chaque instant où il se trouve sur le plan. Cette réalisation de l'itinéraire sera pour sa part le fruit d'une collaboration entre le module stratégique et le module tactique.

Cela nécessite aussi de doter ces modules de moyens de communication et d'échange d'informations, permettant d'un côté au module stratégique de savoir où se trouve le conducteur sur l'itinéraire, et permettant de l'autre côté au module tactique de réaliser les changements de direction nécessaires pour la bonne réalisation du plan stratégique.

3.2 Les fonctions cognitives tactiques

Le niveau tactique de l'activité de conduite s'organise autour des représentations mentales de la situation que viennent utiliser et manipuler différents processus cognitifs. Nous allons donc tout d'abord décrire ces représentations mentales tactiques, avant de présenter les processus cognitifs mis en œuvre pour (1) l'élaboration de ces représentations, (2) l'anticipation et (3) la prise de décision. Nous concluons cette section par un ensemble de spécifications cognitives du module tactique à développer pour simuler la cognition tactique du conducteur automobile.

3.2.1 Les représentations mentales tactiques

Dans l'approche **COSMODRIVE**, le système cognitif humain peut être assimilé à un système naturel de traitement qui intègre de l'information (prélevée dans l'environnement) au sein de structures cognitives - les représentations mentales occurrentes - pour partie préconstruites (activation en MLT de connaissances plus ou moins génériques comme les schémas de conduite) et pour partie élaborées en MDT, via « la particularisation de ces connaissances [génériques] à la situation réelle » telle qu'elle est appréhendée par le sujet [Richard, 1990]. Selon cette perspective, les représentations mentales jouent le rôle d'un véritable « chef d'orchestre » dans le fonctionnement cognitif de l'opérateur [Hoc and Amalberti, 1995]. En effet, elles correspondent à sa conscience de la situation ([Endsley, 1995], [Bailly, 2004]), c'est-à-dire à la façon dont l'humain perçoit et comprend la situation dans laquelle il se trouve, et en tant qu'incarnation du réel pour le système cognitif. Elles sont par conséquent le point de départ de tous les raisonnements et de toutes les décisions du sujet.

3.2.1.1 Des représentations visuo-spatiales

Dans le contexte de la conduite automobile, les représentations mentales tactiques sont de nature visuo-spatiale [Bellet et al., 2009], se rapprochant ainsi des images mentales [Denis, 1979]. Mais s'il s'agit d'images, celles-ci sont tridimensionnelles et structurées « à l'image » du monde qu'elles représentent, c'est-à-dire selon les principes de réalité géographique et physique, telle qu'elle est perçue et appréhendée par le système cognitif humain. Cela tient notamment au fait que ces représentations tactiques reposent sur des connaissances empiriques, les schémas de conduite, acquises en situation de conduite et en interaction avec l'environnement routier. Ces représentations sont ainsi des modèles mentaux plus ou moins fidèles de la réalité situationnelle, comportant un certain nombre d'informations positionnées entre elles dans le référentiel de l'observateur. Mais sa capacité d'abstraction permet aussi à l'humain de se représenter le monde selon un référentiel qui n'est pas forcément egocentré. Il est capable de reconnaître un objet ou une situation même si les amorces ne sont pas exactement les mêmes. Par exemple, nous sommes tous capables de reconnaître notre table de salon, même si elle est à l'envers. Cela fait des représentations mentales un assemblage d'objets en trois dimensions, localisés dans un système lui aussi en trois dimensions [Shepard and Metzler, 1971] [Kosslyn et al., 1971], intégrant la dimension temporelle à tous les composants de la représentation.

Ces caractéristiques des représentations mentales du conducteur tiennent à la nature des connaissances utilisées pour les construire : les schémas de conduite. Comme nous l'avons souligné dans le chapitre précédent, les schémas de conduites de COSMODRIVE [Bellet and Tattegrain-Veste, 1999] se réfèrent à trois théories cognitives : les frames de Minsky [Minsky, 1975], les schèmes piagétiens [Piaget and Inhelder, 1975] et les scénarios de [Schank and Abelson, 1977]. En tant que frames, les schémas sont des représentations visuo-spatiales du monde, permettant de s'y mouvoir et d'interagir avec les objets qu'il contient. En tant que schèmes, ces schémas sont des structures génériques ayant une certaine plasticité pour s'adapter au réel, selon des processus d'assimilation et d'accommodation. Enfin, à l'image des scénarios, les schémas intègrent aussi une dimension temporelle permettant d'inscrire les événements ou l'activité dans une histoire dynamique (de l'évocation du passé à l'anticipation du futur).

3.2.1.2 Des représentations « pour l'action »

Mais les représentations mentales ne sont pas simplement un moyen de se représenter l'environnement routier. Ce sont aussi et surtout des représentations « pour l'action » [Weill-Fassina et al., 1993]. En effet, le conducteur n'est pas un simple observateur passif de la situation de conduite. Il en est un acteur, capable d'agir en fonction de ses propres objectifs ou de réagir, en fonction des événements qui se produisent sur la chaussée.

Par conséquent, ces représentations sont aussi des représentations « fonctionnelles » [Leplat, 1985b] dont le contenu dépendra des motivations et des intentions du conducteur. Pour éviter une surcharge cognitive, le conducteur doit sélectionner les informations qui lui sont utiles, afin de disposer d'une représentation simplifiée, mais lui permettant d'être efficace. Ce processus de sélection s'améliorera avec l'expérience et l'acquisition des compétences de conduite [Bailly, 2004]. Ainsi, chez le conducteur expérimenté plus encore que chez le novice, elles ne contiennent pas toutes les informations disponibles dans l'environnement routier, mais seulement celles qui « font sens » pour le conducteur et pour son activité de conduite. Elles reflètent donc la réalité de manière déformée à travers le prisme de l'activité en cours.

3.2.2 Modélisation du processus de construction des représentations tactiques

Dans le contexte de la conduite automobile, comme dans le cadre de toute activité dynamique, l'élaboration de représentations mentales de la situation résulte d'un processus de construction complexe, itératif, et réalisé en interaction avec l'environnement [Bellet et al., 2007]. Une première étape consiste à catégoriser grossièrement l'environnement routier dont on s'approche, en se basant sur les caractéristiques générales de l'infrastructure et sur le contexte situationnel (comme réaliser que l'on s'approche d'une intersection en ville, ou d'un virage en rase campagne). Dans un second temps, les premières connaissances mobilisées vont permettre au conducteur d'orienter sa recherche d'informations vers le recueil de nouveaux indices plus précis lui permettant de particulariser ce premier cadre interprétatif à la situation réelle (pour l'intersection urbaine, par exemple : s'agit-il d'un carrefour à feux, à stop, à priorité à droite ?). Les indices prélevés, ainsi que la prise en considération des buts et des contraintes en provenance du niveau stratégique (la direction à suivre, la contrainte de temps) va alors permettre une catégorisation plus fine de la situation et l'activation d'un schéma de conduite permettant d'atteindre un but spécifique (comme tourner-à-gauche dans un carrefour à feux). Une fois transféré en mémoire de travail, ce schéma va être encore particularisé au réel au moyen d'un processus d'appariement entre, d'une part, les attributs qu'il contient et, d'autre part, les données prélevées dans l'environnement (la couleur des feux, par exemple, ou les positions, les vitesses et les trajectoires des autres usagers).

D'un point de vue computationnel, ce processus de construction dynamique reposant sur la particularisation du schéma de conduite à la situation réelle peut être défini comme un processus d'instanciation de connaissances. Le terme « instanciation » est emprunté à l'informatique. C'est un anglicisme signifiant « créer un élément à partir d'un modèle qui lui sert de moule ». C'est par ce mécanisme d'instanciation d'un schéma de conduite qu'il conviendra par conséquent de simuler le processus cognitif d'élaboration des représentations mentales tactiques au niveau de notre modèle de simulation numérique du conducteur. A partir des connaissances plus ou moins génériques et abstraites que représentent les schémas de conduite, il s'agira de générer un premier squelette de la représentation mentale visuo-spatiale du conducteur puis d'apparier ce squelette schématique avec la géométrie des lieux. Cela réalisé, il conviendra d'enrichir ce squelette désormais formaté aux caractéristiques réelles de l'infrastructure, de toute la chair des informations et des événements perçus dans l'environnement.

Pour réaliser cette instanciation des schémas de conduite, nous partirons de l'approche conçue par [Mayenobe, 2004] dans le cadre de sa thèse de doctorat. Cette approche repose sur la définition de « points remarquables ». Les points remarquables sont des points de repère visuels de référence (ou des « amers » visuels) portant sur des caractéristiques particulièrement significatives de l'infrastructure routière. La figure 17 présente des exemples de points remarquables sur une infrastructure réelle : dans une ligne droite de ce type, trois types de points remarquables sont plus particulièrement considérés : les *bords de route* (séparation trottoir / route), les *centres de route* (points médians de la rue correspondant à la ligne séparatrice centrale) et les *centres de voie* (à mi-chemin entre le bord de la route et la ligne séparatrice de la rue). En intersection, le centre de l'intersection et les bordures de trottoirs à l'angle des rues constituent aussi des points remarquables d'importance. La figure 18 présente un exemple de points remarquables contenus dans un schéma tactique, après instanciation de ce schéma avec une infrastructure réelle (via une vue aérienne).

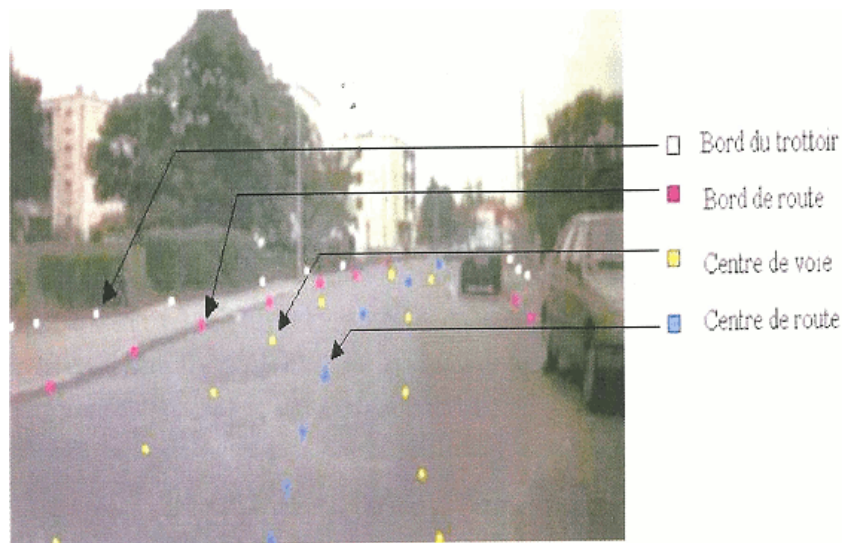


FIGURE 17 – les points remarquables en ligne droite (extrait de [Mayenobe, 2004])

Le processus d’instanciation d’un schéma de conduite consistera donc à faire coïncider les points remarquables contenus dans le schéma cognitif avec des points remarquables prélevés visuellement dans l’environnement.

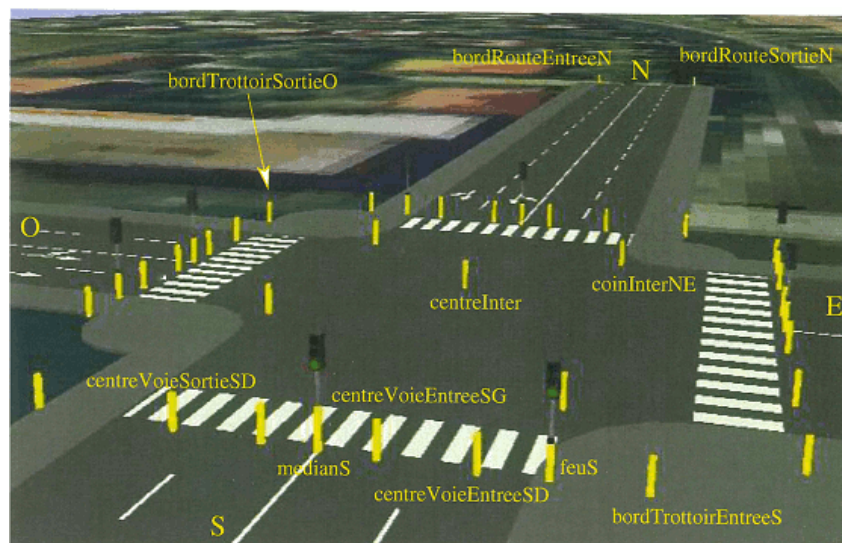


FIGURE 18 – les points remarquables au carrefour à feux (extrait de [Mayenobe, 2004])

Pour procéder à cet appariement, il n’est pas nécessaire de percevoir tous les points remarquables. En effet, la plupart des points remarquables contenus dans les schémas peuvent être inférés partiellement les uns des autres, à partir de connaissances générales (comme le fait de savoir que la largeur moyenne des voies de circulation est de 3,50 m., par exemple). Ainsi, il suffit de connaître avec précision la position de quelques points remarquables pour pouvoir projeter la géométrie qualitative du schéma sur la géométrie réelle de l’infrastructure, afin que ces deux géométries se superposent d’une façon relativement correcte, quitte à procéder à des ajustements plus précis lorsque cela sera nécessaire pour la conduite. Cette première étape réalisée, il devient

alors possible pour le conducteur de projeter mentalement sur l'infrastructure réelle la décomposition fonctionnelle de l'espace routier contenue dans le schéma de conduite, c'est-à-dire les zones de déplacement et les zones d'exploration perceptives. Cela lui permet d'observer activement l'environnement et d'intégrer les objets dynamiques dans son modèle mental.

A l'issue de cette phase d'instanciation du schéma tactique, le conducteur dispose d'une représentation mentale de la situation de conduite courante lui permettant de progresser dans l'environnement et d'interagir dynamiquement avec les autres usagers de la route. De là pourront en effet s'enclencher les procédures associées à chacune des zones de déplacement et/ou d'exploration perceptive du schéma tactique, à charge du conducteur de s'assurer en permanence de la validité de cette représentation mentale et de détecter les changements situationnels (en fonction des événements mais aussi des actions qu'il engage) nécessitant sa mise à jour, ou l'élaboration d'une nouvelle représentation basée sur un nouveau schéma. C'est sur la base de cette représentation tactique courante que le conducteur va pouvoir décider, parmi les différentes actions alternatives contenues dans le schéma, de celle à mettre en œuvre dans le contexte situationnel du moment. Toutefois, pour prendre ces décisions, il a besoin d'anticiper l'évolution de la situation.

3.2.3 Modélisation du processus d'anticipation

L'anticipation est le processus cognitif qui permet au conducteur de se projeter mentalement dans l'avenir, soit pour anticiper la survenue d'événements potentiellement critiques, soit pour apprécier les effets ou la dangerosité potentielle des actions de conduite susceptibles d'être engagées. Cette capacité est essentielle dans la mesure où, sans anticipation, le conducteur serait contraint de ne fonctionner que sur un mode réactif, ce qui lui laisserait peu de chance de survie dans un univers dynamique soumis à une très forte pression temporelle.

La modélisation du processus d'anticipation au niveau tactique du modèle **COSMODRIVE** repose sur un processus de « simulation mentale » en charge de dériver, à partir de la Représentation Tactique Courante (RTC), des Représentations Anticipées (RA) correspondant à des états futurs-possibles de l'environnement à $T + x$. C'est sur la base de ces représentations anticipées que seront prises la plupart des décisions visant à spécifier l'action à mettre en œuvre.

Du point de vue cognitif, [Bellet et al., 2009] décrivent ce processus comme un déploiement cognitif reposant sur « l'exécution mentale » du schéma tactique en cours d'exécution (au-delà, il s'agira plutôt de catégoriser l'infrastructure pour activer un nouveau schéma plus approprié au contexte). L'anticipation tactique revient ainsi à se projeter dans le futur du schéma tactique, selon le découpage temporel et spatial des différentes zones de déplacement qui le composent.

Définir le processus de dérivation, comme une sorte « d'exécution mentale » du schéma, revient à rapprocher le fonctionnement du processus d'anticipation des fonctions exécutives qui seraient mises en œuvre pour la réalisation effective de ces actions réelles. Il existe cependant une différence de taille : le retour en arrière est toujours possible pour des actions « exécutées mentalement », alors qu'il ne l'est jamais pour des actions « engagées réellement ».

Pour générer des représentations mentales anticipées, deux stratégies de dérivation peuvent s'envisager : une stratégie « en largeur d'abord » et une stratégie « en profondeur d'abord ». La première privilégie la création de représentations anticipées alternatives sur le même empan temporel. Cela permettra par exemple d'examiner et de comparer les effets de différentes actions alternatives susceptibles d'être mises en œuvre à un moment donné. La stratégie « en profondeur

d'abord » privilégie pour sa part la création de représentations anticipées à plus long terme, et séquencées dans l'empan temporel complet d'un schéma.

Dans une stratégie en largeur d'abord, pour anticiper le niveau $T+1$, il faut générer l'ensemble des représentations possibles et probables, ce qui peut dans certains cas créer de nombreuses anticipations. Ainsi, un véhicule ralentissant à une intersection avec clignotant à droite génère une représentation anticipée très probable : le véhicule tournera à droite. Sans clignotant, les représentations sont plus nombreuses : le véhicule tournera à droite, ou à gauche, le conducteur du véhicule est prudent à l'intersection, un objet est présent sur la route, un autre usager traverse, etc. Cette dérivation temporelle d'un pas en avant, permettra de générer de nombreuses représentations anticipées dans les zones d'évolution proches du véhicule, permettant ainsi d'intégrer de nombreuses alternatives différentes, de faire émerger différentes situations critiques et d'explorer une large gamme de comportements susceptibles de s'engager. Elle favorise la découverte de trajectoires optimales, mais ne permet pas de déterminer l'intégralité de la trajectoire à parcourir pour atteindre le but final du schéma.

Dans une stratégie en profondeur d'abord, l'élaboration d'une séquence complète de représentations anticipées permettant d'atteindre rapidement le but final du schéma tactique est privilégiée. Il est donc nécessaire de créer l'anticipation à $T+1$ puis continuer à $T+2$ avec la situation la plus probable et ainsi de suite jusqu'au déroulement cognitif complet du schéma tactique. Cette approche favorise la découverte rapide d'une trajectoire « possible » permettant d'atteindre le but tactique, mais elle ne garantit pas de trouver une trajectoire optimale.

Ces deux stratégies de dérivation ont donc leurs intérêts et leurs inconvénients, et le conducteur doit faire constamment un « compromis cognitif » [Amalberti, 1996] entre ces deux stratégies.

3.2.4 Le processus de prise de décision

Le processus de prise de décisions fonctionne de concert avec le processus d'anticipation, car pour prendre une décision tactique au volant, il est nécessaire de comparer les conséquences de différentes actions susceptibles d'être mises en œuvre à un instant donné.

Pour bien comprendre l'imbrication de ces deux processus cognitifs, il convient de se référer à la modélisation computationnelle qu'en propose [Bellet, 1998]. Pour cet auteur, il convient de représenter « l'ensemble des Représentations Anticipées (RA) sous la forme d'un arbre dans lequel la racine correspond à la Représentation Tactique Courante (RTC) de la situation de conduite, les nœuds correspondent aux évolutions potentielles de cette situation (RA), et les arcs (qui relient les différentes RA) correspondent aux actions à réaliser et aux conditions à respecter pour passer d'une Représentation Anticipée à la suivante. A chaque RA sont associés deux paramètres permettant de qualifier le *risque encouru* et le *gain de temps* que représente le passage (via l'action à mettre en œuvre) de la RA précédente à cette nouvelle RA. La valeur de ces paramètres peut être fixée *a priori* (e.g. s'engager à l'orange dans une intersection présente *a priori* plus de risque que de s'arrêter ; en revanche, cela permet un gain de temps), mais elle est largement conditionnée par le contexte situationnel du moment (e.g. selon la visibilité, la configuration du carrefour ou les conditions de trafic, le risque sera plus ou moins élevé et le gain de temps plus ou moins conséquent). C'est donc le processus générateur des RA (*Anticipation*) qui sera le plus à même d'estimer et de fixer la valeur de ces paramètres lors de chaque nouvelle dérivation. En outre, au fur et à mesure de l'élaboration de l'arbre des Représentations Anticipées, *Anticipation* calcule une valeur globale de ces deux paramètres pour l'intégralité de la branche

(séquence des RA à partir de la racine) sur laquelle se trouve la nouvelle RA dérivée. C'est sur la base de ces valeurs « locales » (d'une RA à l'autre) ou « globales » (pour toute la branche) que l'agent *Décision* déterminera quelle action (ou séquence d'actions élémentaires) enclencher parmi les différentes alternatives comportementales possibles dans la situation courante considérée ».

Il est aussi nécessaire de pondérer la pertinence des anticipations en fonction des buts locaux et globaux définis par le module stratégique, qui peuvent prendre en compte par exemple le temps de parcours et l'acceptation du risque en utilisant le rapport gain/risque ([Wilde, 1982b]). Cette décision sur les anticipations permet de définir un ensemble d'anticipations susceptibles d'être les plus pertinentes pour la suite de la situation courante.

Toutefois, pour permettre la prise de décision, les représentations anticipées ne doivent pas seulement réaliser un déploiement cognitif des schémas, mais ce déploiement doit aussi intégrer les zones enveloppes projetées sur tous les objets dynamiques de la représentation tactique courante, à commencer par le véhicule du conducteur. Par exemple, lorsqu'on doit réaliser un tourne-à-gauche en intersection urbaine, il convient de le faire sans couper dangereusement la route d'un véhicule circulant à contresens. En cas de présence d'un trafic opposé, il est possible d'engager cette manœuvre de tourne-à-gauche si le véhicule approchant à contresens est suffisamment éloigné et/ou si, bien que proche, il roule à une faible vitesse. Pour découvrir un créneau d'insertion acceptable d'un point de vue sécuritaire, l'approche COSMODRIVE postule que l'humain utilise les zones enveloppes pour évaluer les risques de collision. Ainsi, lorsque le conducteur déploie mentalement son schéma cognitif, cela lui permet de détecter de futurs conflits de trajectoires qui prendront la forme d'une superposition entre, d'une part, les zones enveloppes de son propre véhicule et, d'autre part, les zones enveloppes des autres véhicules. Les différents types de conflits susceptibles de se produire sont représentés dans la matrice de conflits présentée dans la figure 19 :

		Autre usager		
		Verte	Orange	Rouge
Véhicule sujet	Verte	Risque important	Risque notable	Risque modéré
	Orange	Risque notable	Risque très important	Risque très important
	Rouge	Risque modéré	Risque très important	Risque considérable

FIGURE 19 – Matrice des risques relatifs aux conflits de zones enveloppes

Lorsqu'une manœuvre de conduite peut être réalisée sans qu'aucun conflit de zones enveloppes n'apparaisse, cela signifiera que cette action est sécuritaire. En cas de conflit, celui-ci représentera un niveau de criticité variable en fonction de sa nature, comme l'indiquent les valeurs comprises dans les différentes cellules de la matrice. Selon cette matrice, un conflit « Rouge-Vert » est moins critique qu'un conflit « Vert-Vert ». Cela s'explique par la compréhension dynamique de la situation. Un conflit Rouge-Vert se produira, par exemple, lorsqu'un véhicule venant de la gauche coupera perpendiculairement ma trajectoire à 1,5 seconde de mon véhicule. Compte tenu de sa vitesse et de son mouvement, il y a de fortes chances pour qu'il sorte rapidement de ma trajectoire. A l'inverse, en cas de conflit Vert-Vert pour une même situation, cela signifiera un

risque de collision à 1,5 seconde (dans la mesure où aucun de ces deux véhicules ne changerait de comportement).

3.2.5 Spécifications cognitives du module tactique

Dans cette section, nous avons vu que le conducteur élaborait une représentation mentale visuo-spatiale de son environnement pouvant être très différente de la réalité objective. Cette représentation est construite à partir d'un schéma de conduite qui est instancié au réel. Une fois instancié, ce schéma constitue la *représentation tactique courante*, correspondant à la situation de conduite à l'instant T, à partir de laquelle le conducteur construira par déploiement cognitif des *représentations anticipées* dérivées à partir de la représentation courante, ceci afin de faire des prévisions (concernant les effets respectifs d'actions alternatives, par exemple) sur lesquelles se basera la prise de décision.

Du point de vue de nos objectifs de simulation numérique de la cognition du conducteur automobile, cela signifiera tout d'abord que notre modèle devra pouvoir se construire une représentation visuo-spatiale de l'environnement routier en utilisant des informations perceptives d'un côté, et des schémas de conduite de l'autre côté, qui devront être instanciés au réel. Dans la mesure où le conducteur élabore des représentations mentales anticipées, cela signifiera aussi qu'il conviendra de disposer d'un outil logiciel capable de générer et d'utiliser plusieurs modèles tri-dimensionnels en parallèle, modèles qui pourront être très différents, selon qu'ils simulent la réalité objective (c'est-à-dire la situation de conduite telle qu'elle est réellement), ou le contenu de telle ou de telle représentation mentale du conducteur.

Pour pouvoir supporter la prise de décision, le module devra aussi être capable de réaliser des dérivations temporelles à partir de la représentation tactique courante afin d'identifier des situations critiques à éviter ou les actions à entreprendre. Cette anticipation crée donc de nouvelles représentations non conformes à la réalité, mais rassemblant les informations qui composent la représentation courante. Nous parlons de plusieurs représentations anticipées : à chaque éventualité, une nouvelle représentation anticipée peut être créée, mais seules les anticipations probables sont considérées par le conducteur. Du point de vue informatique, l'anticipation est une forme de représentation tactique courante qui n'est plus liée au temps réel de la simulation. Elle permet ainsi de créer d'autres représentations en parallèle pour dériver temporellement une situation courante et anticiper par déploiement cognitif. Ces représentations sont donc structurellement les mêmes que les représentations courantes, mais ne correspondent pas au même état du monde.

Par ailleurs, nous avons vu que l'anticipation pouvait reposer sur deux stratégies de dérivation. Une stratégie en « profondeur d'abord » qui permettra d'atteindre au plus vite l'état final du schéma tactique sans garantir de trouver la solution optimale et une procédure de dérivation en « largeur d'abord » qui permettra d'examiner différentes alternatives d'actions à engager immédiatement. Cela permettra d'opter pour la solution optimale à très court terme, mais sans savoir si, au final, cette première action ne conduira pas ensuite à une situation critique au niveau des zones de déplacement plus lointaines du schéma tactique. Nous avons vu que les stratégies de déploiement utilisées par les conducteurs reposent sur un compromis cognitif qui peut être différent selon les situations, ou les phases décisionnelles de certaines situations.

Par conséquent, d'un point de vue informatique, il serait nécessaire de pouvoir combiner ces deux approches de dérivation pour anticiper à la fois les trajectoires optimales et réussir à dérouler mentalement cette trajectoire pour anticiper des conflits potentiels. Ainsi, nous pouvons

voir l'ensemble des représentations anticipées comme un arbre-planaire enraciné (graphe orienté acyclique avec une seule racine) dont chaque nœud est une représentation anticipée, chaque niveau hiérarchique de l'arbre est un pas de temps en plus dans le futur et chaque subdivision d'un nœud est une situation probable découlant de cette situation.

La création d'une représentation anticipée peut être séparée de la gestion de l'ensemble des représentations anticipées. En effet, il est possible de définir, grâce à l'arbre des représentations anticipées, un sous-arbre potentiellement plus probable qu'un autre en se basant sur une pondération des subdivisions d'un nœud (e.g. l'enfant qui désire traverser). La création d'un sous-arbre possédant moins de représentations anticipées est une amélioration algorithmique du processus d'anticipation nécessaire à son implémentation, car les représentations ainsi créées seront moins nombreuses et regrouperont à la fois une approche en largeur et en profondeur. L'anticipation utilise une partie des processus de décision pour évoluer, cela permet donc d'exclure des cas grâce à une décision sur une situation future (e.g. ne pas dépasser une certaine vitesse ou refuser des situations présentant un niveau de risque jugé trop élevé). Il est donc possible de créer un arbre, c'est-à-dire une structure hiérarchisée, orientée, et acyclique comprenant un nombre limité de possibilités toutes pondérées par des valeurs de pertinence, de criticité ou de gain pour l'activité en cours. Par exemple, la situation probable « passer au feu vert » a une pertinence plus haute et une criticité plus faible que celle « passer au feu rouge ». Une fois cet arbre créé, il est possible d'utiliser l'algorithme min-max amélioré par un élagage alpha-bêta pour extraire une suite de possibilités minimisant la criticité ou maximisant la pertinence à la tâche. Une fois cette suite de possibilités extraite, le processus d'anticipation couplé avec celui de création de représentations peut entrer en jeu pour générer l'(les) anticipation(s) la(les) moins critique(s) et/ou la(les) plus probable(s) pour la tâche en cours.

Comme nous le voyons, les défis posés par la simulation informatique des fonctions cognitives tactiques sont immenses. Par conséquent, seuls certains de ces aspects pourront être traités durant cette thèse, l'enjeu étant surtout à ce niveau de poser les premières pierres de l'édifice et de permettre la complexification ultérieure du modèle.

3.3 Les fonctions perceptives

Nous venons de voir que la conduite automobile repose largement au niveau tactique sur la représentation mentale qu'élabore le conducteur de la situation de conduite dans laquelle il évolue. Toutefois, sans la perception de son environnement, le conducteur ne peut en aucune façon avoir une représentation mentale fiable. En effet, l'environnement de conduite n'est pas un système figé, il évolue au cours du temps selon des lois plus ou moins définies et connues. Il est donc indispensable que le conducteur prélève en permanence des informations dans son environnement, afin de mettre à jour continuellement ses représentations mentales. Dans le cadre du développement d'un modèle de simulation du conducteur automobile basé sur une boucle « perception-décision-action », il est par conséquent nécessaire de doter ce modèle de fonctions perceptives lui permettant de voir son environnement et d'intégrer ces informations dans ses représentations cognitives.

Dans cette partie, nous présenterons tout d'abord différentes théories de la perception visuelle puis nous nous intéresserons à certaines caractéristiques biologiques de l'œil humain. Nous tenterons alors de proposer une modélisation computationnelle de la perception visuelle, ce qui

nous permettra de dégager, en fin de partie, des spécifications du futur module de perception dont il conviendra de doter **COSMODRIVE** pour pouvoir simuler numériquement la perception visuelle du conducteur automobile.

3.3.1 Première approche de la perception

La perception au sens large fait appel à une forme d'intelligence globale, des connaissances relatives au monde qui nous entoure, ceci par « *ouïe-dire, expérience vague, conclusion ou par essence* » [Spinoza, 1670]. Cette perception qu'a l'humain, qu'il acquiert tout au long de son développement, naît de la fusion de nombreuses sources de données et du traitement cognitif de ces données. Le terme « perception » utilisé tout au long de cette réflexion fait référence à la capacité de connaître par l'intermédiaire de sens. La perception que nous traiterons se limitera donc aux fonctions psychophysiologiques qui permettent l'obtention d'informations sur certains éléments extérieurs.

Percevoir son environnement est une nécessité pour le bon déroulement de la tâche de conduite. La perception est le lien entre le conducteur et le monde extérieur dans lequel il évolue. Cette perception est cependant appréhendée de façons différentes selon les courants scientifiques. En effet, la perception humaine est un sujet de recherche en soi, animé par de nombreux débats théoriques.

L'environnement est perceptible, nous dit Gibson [Gibson, 1979], et cela peut suffire selon lui à expliquer toute la perception. Selon cet auteur en effet, la perception se ferait « directement » à partir de la simple stimulation de la rétine, grâce au champ optique et à ses invariants. Nous reviendrons sur cette position qui ne nous paraît pas suffisante pour expliquer la perception du conducteur, même si elle est intéressante pour comprendre l'intégration cognitive des informations perceptives. Mais avant cela, il convient de souligner ici que les représentations mentales du conducteur automobile ne se basent pas uniquement sur la perception visuelle. Elles peuvent aussi se construire autour de la composition de plusieurs sens. Selon [Warren, 1995], quatre grands systèmes perceptifs sont mis en jeu dans le système cognitif humain en situation de déplacement : le système visuel et le système auditif qui jouent principalement un rôle anticipatoire, le système vestibulaire (perception du mouvement et de l'orientation par rapport à la verticale) et le système somatosensoriel (sensibilité du corps) qui fournissent les informations d'ordre mécanique, relatives à l'action en cours.

Dans notre approche de modélisation informatique du conducteur, nous nous limiterons à la modélisation de la perception visuelle dans la mesure où l'essentiel des informations utilisées pour la conduite sont d'origine visuelle. Mais nous aurons soin de concevoir un module de perception susceptible de prendre en compte, dans l'avenir, d'autres fonctions perceptives.

Un dernier point à préciser en préambule à l'analyse des théories de la perception concerne le fait que, dans la littérature, la perception visuelle est souvent intimement liée à l'attention visuelle qui permet au conducteur de focaliser son regard sur certains objets au détriment d'autres zones de l'espace qui l'entoure. L'étude de la perception du conducteur renvoie aussi à la notion corollaire de distraction visuelle. En effet, un défaut de prise d'information peut être le résultat d'une distraction d'origine interne ou externe au véhicule, créée par une activité, une personne ou un objet tiers, qui détourne l'attention du conducteur de son activité de conduite [Treat, 1980]. Lee, Regan et Young définissent du reste la distraction comme le détournement de l'attention au

détriment de la conduite [Regan et al., 2009], ce qui peut engendrer des problèmes de perception (voir [Victor et al., 2005] et [Zhang, 2011] pour revue de la littérature récente sur les questions de distractions visuelle ou cognitive). La modélisation et la simulation des effets de la distraction visuelle sont donc l'un des enjeux de notre travail de modélisation, dans la mesure où il s'agit là d'un problème d'importance pour la sécurité routière.

3.3.2 Les théories de la perception : de la cognition à la biologie de l'œil humain

La modélisation de la perception pour le modèle COSMODRIVE doit reposer sur des approches issues de biologie jusqu'à la psychologie, car la perception visuelle est autant, selon nous, une affaire de cognition qu'une affaire de récepteur sensoriel. L'œil humain est en effet « piloté » par plusieurs processus cognitifs que nous allons tenter d'identifier dans les sections suivantes, puis nous présenterons la notion de champs visuels qui apporte à la fois un ancrage de la perception dans la cognition et dans la biologie. Nous concluons par une description synthétique de l'œil biologique afin de spécifier les caractéristiques du futur « œil virtuel » dont nous souhaitons doter COSMODRIVE.

3.3.2.1 La « dualité » de la perception humaine

Dans le premier chapitre de cet ouvrage, nous avons souligné que le prélèvement et le traitement des informations visuelles par le conducteur reposaient sur deux processus complémentaires : un processus bottom-up « dirigé par les données » permettant l'intégration d'une information n'ayant pas fait l'objet d'une recherche de la part du conducteur, et un processus d'intégration top-down « dirigé par les connaissances » orientant le conducteur dans l'exploration perceptive de l'environnement routier.

Cette dualité des processus de prise et de traitement de l'information visuelle chez le conducteur automobile nous semble essentielle. Dans ce contexte, la théorie écologique de la perception de [Gibson, 1979], bien qu'elle soit aussi intéressante pour nous et qu'elle ait été souvent utilisée pour analyser la perception du conducteur automobile ([Berthelon et al., 1998], [Klam, 2003]), ne nous semble pas suffisante.

[Gibson, 1979] définit en effet la perception comme une « relation directe » entre l'animal et l'environnement. Cette relation directe repose sur la notion d'*affordance*, qui est la capacité pour un objet de suggérer à son observateur ses possibilités d'interaction. Cette approche de la perception ne requiert par conséquent aucun traitement de la part du cerveau pour extraire l'information d'un objet perçu : toutes les informations sont contenues dans le *flux optique* que perçoit l'œil. Nous percevons avec nos sens et notre cerveau, mais aussi grâce à l'environnement lui-même. Les différences au sein du *champ optique ambiant* [Gibson, 1977] font que les informations sont perceptibles. La perception se fait directement à partir de la stimulation de la rétine, grâce au champ optique et à ses invariants.

Cette approche gibsonnienne de la perception peut être qualifiée de " A-cognitive ", dans la mesure où elle est indépendante de tout processus cognitif. Ce jugement n'est pas le nôtre. C'est celui de Neisser [Neisser, 1976] qui, dans les premières pages de son ouvrage *Cognition and Reality*(p.9), définit la théorie de Gibson comme « *Une théorie de la perception dans laquelle les événements mentaux ne jouent absolument aucun rôle ; celui qui perçoit récupère directement*

l'information qui lui est proposée. »^{4,5}, et il poursuit cette critique ainsi : « *le point de vue gibsonien de la perception semble également inadéquat, ne serait-ce que parce qu'il aborde très peu la contribution de l'observateur dans l'acte perceptif.* »⁶. C'est à la page 19 du même ouvrage que Neisser va véritablement poser ses questions relatives à la théorie gibsonienne et mettre en avant les problèmes majeurs qu'il y voit. Par exemple, il demande ce qui se passe dans la tête de l'observateur, chose qui n'est pas abordée par Gibson, il demande comment faire pour apprendre à mieux voir, ou comment sont possibles les illusions d'optique et les erreurs de perception, si les informations sont disponibles et déterminées.

Face à cette position, Neisser apporte une approche radicalement différente de la perception : une perception basée sur les compétences et l'expérience de l'observateur (« Perception depends on the skill and experience of the perceiver » [Neisser, 1976], p.13). Selon Neisser, la perception dépend de structures cognitives internes préexistantes à la perception, les « Schemata », connaissances qui dirigent l'activité de perception et qui sont susceptibles d'être modifiées, en retour, par la perception.

3.3.2.2 Pour un « Cycle Perceptif »

La perception visuelle est très certainement le point d'entrée des informations visuelles provenant de l'environnement en direction des représentations mentales visuo-spatiales, mais il nous semble aussi essentiel d'inscrire la perception du conducteur automobile dans le cycle global de l'activité de conduite « Perception-Cognition-Action » présenté en figure 14 p.44 : tantôt ce sera bien la perception qui alimentera et déterminera le contenu de la représentation, tantôt ce sera la représentation qui au contraire guidera et déterminera la perception, mais le plus souvent, ces deux processus œuvreront de concert à l'élaboration dynamique des représentations internes du système cognitif humain.

Notre approche s'appuie à ce niveau sur la théorie de « Cycle Perceptif » de [Neisser, 1976]. Pour cet auteur (p.20-21), il existe « des schémas perceptifs d'anticipation qui préparent l'observateur à accepter certains types de renseignements plutôt que d'autres, et qui contrôlent par conséquent l'activité de perception. »⁷. La vision devient donc un processus construit au fur et à mesure grâce à une anticipation de ce qui va être perçu, afin de définir des schémas d'exploration perceptive permettant d'extraire l'information, mais aussi de modifier ces mêmes schémas perceptifs. Il définit un cycle, présenté à la figure 20, qui décrit ce processus de perception visuelle basé sur une exploration cognitivo-perceptive dirigée par des schémas perceptifs, et permettant de sélectionner des informations dans l'environnement capables de modifier en retour le schéma perceptif en cours.

⁴ « A theory of perception in which mental events play no role at all; the perceiver directly picks up the information that the world offers him. »

⁵NdT : la traduction de « perceiver » en « percepteur » n'est pas possible car ce terme réfère au recouvrement des impôts en français. Le terme observateur ne convient pas non plus car il sous-entend une action volontaire dans la perception visuelle.

⁶ « the Gibsonian view of perception also seems inadequate, if only because it says so little about perceiver's contribution to the perceptual act. »

⁷ « The anticipatory schemata that prepare the perceiver to accept certain kinds of information rather than others and thus control the activity of looking. »

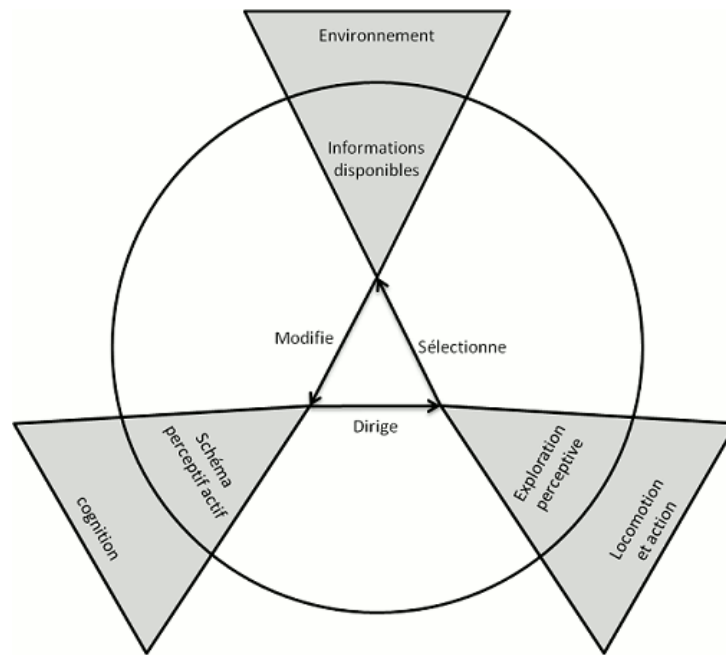


FIGURE 20 – Cycle perceptif, tiré de [Neisser, 1976]

Mais ce concept de schéma perceptif ne signifie pas qu'une information non anticipée ne peut pas être perçue, car c'est habituellement par un stimulus non prévu que le cycle va démarrer, et c'est ici que Neisser reconnaît la pertinence presque indiscutable de la théorie Gibsonnienne⁸.

Les schémas perceptifs sont définis comme une portion interne d'un cycle perceptif complet, modifiable par l'expérience de l'observateur et spécifique à ce qui est observé. Ils sont modifiés par les informations qu'ils prennent en compte une fois l'exploration visuelle faite et de nouveaux indices perceptifs intégrés. Ils génèrent l'anticipation nécessaire à l'exploration pour permettre à l'observateur d'aller chercher des informations dans l'environnement qui permettront par la suite d'étoffer le schéma perceptif en cours d'utilisation. Mais U. Neisser précise bien que « Nous ne pouvons pas percevoir sans anticiper, mais nous ne devons pas voir uniquement ce que nous anticipons »⁹ [Neisser, 1976] p.43. Par exemple, si une personne entre dans notre bureau dont la porte est face à notre poste de travail, notre vision périphérique nous informe de l'arrivée d'une personne et c'est grâce à l'anticipation du mouvement de cette personne que nous lèverons les yeux vers elle avec anticipation. En revanche, si une personne apparaît au centre de la pièce, la perception que nous aurons au premier abord s'apparentera plutôt à un fantôme et générera au minimum une situation inhabituelle ([Neisser, 1976], p.41).

Les schémas perceptifs sont plus proches du génotype que du phénotype, ils permettent de construire les stratégies selon une ligne directrice, mais la perception dans son intégralité est déterminée par l'interaction de l'observateur avec son environnement. La perception est définie par les schémas perceptifs comme un organisme est défini par son code génétique, elle n'est que le fruit de l'interaction entre les schémas perceptifs et les informations disponibles dans l'environnement observé. La perception est un processus qui se construit pendant son exécution,

⁸ [Neisser, 1976],p.24 : « The Gibsons are surely right in their claim that the optic array provides accurate information about the environment, which the perceiver picks up. How could this be false? »

⁹ « We cannot perceive unless we anticipate, but we must not see only what we anticipate »

car l'observateur est actif pendant son activité de perception [Neisser, 1967].

Ces schémas perceptifs sont donc les structures permettant à l'observateur de diriger son attention visuelle dans l'environnement pour en extraire la partie pertinente pour sa tâche en cours, mais ils ne permettent pas de construire toute la perception visuelle. Il est donc fort probable de pouvoir observer dans les traces d'activité d'un conducteur une partie des schémas perceptifs qu'il a déployés pour observer une scène routière [Plavsic et al., 2010] [Shinoda et al., 2001] [Hayhoe et al., 2002]. Mais il reste donc des observables observés qui ne font pas partie d'une attention visuelle dirigée par un schéma perceptif. Ils sont ici pour compléter la prise d'informations visuelles provenant de l'interaction entre l'observateur et son environnement visuel. Une partie des informations sont extraites de l'environnement, sélectionnées et intégrées, une autre partie est filtrée par la perception. La filtration, telle qu'elle est décrite par [Neisser, 1976] et comme nous la définissons, n'est pas un acte volontaire, car cela n'a pas de sens au niveau humain de rejeter un stimulus. L'observateur ne perçoit pas une information, elle n'entre donc pas dans le système et n'aura donc pas d'influence sur lui. Le filtrage au sens plus mathématique signifie rejeter une chose pour qu'elle n'ait pas d'influence sur le système.

La description des schémas tactiques que nous avons faite à la section 3.2.2 (p.61) et celle que nous verrons à la section 4.3.1 montrent qu'ils intègrent des zones perceptives dans leurs structures. Il est alors possible de faire un lien direct entre nos schémas tactiques et les schémas perceptifs. En effet, la structure de graphe qui les définit intègre des points remarquables dédiés à l'observation d'une zone, en fonction d'une zone de déplacement. Ainsi, il est possible de représenter les schémas perceptifs de Neisser qui entraîneront une partie de l'observation que fait le conducteur de son environnement routier pendant son activité.

La perception est donc un processus complexe dirigé à la fois par l'observateur, mais aussi par son environnement. De plus, l'organe de perception de l'observateur joue un grand rôle dans le processus de perception. Ainsi, la vision artificielle peut avoir des capacités que l'humain n'a pas et peut permettre une vision de l'environnement radicalement différente de l'humain (e.g. fusion de données provenant de télémétrie, vidéo, radar, etc.). Il est nécessaire pour notre travail de modélisation cognitive de l'humain de se rapprocher du fonctionnement de la vision humaine, et pour cela nous allons décrire une partie de la vision humaine et de son organe réservé.

3.3.2.3 Les champs visuels

Un champ visuel est une portion de l'espace vu par un œil lorsque ce dernier est fixe. Cette portion de l'espace est un cône de révolution avec comme sommet le centre de la pupille et au centre de la base du cône le point de fixation. Lorsqu'il s'agit de vision binoculaire comme chez l'humain, la vision porte sur la composition des deux organes de vision, ce qui entraîne une composition des deux cônes de vision formés par les deux yeux.

Plusieurs approches du champ visuel peuvent décrire celui-ci, mais toutes s'accordent à définir une zone centrale de 5 degrés d'angle maximum permettant une discrimination fine des informations visuelles nommée *zone fovéale*. Cette zone fovéale est le champ visuel le plus à même de percevoir les détails d'un espace observé, c'est donc dans cette zone que l'observateur vient placer un objet (ou une zone de l'espace) pour recueillir le plus d'informations possibles.

La figure 21 nous permet d'avoir une bonne explication des différentes zones possibles et de leur utilisation. Mais, comme nous le verrons grâce à la description de l'œil, les champs visuels ne peuvent se définir avec exactitude, et nous pouvons voir apparaître la définition de *zone parafovéale* et de *zone périphérique* [Rayner, 1984] [Rayner, 1998] [Sanders, 1993] ou de *champ visuel utile* ([Ikeda et al., 1979] cité par [Rogé and Pébayle, 2009]) ou de *veille, impression induite et alerte périphérique* [Claverie and Leger, 2009].

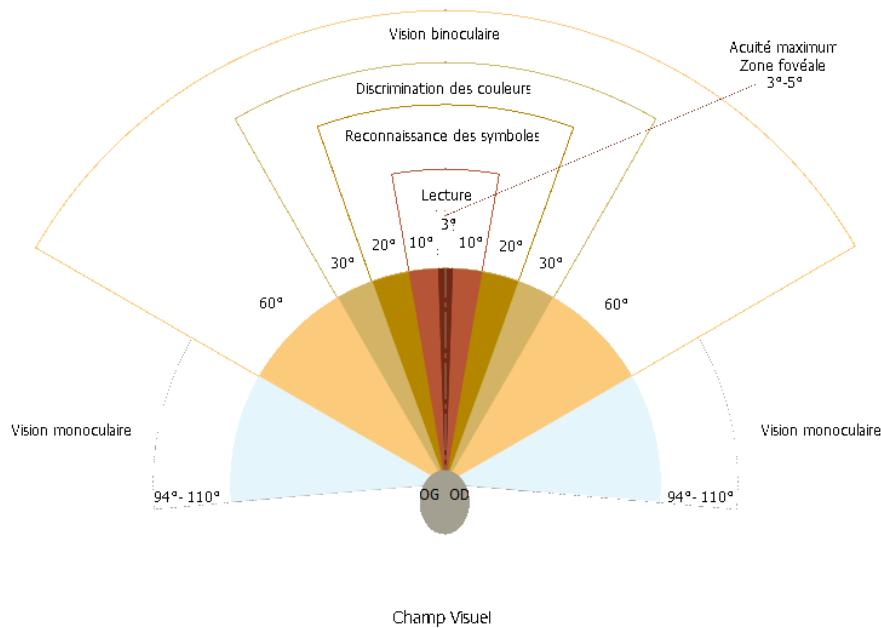


FIGURE 21 – Champs visuels humains

La notion de champ visuel utile est très intéressante pour la question de traitement d'informations en dehors de la zone fovéale. Hélas, ce système est non statique. Il varie d'une personne à l'autre, mais aussi en fonction de l'âge ou de l'état de fatigue de l'observateur. Nous avons donc décidé de conserver un système de champ visuel fixe pour commencer notre modélisation de la perception visuelle humaine. La figure 22 présente les champs visuels conservés pour notre travail.

Cette approche permet de rendre compte de la différence très importante entre la zone fovéale et la zone périphérique, tout en conservant une marge autour de la zone fovéale pour des traitements différents de l'information présente en zone parafovéale. Mais les champs visuels de l'humain sont fortement corrélés à l'anatomie de l'organe permettant la vision. Nous allons donc décrire succinctement l'œil humain.

3.3.2.4 L'œil biologique

L'œil humain se compose physiquement du globe oculaire et de ses muscles permettant les mouvements oculaires. Le globe oculaire décrit en figure 23 n'a pour fonction que de capter les

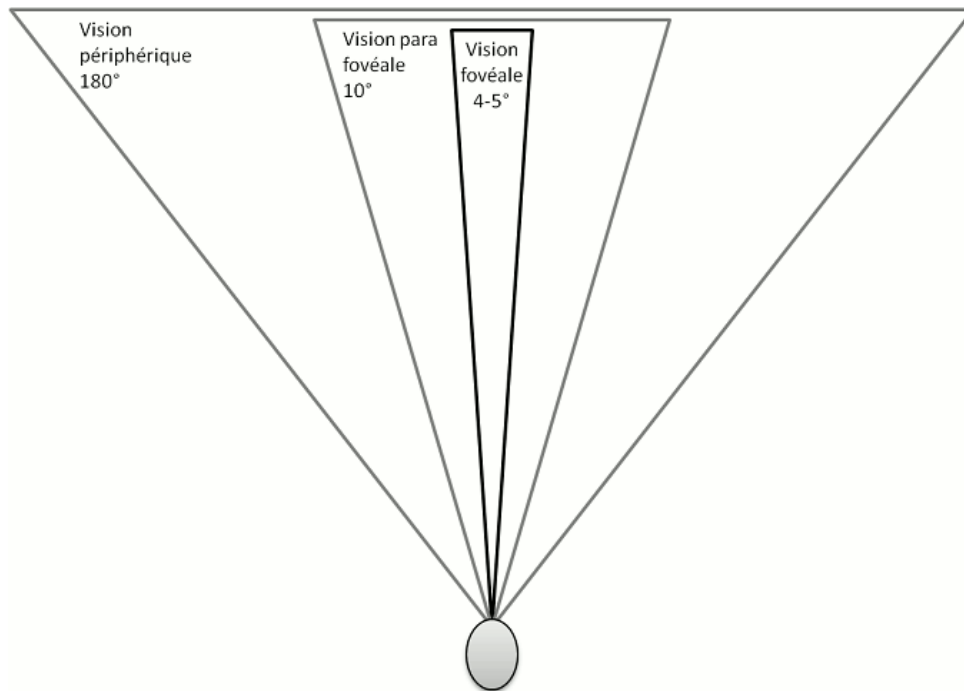


FIGURE 22 – Champs Visuels : Fovéa, Parafovéa et Périphérique

rayons lumineux. Une fois l'information obtenue, le nerf optique se charge de la transmettre au cerveau. Pour notre approche descriptive succincte du système oculaire, nous allons principalement décrire la **rétilne** et ses différents composants puis nous aborderons les différents **mouvements** possibles de l'œil.

Rétine : La rétine, partie couvrant le fond du globe oculaire, est chargée de capter les rayons lumineux pour les transformer en potentiels d'action relayés par le nerf optique en direction du cerveau. Cette sensibilité à la lumière provient des deux types de cellules présents au sein de la rétine [Gregory, 2000] [Blake and Sekuler, 2006]. **Les cônes**, photorécepteurs principalement sensibles aux couleurs (bleu, rouge et vert) nécessitent une bonne luminosité pour un fonctionnement optimal. **Les bâtonnets**, non réceptifs aux couleurs, ont une meilleure capacité de réception de la lumière, d'où leur utilité dans des conditions de luminosité dégradées (ils permettent la vision scotopique) et sont aussi les récepteurs associés à la détection de mouvements. Ces différentes cellules ne sont pas réparties également sur la rétine. Une zone contient beaucoup plus de cônes que de bâtonnets : **la fovéa**. Cette zone permet une discrimination spatiale importante dans des conditions de luminosité normale (vision diurne). Le reste de la rétine est couvert en plus grand nombre de bâtonnets par rapport aux cônes, ce qui permet une bonne discrimination des mouvements et des contrastes. À l'extérieur de la fovéa, des cônes sont encore présents sur la rétine, mais en moindre quantité, c'est pour cela que la zone autour de la fovéa perçoit tout de même une partie de l'information visuelle, comme la fovéa, sans pour autant l'égaliser en précision. C'est en partie cette différence de disposition des cellules photoréceptrices sur la rétine qui crée les différents champs visuels. Cette différenciation définit deux systèmes visuels : la vision centrale et la vision périphérique. Les deux fonctionnent ensemble, mais le premier est en partie dirigé par le second, car la vision périphérique capte principalement le mouvement ou les différences de

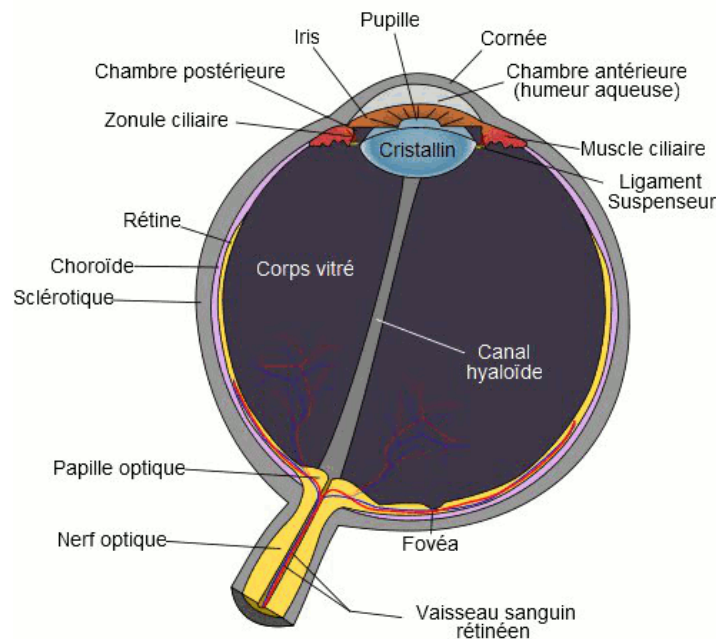


FIGURE 23 – Le globe oculaire

contraste et attire la vision centrale vers les différents éléments perçus.

Les bâtonnets et les cônes sont les seules cellules photoréceptrices présentes dans l'œil, elles sont connectées aux *cellules bipolaires*, elles-mêmes relayant l'information aux *cellules ganglionnaires*. Deux autres types de cellules sont présentes dans l'œil : les *cellules horizontales* et *amacrines* [Gregory, 2000] [Blake and Sekuler, 2006] [Yarbus, 1967].

Les mouvements oculaires et les stratégies visuelles : Dans notre approche de la vision, il est nécessaire de prendre en compte le système visuel dans des cas précis, de ne considérer que les cas non cliniques de la vision (mouvements volontaires) et dans des situations normales de vision binoculaire (aucune vergence présente, objet au-delà des *Punctum proximum*, etc.). Dans le cas d'un mouvement oculaire volontaire conjugué, nous allons aborder deux mouvements primordiaux : la *saccade* et la *poursuite*.

La saccade est le mouvement combiné des deux yeux pour permettre le changement de position du regard d'une cible vers une autre. Ce mouvement, permettant de centrer une cible sur la fovéa, est très rapide (jusqu'à $900^\circ/\text{s}$, en fonction de la distance angulaire à effectuer) et ne permet pas en lui-même la récolte d'information dans l'environnement bien que les cellules photoréceptrices fonctionnent normalement pendant un mouvement de saccade. [Latash et al., 2002] [Yarbus, 1967].

Lorsque les deux yeux maintiennent une cible en mouvement (relativement à l'observateur) dans la fovéa, le mouvement engendré est la **poursuite** (ou *dérive*). La poursuite oculaire est un mouvement lent avec une bonne acuité, elle permet de conserver la capacité d'extraction d'informations visuelles de la cible poursuivie. C'est un mouvement généralement associé à un mouvement de la tête pour faciliter la tâche dans le cas d'un mouvement angulaire important. [Yarbus, 1967]

Le dernier mouvement de l'œil que nous allons aborder est la **fixation**, permettant la meilleure observation possible d'une cible dans l'environnement [Yarbus, 1967]. Par son nom, il n'est pas un mouvement en lui-même, même s'il est composé de micromouvements involontaires. Ces micromouvements évitent la stimulation continue d'une cellule photoréceptrice qui entraînerait une cécité temporaire de cette cellule, mais conservent la cible dans la fovéa. C'est pendant ce non-mouvement que l'acuité visuelle est la meilleure et que la cible va être examinée avec le plus de discrimination spatiale.

Au regard de ces trois types de mouvements élémentaires, une **stratégie visuelle** peut être définie comme une séquences de saccades, de fixations et de poursuites.

3.3.3 Modélisation computationnelle de la perception du conducteur

De nombreuses recherches ont été effectuées sur la simulation de la perception par ordinateur, la vision artificielle, les méthodes et les outils utilisables pour intégrer dans un système les informations nécessaires sur son environnement. Dans notre cas, nous ne cherchons pas à faire le meilleur système de perception, nous cherchons à simuler l'humain par une modélisation se rapprochant de son fonctionnement à la fois biologique et cognitif.

3.3.3.1 La perception de l'environnement

La perception visuelle de l'environnement de l'humain se limite à ce que ses yeux perçoivent, nous nous limiterons donc au spectre optique (spectre électromagnétique compris entre 380 nm et 780 nm). De plus, pour conserver les limites biologiques de l'homme, nous devons simuler un système représentant les yeux de l'humain. Ce système simulera la vision photopique, avec un organe mobile, une acuité visuelle proche de celle de l'humain et permettant de définir les champs visuels que nous avons décrits plus haut.

Mais la vision ne se limite pas aux récepteurs sensoriels : dans notre cas, l'attention visuelle est un point très important. La perception visuelle est intimement liée à l'attention visuelle, qui permet au conducteur de réagir aux différents événements se produisant dans son environnement. La perception fait aussi appel à la notion de distraction visuelle. En effet, un défaut de reconnaissance ou de prise d'information peut provenir d'une distraction interne ou externe au véhicule, créée par une activité, une personne ou un objet tiers, qui détourne l'attention du conducteur de son activité de conduite. La distraction visuelle est l'un des enjeux de cette simulation, pour simuler au mieux la collecte d'informations.

L'environnement, avec ses objets et sa lumière, est perceptible. L'humain perçoit à la fois avec ses sens et son cerveau, mais aussi grâce à l'environnement lui-même, car c'est grâce aux différences dans *le champ optique ambiant* [Gibson, 1977] que les informations sont perceptibles. C'est par la stimulation de la rétine que les informations existent et selon Gibson [Gibson, 1979], la perception se fait directement, non pas sur une succession d'images sur lesquelles des traitements peuvent être effectués, mais sur l'extraction directe d'informations depuis le *champ optique* et l'intégration directe des *invariants*. Il est aussi très important de mettre en avant l'importance des relations entre observateur, observé(s) et environnement. En effet, à un instant donné, il n'est pas possible pour un observateur à un endroit donné de voir un observé dans son ensemble, il est factuel qu'une partie de l'observé est caché, *occlus*, ne serait-ce que par son orientation par rapport à l'observateur.

Mais, comme nous l'avons dit, la perception n'est pas uniquement basée sur les informations présentes dans le champ optique, elle est structurée par des schémas perceptifs qui structurent la recherche d'informations nécessaires à l'observateur [Neisser, 1976]. Il existe donc deux processus majeurs permettant d'observer l'environnement : l'exploration perceptive (processus Top-Down) dirigée par les connaissances de l'observateur, et l'intégration cognitive (processus Bottom-Up) dirigée par l'environnement. Enfin, [Leibowitz and Owens, 1977] nous dit que la vision périphérique est certainement gérée par un processus automatique, alors que la reconnaissance et les processus contrôlés utilisent la vision centrale. Cette approche de la perception visuelle nous permet de séparer le contrôle automatique de la vision périphérique, alors que la vision centrale va demander un contrôle de plus haut niveau, définissant ainsi l'attention visuelle nécessaire à l'observation volontaire d'un objet et au déploiement de schémas perceptifs.

3.3.3.2 L'exploration perceptive de l'environnement routier

Nous appellerons exploration perceptive le processus de recherche active d'informations dans l'environnement. Ce processus est dirigé par les connaissances du conducteur (comme les schémas de conduite) et par les besoins en information des autres processus actifs dans le système cognitif du conducteur (comme les processus cognitifs tactiques, par exemple). Nous pouvons scinder ce processus en deux sous-processus : l'exploration cognitive, qui dirige la recherche d'informations visuelles, et l'exploration perceptive, qui dirige le récepteur visuel pour la recherche d'informations. Mais le processus top-down complet intègre ces deux sous-processus, créant ainsi « l'exploration cognitivo-perceptive ».

C'est ce processus qui va focaliser dynamiquement l'attention visuelle du conducteur (en termes de mobilisation de l'oeil comme des ressources cognitives), en fonction du contexte de conduite et des manœuvres en cours d'exécution, permettant ainsi au conducteur de sélectionner en priorité dans l'environnement les informations pertinentes pour son activité en cours. [Baluch and Itti, 2011] proposent pour leur part de définir deux processus top-down, l'un plus volontaire, qui mobiliserait toute la chaîne cognitivo-perceptive, et le second non-volontaire, qui ne mobiliserait que l'exploration perceptive. Cette distinction est intéressante, mais pour notre part, nous focaliserons exclusivement nos efforts de modélisation de la perception humaine sur le premier processus, plus cognitif.

Pour simuler ce processus de « recherche active » de l'information, il est nécessaire de pouvoir diriger l'attention visuelle en direction d'une zone de l'espace dans l'environnement, ou en direction d'un objet connu, ou faire effectuer une rotation définie en amont à l'organe sensoriel de la perception visuelle : l'œil. En effet, si une représentation mentale tactique, courante ou anticipée, fait apparaître une lacune en information dans une zone qui est peut être importante pour l'accomplissement du sous-but tactique en cours, il est nécessaire d'aller chercher les informations présentes dans cette zone. Nous pouvons donc penser à un processus basé sur une liste de demandes de recherches, qui traitera en interne la direction du regard et la gestion de l'attention visuelle pour pouvoir aller chercher les informations demandées.

L'exploration cognitivo-perceptive est donc un processus *dirigé par les connaissances*, car il va produire les mouvements oculaires et les fixations nécessaires à la prise d'information à partir des schémas stockés en MLT. Ces fixations peuvent être étudiées lors d'expérimentations pour extraire des stratégies visuelles mises en place lors de la conduite afin de percevoir l'information pendant une tâche précise (dans notre cas, tourner à gauche dans un carrefour à feux). Ces

suites de regards dans des zones précises de l'environnement peuvent être associées aux schémas perceptifs au sens de Neisser que nous avons abordés plus haut. En effet, les schémas perceptifs sont des structures, des génotypes de suites de regards prévus et optimisés avec l'expérience afin de mieux percevoir l'environnement. Cette perception reste orientée par l'activité et les informations non pertinentes ne sont pas prises en compte dans l'optimisation. Il est donc naturel qu'un conducteur confronté à un but particulier (e.g. tourner à gauche) dans une infrastructure précise (e.g. carrefour à feux) déploie un schéma perceptif particulier pour extraire toutes les informations nécessaires à son activité (e.g. (i) contrôler la couleur du feu, (ii) contrôler la présence de véhicules sur la voie d'en face, (iii) contrôler la présence d'objets ou de personnes sur la zone de sortie du tourne-à-gauche).

Le processus top-down dirigeant la perception ne peut s'initier à partir de rien, il est nécessaire de fournir une base de départ à ce processus, pour que les schémas perceptifs s'activent et puissent déployer leurs suites de fixations. Pour cela, un autre processus fait partie de la perception visuelle, un processus qui dirige une partie de l'attention visuelle par l'environnement, le processus bottom-up.

3.3.3.3 L'intégration cognitive de l'information

Ce processus, que nous nommons intégration cognitive, est le processus permettant à l'observateur de prendre en compte des stimuli visuels qu'il n'avait ni prévus, ni anticipés, ni intégrés dans ses schémas perceptifs. Nous définissons l'intégration perceptivo-cognitive comme la compilation de deux sous-processus : l'intégration perceptive, qui vise à capter l'information et l'intégrer au niveau perceptif, et l'intégration cognitive, qui vise à intégrer l'information dans les niveaux plus cognitifs (opérationnel ou tactique). Le processus bottom-up complet intègre ces deux sous-processus, créant l'intégration perceptivo-cognitive.

De nombreuses informations de l'environnement visuel ne sont pas activement cherchées, et une partie des fixations composant notre attention visuelle globale ne sont pas dirigées par un processus de recherche active. Ces fixations, se dirigeant vers des éléments visuels qui ne sont pas déjà intégrés dans le schéma perceptif actif, visent à intégrer des informations notables de l'environnement. Ce processus se base sur le fait que, grâce au système récepteur, l'humain perçoit l'environnement comme un tout où il va piocher certaines informations.

C'est dans ce processus que le travail de Gibson est très intéressant, car représenter la perception avec un *flux optique* contenant l'information que l'observateur doit extraire permet d'intégrer facilement le fait que l'information dans une scène inconnue vient de l'environnement vers l'observateur. L'observateur ne va pas chercher l'information, il dirige son regard en fonction des différentes zones attirantes. L'environnement est perceptible et c'est grâce aux différences dans le *champ optique ambiant* [Gibson, 1977] que les informations sont perceptibles. Pour notre approche, cela entraîne deux choses primordiales : des informations peuvent provenir du « champ optique » et certaines zones de l'environnement attirent notre regard et notre attention visuelle.

Les champs visuels que nous avons définis à la section 3.3.2.3 intègrent deux parties distinctes : la fovéa et la vision périphérique. Les informations provenant du champ optique sont des informations intégrées par notre système cognitif provenant de notre vision périphérique (du champ visuel utile pour être plus précis, mais cette définition n'a pas encore été explorée du fait du dynamisme de cette définition). Ces informations permettent d'initier les schémas perceptifs,

mais permettent aussi d'enrichir la recherche active en interposant une attirance de l'attention visuelle vers une information parfois cruciale. La vision périphérique n'est donc absolument pas imperméable à toute entrée d'information. Par exemple, lorsqu'un véhicule entre dans notre vision périphérique, l'information est intégrée avant même que nous tournions le regard pour confirmer la présence du véhicule. Certes, cette information est souvent incomplète (e.g. couleur, type et modèle du véhicule), mais l'information principale permettant d'engager des actions est intégrée dans nos représentations.

L'attirance par notre vision périphérique de l'attention visuelle, et donc de notre fovéa en direction d'une zone de l'environnement, provient du fait que la vision périphérique est créée par des cellules photoréceptrices différentes de celles présentes dans la fovéa (cf. 3.3.2.4). Pour modéliser cette attirance, nous allons définir le concept de **saillance visuelle**. Ce phénomène désigne la mise en évidence des objets de l'environnement se distinguant des autres, ceux qui méritent le détour de notre regard. C'est une approche de la perception de bas niveau, qui n'intègre pas de traitement cognitif, elle permet de ne prendre en compte que le stimulus que reçoit l'œil. La saillance permet donc de définir des espaces de l'environnement où notre vision périphérique génère un signal neural plus important du fait d'un stimulus particulier. Une partie de l'information transite ensuite vers le niveau tactique et le stimulus peut, dans certains cas, attirer le regard de l'observateur

Une *carte de saillance* [Itti et al., 1998], permettant de définir point à point les zones saillantes dans une image [Itti and Koch, 2001], définit la préférence visuelle, l'objet ou zone spatiale ayant les propriétés les plus attirantes pour notre perception visuelle. Ces propriétés sont principalement liées aux couleurs, leur saturation et leurs contrastes [Brouard et al., 2009]. De plus, la vision humaine est plus sensible à certaines orientations dans l'espace, il est donc nécessaire de prendre en compte cette orientation [Gentaz and Ballaz, 2000]. Mais dans le cas de vision de scènes dynamiques, il est nécessaire de prendre en compte la composante temporelle de la scène et donc de considérer le mouvement dans cette carte de saillance. Selon les travaux de Jeremy M. Wolfe [Wolfe et al., 1989], le déplacement est une propriété très attirante pour le regard, il est donc nécessaire de prendre en compte le déplacement relatif d'un objet par rapport à l'observateur pour le calcul d'une carte de saillance. Enfin, comme nous sommes dans une approche de modélisation de la perception dédiée à la conduite automobile, la distance des objets saillants est aussi une composante importante.

L'intégration perceptivo-cognitive permet donc à la fois d'initier les schémas perceptifs (intégration perceptive), mais aussi d'intégrer une partie des informations présentes dans les représentations mentales (intégration cognitive). Ce processus ne permet pas l'observation totale d'une scène, tout comme le processus d'exploration perception seule, mais la combinaison des deux rend bien compte du fonctionnement de l'humain. Il perçoit son environnement en tenant compte des imprévus, il anticipe des situations, pour lui permettre d'évoluer dans un environnement dynamique et répondre aux buts que son activité lui impose.

3.3.3.4 L'élaboration de la représentation perceptive

La représentation perceptive est une représentation visuo-spatiale faisant partie du module de perception, contenant toutes les informations du monde directement extraites par le processus d'intégration perceptive. Cette représentation peut être vue comme la somme des informations

perceptives reçues par la rétine de l'œil, après traitement par l'aire visuelle corticale. Les informations y apparaissent dès lors qu'elles ont été détectées, par le système fovéal ou périphérique, avec une représentation correspondant à leur détection. Une information captée en vision fovéale sera précise, une information provenant de la vision périphérique sera plus grossière (perception des formes et des mouvements), mais elle pourra attirer l'attention du conducteur afin qu'il fixe telle zone de l'espace avec sa fovéa.

La représentation perceptive ne contient aucune donnée sémantique. Les informations perceptives sont « brutes », elles ne sont pas traitées comme des informations relatives à un but, mais contiennent tout de même les informations relatives à leur utilisation en trois dimensions, telles que la prise en compte de l'objet entier et non uniquement de la partie visible (occlusion, rotation mentale, etc.). Cette représentation concatène les trois étapes de [Marr et al., 1982]¹⁰, elle débute par les informations en deux dimensions provenant de l'œil, elle y intègre la profondeur, puis construit la représentation en trois dimensions.

C'est dans cette représentation que se réalise la reconnaissance de formes primitives constituant un objet, ce qui permet par la suite l'extraction des informations sémantiques de ces objets dans la représentation tactique. Certaines informations relatives aux objets présents dans le flux optique sont tout de même présentes dans cette représentation, c'est le cas du mouvement et du mouvement propre. En effet, les informations de mouvement reçues par l'œil sont nombreuses, et c'est par une fusion multisensorielle que l'humain va pouvoir estimer son propre mouvement ainsi que celui des éléments composant la scène se présentant à lui. Par exemple, un humain n'a pas conscience de ses mouvements de tête pendant son observation, sauf dans certains cas bien particuliers (e.g. mal des transports, intoxication alcoolique aiguë, etc.), mais ce mouvement est directement intégré dans la perception visuelle de l'humain.

3.3.4 Spécifications du module de perception

Comme nous l'avons souligné en début de chapitre, le développement d'un module de perception est essentiel pour permettre au modèle COSMODRIVE de percevoir et de se représenter « mentalement » l'espace routier, afin de pouvoir prendre des décisions et interagir adéquatement avec l'environnement situationnel et les autres usagers de la route. C'est à ce titre un composant crucial pour permettre la simulation dynamique de la cognition. Le développement de ce module était même le principal objectif de cette thèse : créer les points d'entrée des informations visuelles provenant de l'environnement en direction des représentations mentales visuo-spatiales.

Mais comme nous l'avons discuté précédemment, les fonctions de perception ne peuvent pas se concevoir indépendamment des fonctions cognitives, au premier rang desquelles se trouve la représentation mentale tactique (modèle mental visuo-spatial de l'environnement correspondant à la conscience de la situation du conducteur). Il convient donc impérativement d'inscrire la

¹⁰ [Marr et al., 1982] décrit la perception et l'interprétation d'une scène tridimensionnelle comme étant le résultat de trois niveaux d'analyse : (i) Traitement des intensités dans la scène, ce qui donne un ensemble de primitives en deux dimensions (primal sketch : première ébauche), (ii) Traitement des distances à l'observateur, ce qui donne une carte de profondeur (2.5 dimensionnal sketch : ébauche 2.5D), (iii) Correspondance entre l'ébauche 2.5D et les connaissances sur la scène pour donner l'ébauche 3D. Cette approche appréhende ainsi la perception comme une succession de trois étapes primordiales : (i) segmentation, (ii) reconstruction, (iii) reconnaissance. Cela afin de construire une représentation tridimensionnelle de la scène observée. Cette approche, niant l'utilité de toute connaissance a priori, a été beaucoup utilisée en vision artificielle.

perception du conducteur dans un cycle global de l'activité de conduite « Perception-Cognition-Action », où les représentations mentales alimentent la perception tout autant que la perception alimente les représentations mentales. Ces deux processus œuvrent le plus souvent de concert, pour permettre le pilotage du véhicule dans un environnement dynamique en perpétuelle évolution.

Ces caractéristiques générales de la perception du conducteur permettent de spécifier les principales fonctionnalités dont devra disposer le module de perception à implémenter. Pour cela nous allons commencer par expliciter l'architecture fonctionnelle de ce module, pour ensuite décrire les champs visuels simulés, puis spécifier les techniques nécessaires pour la création d'un « œil virtuel » intégrant notamment une « fovéa » simulée, composante privilégiée de ce récepteur sensoriel pour la perception et l'intégration des informations visuelles.

3.3.4.1 Spécifications fonctionnelles des processus et de l'architecture du module

Le module de perception est chargé d'assurer l'interface entre l'environnement et le modèle du conducteur. Pour cela, il doit extraire les informations visuelles dans la scène routière et les traiter pour pouvoir construire des représentations du monde extérieur, internes au modèle.

Au regard de la nécessité d'inscrire la prise d'information du conducteur dans un « cycle perceptif », ce module devra comporter au moins deux processus principaux de collecte et de traitement de l'information visuelle :

- Un processus bottom-up « d'Intégration Cognitive », qui sera dirigé par les données perçues dans l'environnement et qui sera en charge de traiter ces informations pour les faire remonter aux niveaux cognitifs
- Un processus top-down « d'Exploration Perceptive », qui sera dirigé par les connaissances (au premier rang desquelles les schémas de conduite de COSMODRIVE), et qui permettra d'orienter activement la perception du monde en pilotant « physiquement » l'œil du modèle.

Par ailleurs, ce module de perception doit pouvoir gérer les différentes demandes d'attention visuelle provenant de nombreuses sources différentes. Pour permettre cela, il est nécessaire d'intégrer au module une fonction de gestion lui permettant de manipuler des objets informatiques représentant ces demandes. Ainsi, le module de perception doit s'articuler autour d'une fonction de gestion qui dirige un œil dans l'environnement afin d'en extraire l'information puis la faire remonter en direction de la zone stockant l'information ainsi récupérable par le demandeur.

Enfin, le module de perception intègre un œil simulant l'appareil sensoriel visuel humain, il est donc nécessaire de faire un œil virtuel possédant des champs visuels différents intégrant une fovéa.

Pour diriger les processus internes au module de perception, il est nécessaire d'utiliser un système de communication permettant de lui transmettre des requêtes incorporant les besoins de positionnement de l'attention visuelle.

L'ensemble de ces considérations nous oriente vers le développement d'un processus de « Gestion des Stratégies Visuelles ». Ce processus recevrait, d'un côté (correspondant aux entrées du processus), des « demandes d'information » (en provenance des processus cognitifs tactiques ou stratégiques, par exemple, ou du module d'action en charge de piloter du véhicule) ainsi que des

« sollicitations perceptives » plus ou moins fortes, en provenance de l’environnement (fonction de la saillance ou de la prégnance des stimulations visuelles, par exemple). Le terme générique et neutre de « Requêtes Perceptives » pourrait être utilisé ici pour qualifier à la fois ces demandes et ces sollicitations. De l’autre côté (correspondant aux sorties de ce processus), ce gestionnaire affecterait les ressources (du point de vue de l’attention visuelle comme du point de vue du positionnement effectif du récepteur sensoriel) en fonction de règles de priorités et/ou de principes de gestion.

3.3.4.2 Modélisation du récepteur sensoriel : « l’œil virtuel »

La modélisation et la simulation de l’œil humain a fait l’objet de multiples travaux et constitue un domaine de recherche à part entière, ayant débouché sur de multiples propositions de solutions techniques. Dans le cadre de cette thèse, il s’agissait de limiter nos ambitions et nos objectifs, en ne simulant que certaines fonctions de cet organe complexe qu’est l’œil.

La première difficulté que nous avons préféré contourner est la simulation de la vision binoculaire. En effet, simuler le système binoculaire permettrait d’utiliser la différence entre les deux yeux pour, comme l’humain, estimer la distance des objets et leur vitesse, améliorer la vision en faible luminosité, etc. Mais la fusion de données nécessaires à cette simulation est trop lourde pour les gains apportés. Nous avons donc préféré nous baser sur un système monoculaire, qui permet par des moyens détournés de calculer la distance d’un objet ou sa vitesse et, par un traitement de l’image, améliorer la vision en faible condition lumineuse.

L’œil virtuel doit avoir un champ de vision total proche de celui de l’humain. Avec deux yeux, l’humain atteint un champ visuel total horizontal de 180° (150° par œil : 90° côté temporal, 60° côté nasal). L’œil virtuel devra donc simuler un champ total proche de 180° sans pour autant utiliser deux capteurs.

De plus, notre œil virtuel doit pouvoir simuler les mouvements les plus utiles à l’œil humain. Il est nécessaire de pouvoir créer des saccades, des fixations et des suivis de cibles (dérives). Nous pouvons nous dédouaner des micro mouvements (micro-saccades, micro-dérives et micro-tremblements) permettant à l’humain de faire varier la stimulation d’une cellule photoréceptrice pour lui éviter d’atteindre le niveau de saturation où celle-ci ne répond plus aux stimuli par une réponse neurale suffisante. De plus, notre simulation de l’œil sans la tête et ses mouvements nous permet de supprimer les mouvements oculo-vestibulaires (compensation des mouvements de la tête) et notre système monoculaire ne peut simuler les mouvements de vergence des deux yeux.

3.3.4.3 Modélisation des champs visuels

Pour un module de perception permettant de gérer les deux processus principaux de perception, il est nécessaire de séparer la vision fovéale du reste du champ de vision. En effet, l’attention visuelle est relative à la zone où se porte le regard de l’humain, il est donc nécessaire de définir un point central représentant le champ visuel fovéal de l’humain. Grâce à cela, nous pourrions diriger le regard du module de perception en direction d’un objet, d’un point ou d’une zone de l’environnement.

De plus, pour simuler le processus bottom-up, il est nécessaire de simuler la vision périphérique de l’homme. Pour cela, l’objet informatique représentant les organes visuels humains devra avoir un angle d’ouverture total proche du champ de vision total de l’homme ($\simeq 180^\circ$). Une fois cette

ouverture atteinte, il sera nécessaire d'intégrer la saillance visuelle sur ce champ visuel afin de définir quelle zone de ce champ attire l'attention visuelle.

Enfin, il est possible d'intégrer d'autres champs visuels pour une meilleure simulation de la vision humaine, comme la définition du champ visuel utile qui permet l'intégration d'une partie de l'information présente dans celui-ci avec ou sans attirance du regard, ou comme les champs de vision « veille » et « impression induite » qui eux aussi permettraient une remontée d'information sans passer par la zone fovéale.

3.3.4.4 Modélisation de la fovéa

La fovéa est la zone centrale de la macula, une zone de la rétine où la concentration en cônes est la plus haute. Elle est située dans le prolongement de l'axe optique. C'est dans cette partie de la rétine que l'acuité visuelle est la plus haute. Cette zone particulière du champ visuel global permet une bonne discrimination visuelle en pleine lumière, permettant ainsi l'extraction d'informations précises. Pour bien observer un objet, l'humain doit le conserver dans cette zone, afin d'intégrer les différentes informations visuelles. Pour simuler la fovéa, il nous est donc nécessaire de définir une partie du champ visuel de l'œil virtuel comme étant plus réceptif à l'information visuelle. Ainsi, les objets visibles dans cette zone pourront être observés finement pour en extraire les informations nécessaires. La simulation de la fovéa demande donc une capacité d'extraction d'information ainsi qu'une capacité de discrimination spatiale proche de celle de l'humain (une seconde d'arc). De plus, la fovéa ne doit pas dépasser cinq degrés d'angle d'ouverture au sein du champ visuel total.

3.4 Fonctions d'exécution d'actions

Ces fonctions cognitives sont en charge de modéliser et de simuler les compétences de conduite utilisées pour le contrôle du véhicule. Ces compétences sont utilisées pour répondre à une demande d'action provenant potentiellement de plusieurs sources différentes. La source principale de demande d'action est le module tactique, qui détermine une action ou suite d'actions permettant le bon déroulement du schéma tactique actif. Mais il est possible que le module d'exécution d'actions réceptionne des ordres d'action provenant de lui-même. En effet, c'est lui qui est en charge de la supervision d'une action en cours. Il peut donc générer une demande d'action pour réguler une action en cours, afin de l'améliorer. Il est aussi en charge de contrôler les situations critiques qui peuvent survenir, afin de donner le contrôle à la gestion d'urgence, où de nouveaux ensembles d'actions seront générés.

3.4.1 Modélisation du contrôle latéral et longitudinal

L'un des mécanismes de régulation de base utilisés pour modéliser l'activité de conduite au niveau sensorimoteur est la méthode des points de poursuite¹¹, qui a été initialement introduite pour contrôler la partie latérale du véhicule et les contrôles longitudinaux le long d'une trajectoire [Amidi, 1990] [Sukthankar, 1997] [Mayenobe, 2004].

¹¹Pure-Poursuit Point

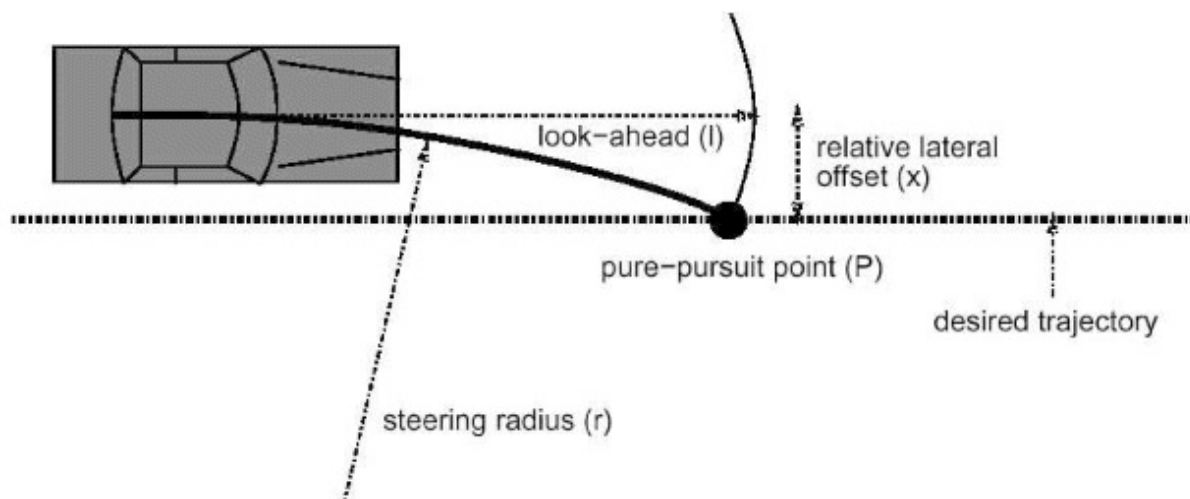


FIGURE 24 – Méthode des points de poursuite pure (de [Sukthankar, 1997])

Cette méthode se base sur la mesure du cap relativement à une droite de consigne, qui donne un braquage à appliquer au véhicule pour suivre cette droite de consigne. Dans la figure 24, P est le point de poursuite mobile avec le véhicule, x est la distance latérale séparant le centre du véhicule avec le point P, l est une constante définie par l'auteur comme étant une constante d'anticipation fixée à 15 (m) sur route et 25 (m) sur autoroute. Grâce à cela, nous obtenons la courbure $k = -2x/l$ qui est l'inverse du braquage nécessaire. Dans notre modèle, la droite de consigne est la droite passant au centre de la zone de déplacement que le conducteur est en train de parcourir. Les valeurs d'angle obtenues sont proches de celles observées chez les conducteurs humains [Reid et al., 1981]

En partant de l'approche de [Salvucci, 2006] dans le cadre du modèle IDM (cf.2.4.2), nous avons décidé d'utiliser deux points de poursuite pondérables à la volée, placés à une distance relative à la vitesse. Le premier point est placé à 0,6 seconde en avant du véhicule (correspondant à la fin de la zone enveloppe Rouge) et le second à 1,8 seconde en avant du véhicule (correspondant à la fin de la zone enveloppe Verte). Cela permet d'obtenir un système modifiable dans le cas de changement d'environnement. Nous obtenons deux points (A,B) qui à 50, 90, 130 km/h sont respectivement à (8,3 ; 25), (15 ; 45) et (21,5 ; 65) mètres. Les distances relatives permettent d'obtenir un point de prévision à 0,6 s et un à 1,8 s, ce qui offre la possibilité de retrouver les points d'anticipation définis par [Reid et al., 1981] à 15 et 25m en pondérant l'effet des deux points, ou les points proche et lointain de [Salvucci, 2006] utilisés pour réguler la position latérale dans le modèle du conducteur développé avec ACT-R. Par exemple, pour une conduite en zone urbaine limitée à 50 km/h, une pondération du point A à 0,6 et du point B à 0,4, nous obtenons un point moyen à 15 m et pour une conduite sur autoroute à 130 km/h une pondération de (0,9 ; 0,1) donne un point moyen à 25,85 m.

3.4.2 Modélisation du processus de gestion des interactions

Le second mécanisme de régulation utilisé dans le modèle COSMODRIVE pour la régulation latérale et longitudinale est la théorie des zones enveloppes (fig. 16, p.51). Ces zones, placées autour du véhicule et de longueur relative à sa vitesse, permettent un contrôle automatique

et inconscient de l'aspect latéral et de l'aspect longitudinal du déplacement en observant les obstacles entrant dans les différentes zones.

[Otha, 1993] apporte une étude sur les zones de sécurité et comment elles interviennent en situation de suivi. Il apporte aussi trois distances de suivi observées chez les conducteurs : danger (le temps au mobile suivi est inférieur à 0,6 seconde), critique (temps de 0,6 à 1,1 seconde) et confort (temps de 1,1 à 1,7 seconde). Les zones enveloppes utilisées dans le module opérationnel ont été définies comme relatives, car positionnées en fonction du repère du véhicule et de sa vitesse. Elles sont en mouvement constant dans les zones de déplacement successives définies par les schémas manipulés par le module tactique. Trois zones enveloppes ont été définies pour une utilisation opérationnelle dans le modèle : la zone de sécurité jusqu'à 1,8 seconde (verte), la zone de menace jusqu'à 1,2 seconde (orange) et la zone de danger jusqu'à 0,6 seconde (rouge).

Dans le cas où un obstacle est présent dans la zone de confort, le module opérationnel gère le déplacement latéral et longitudinal nécessaire pour éviter l'obstacle. Si l'objet est trop imposant, il sera nécessaire de stopper le véhicule, sinon, un évitement latéral peut suffire, sauf si le décalage latéral fait dépasser le véhicule sur la voie d'en face. Dans ce cas, la gestion des interactions remonte en direction du module tactique. Dans le cas où un obstacle apparaît dans la zone critique, la gestion latérale peut encore rester dans le module opérationnel, mais l'activation d'une conscience de criticité doit être faite. Dans le cas où un obstacle apparaît dans la zone de danger, le module opérationnel passe la main au module de gestion d'urgence qui pourra prendre le contrôle de la gestion de boucles très courtes de réaction pour éviter du mieux possible la situation critique.

Cette méthode des zones enveloppes est aussi appropriée pour la gestion des interactions entre les usagers de la route. En effet, comme nous l'avons dit, le modèle projette sur les autres usagers des zones enveloppes comparables aux siennes. Il apparaît donc que les différents mobiles de la situation ont des zones en avant de leur emplacement physique qui peuvent entrer en interaction avec les zones enveloppes du modèle. Dans ce cas, un conflit est détecté. Les conflits peuvent être de criticité différente, selon des valeurs représentées sous la forme d'une matrice de criticité (cf. fig. 19).

Dès que le véhicule est en mouvement, la gestion au niveau opérationnel des zones enveloppes engendre une activation constante de celles-ci. De plus, leur positionnement en avant du véhicule rend possible une forme d'anticipation automatique qui permet de faire remonter une information sur une situation, comme la criticité future de la situation à cause d'un conflit de zones enveloppes à venir, en direction du module tactique. En outre, cela donne la possibilité de passer d'une gestion automatique et inconsciente des actions vers une prise de conscience de la situation visant à gérer de manière plus cognitive et consciente les actions à entreprendre afin de conserver l'intégrité du véhicule et du conducteur.

3.4.3 Spécifications cognitives du module d'exécution d'actions

Pour pouvoir interagir avec l'environnement, notre modèle devra disposer d'un module d'exécution d'actions lui permettant de piloter un véhicule virtuel dans un environnement routier tridimensionnel. A ce niveau, nous pourrions nous appuyer sur les travaux antérieurs de [Mayenobe, 2004], mais il sera cependant nécessaire de refondre complètement l'existant afin de concevoir et de développer de toutes pièces un module d'exécution capable de piloter un véhicule virtuel

dans l'environnement SiVIC¹². Ce module devra notamment permettre de contrôler la position latérale et longitudinale du véhicule, en utilisant de façon combinée la méthode des points de poursuite (que nous avons définie à partir des travaux de [Sukthankar, 1997] et de [Salvucci, 2006]) et de la théorie des zones enveloppes de COSMODRIVE. Pour doter notre modèle de fonctions motrices effectives, il sera nécessaire d'implémenter ces différentes approches sur la plateforme numérique.

¹²Simulateur Vehicule-Infrastructure-Capteur

3.4. Fonctions d'exécution d'actions

Implémentation du modèle COSMODRIVE sur la plateforme de simulation virtuelle SiVIC

Ce chapitre est consacré au développement informatique du modèle COSMODRIVE¹ sur la plateforme SiVIC². Nous allons tout d'abord présenter notre méthode de développement, avec une description de la plateforme de simulation numérique SiVIC, ainsi qu'une description des outils que nous avons dû développer afin de permettre l'intégration de notre modèle à cette plateforme. Ensuite, nous décrirons les modules stratégique, tactique, perceptif et d'exécution d'actions tels que nous les avons implémentés. Enfin, nous présenterons quelques démonstrations de simulations numériques générées grâce aux développements informatiques du modèle cognitif. Cela permettra la *visualisation* du fonctionnement du modèle au sein de la plateforme SiVIC. Pour clore ce chapitre, nous aborderons rapidement quelques points importants soulevés par l'utilisation de l'outil informatique afin de simuler la cognition du conducteur.

4.1 Outils de développement

4.1.1 Description et spécificité de la plateforme SiVIC

SiVIC est une plateforme logicielle de simulation de l'environnement routier permettant de faire évoluer des modèles de véhicules avec leurs capteurs et leurs commandes dans un environnement numérique fidèle à la réalité. Développé au LIVIC³, cet outil se base sur une approche modulaire et a été conçu pour le développement et le prototypage d'algorithmes de perception. Cette plateforme offre plusieurs fonctionnalités pertinentes pour nos objectifs de modélisation numérique du conducteur :

- Possibilité de créer des simulations tridimensionnelles et dynamiques de l'environnement routier, nécessaires pour faire évoluer un modèle de conducteur mais aussi pour simuler les représentations mentales visuo-spatiales.
- Modélisation physique réaliste des mobiles et de leur dynamique (véhicules, motos, piétons, etc.), garantissant le réalisme des situations de conduite simulées et permettant à notre modèle de conducteur de piloter un véhicule dans l'environnement virtuel
- Simulation des capteurs de perception embarqués pouvant servir de support au développement des fonctions perceptives de notre modèle

¹Cognitive Simulation Model of the DRIVER

²Simulateur Vehicule-Infrastructure-Capteur

³Laboratoire sur les Interactions Vehicules-Infrastructure-Conducteurs

La plateforme **SiVIC** a été conçue pour le prototypage virtuel d'applications embarquées, imposant un haut niveau de réalisme concernant la simulation des scènes routières, les modèles de capteurs perceptifs (caméras, radars, télémètres laser, etc) et le comportement physique des véhicules. En effet, le développement d'algorithmes et de capteurs de perception sur des données réelles est un processus de développement long et coûteux. Il est nécessaire de les éprouver sur de nombreux essais, à partir des données recueillies en conditions réelles de conduite, y compris dans des conditions dégradées, et demandant l'utilisation d'un matériel approprié et coûteux. Une fois les données récoltées il est nécessaire de les intégrer dans l'algorithme pour ensuite l'améliorer.

La plateforme **SiVIC** est prévue pour faciliter ce processus de prototypage en générant virtuellement des entrées aux algorithmes similaires à celles générées par des capteurs réels embarqués à bord de véhicules. Il devient ainsi possible de générer autant de données que nécessaire, reproduisant fidèlement la situation et les capteurs, pour permettre non seulement le développement d'algorithmes, mais aussi pour en éprouver la robustesse et les limites de validité. Cette plateforme a été utilisée, par exemple, pour le développement de systèmes de cartographie mobile à scanner [Yoo et al., 2009] ou pour le développement d'algorithmes de détection de marquage au sol [Pollard et al., 2011].

Mais **SiVIC** est un outil particulièrement avancé pour la simulation de caméras et le rendu visuel de scènes routières, et ceci est un point très intéressant pour nos objectifs de modélisation numérique. En effet, les effets comme les brouillards (fig; 25(a)), l'éclairage de nuit (fig; 25(e)), la pluie (fig; 25(c)), etc. sont des conditions visuelles difficiles à simuler et souvent non réalistes. La plateforme **SiVIC** permet de bien modéliser ces situations permettant d'utiliser un rendu caméra proche de la réalité (figure 25) et donc d'utiliser des simulations de caméras numériques reproduisant une caméra réelle, permettant ainsi de reproduire certains effets (indésirables) de la perception du monde que peut avoir le conducteur automobile.

De plus, différents types de caméras peuvent être simulés (Fisheye figure 25(d) par exemple), tout comme les effets qu'elles subissent (la vitesse figure 25(f), par exemple). Ceci est rendu possible grâce à l'application de filtres sur les rendus caméras, mais aussi par une modélisation des caméras très proche de la réalité. En effet, les caméras sont réglables comme dans la réalité, avec les tailles d'objectifs, les tailles et précisions de capteurs, etc. Cela permet un rendu photoréaliste en entrée d'algorithmes de perception, qui prendra donc en compte les aléas environnementaux d'une caméra, comme l'éblouissement rendu par la **HDR** : **high dynamic range**, ou le flou de mouvement inhérent à une caméra pendant un déplacement [Gruyer et al., 2010b]. Ces spécificités de la plateforme de simulation seront potentiellement utiles dans la suite des développements relatifs à la modélisation cognitive par **COSMODRIVE** sur informatique, pour arriver plus tard à une version embarquée sur véhicule réel.

Enfin, nous pouvons noter que la plateforme **SiVIC** est un outil de simulation pour l'aide au prototypage et à la validation de systèmes avancés d'assistance à la conduite (ADAS⁴), une spécificité intéressante dans les futurs développements de notre modèle [Gruyer et al., 2011] [Gruyer et al., 2010a] [Gruyer et al., 2006] [Gruyer et al., 2005]. Il est ainsi possible de simuler, par exemple, la perception locale, la perception étendue, le contrôle du véhicule, les communications intervéhicules et véhicules-infrastructure, pour soutenir la phase d'analyse de faisabilité dans un cycle de développement en V, tester les algorithmes dans des situations critiques, vérifier les

⁴Advanced Driver Assistance Systems

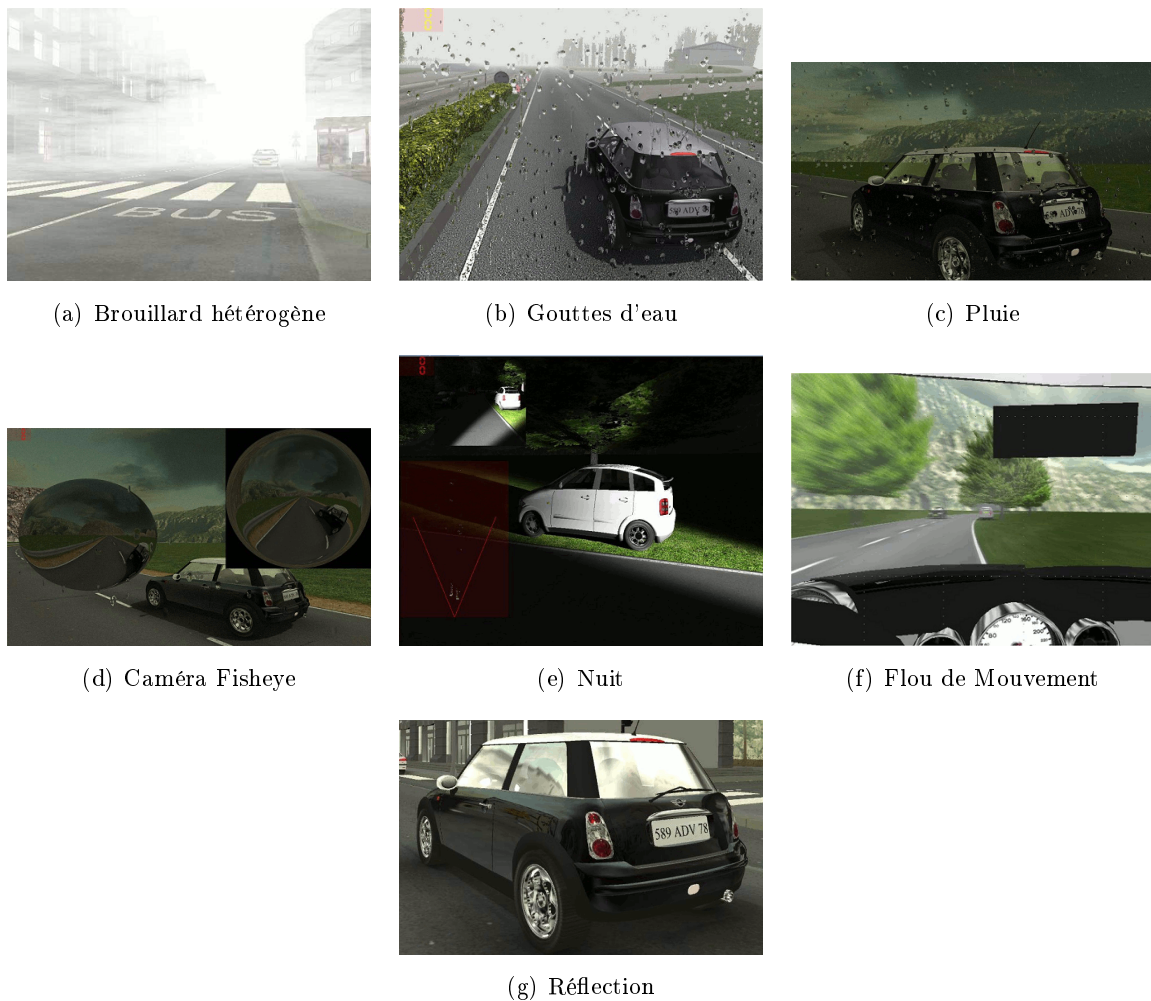


FIGURE 25 – Photos de rendus de la plateforme SiVIC

limites de ces ADAS, créer les « tests unitaires », les « tests d'intégration » et les « processus de validation », etc. [Gruyer et al., 2011] [Gruyer et al., 2010a]. De plus, SiVIC est prévu pour être interconnecté avec d'autres logiciels comme RT-MAPS ou Matlab, ce qui favorise grandement les options de développement des algorithmes et nous permettra d'utiliser ces logiciels pour la simulation de la cognition.

4.1.2 Environnements de développement

Le développement de notre modèle s'est fait par intégration à la plateforme SiVIC de DII⁵ permettant l'appel de fonctions et d'interfaces spécifiques à la modélisation cognitive du conducteur. Pour ce développement, nous avons utilisé l'environnement de développement Visual Studio 2005 de Microsoft Corporation, permettant l'utilisation du langage C++ et intégrant le framework .NET. Nous avons préféré le framework .NET de Microsoft au framework Qt⁶ de Nokia. En effet, le framework de la firme de Redmond permet de créer des liens rapides et une intégration pratique des bases de données gérées par SQL server. Par ailleurs, il est directement

⁵Dynamic Link Library

⁶Site internet de Qt

intégré à notre environnement de développement Visual Studio et nous recherchions la rapidité de développement sur la plateforme Windows.

Cet environnement de développement nous permet de modifier le code source de SiVIC et de notre interface, il nous est donc possible d'intégrer dans la plateforme des modules développés séparément et utilisant les informations internes de SiVIC. De plus, Visual Studio permet un accès rapide et pratique au système de gestion de base de données SQL server que nous utilisons à la fois pour la gestion des scripts de description d'environnement de SiVIC et la gestion de la sauvegarde de données de la plateforme de simulation.

Le logiciel Visual Studio intègre un compilateur et un débogueur. Hélas, ce dernier ne peut être utilisé à cause de l'empilement successif des couches non compatibles pour la plateforme SiVIC. En effet, comme nous l'avons dit, nous avons dû créer une interface intégrant la sortie du logiciel SiVIC pour un affichage plein écran, mais la plateforme de simulation est déjà elle-même un logiciel utilisant un autre logiciel. SiVIC utilise un moteur graphique nommé MgEngine, basé sur l'API⁷ OpenGL, pour afficher sa simulation calculée en parallèle du rendu visuel. Nous obtenons un système composé de : notre interface, SiVIC et le moteur graphique, chacun d'eux générant une ou plusieurs tâches (Thread) au sein du système d'exploitation. De ce fait, le logiciel de débogage n'arrive plus à reconnaître les imbrications successives et la position dans le système d'exploitation des emplacements mémoires alloués au logiciel. Il ne peut donc plus déployer ses outils utiles à l'analyse de bogues. Ainsi, l'intégralité de notre travail de développement s'est faite sans logiciel de débogage, il nous a donc été nécessaire d'appliquer des techniques d'analyse de bogues nous permettant de contourner ce manque, comme l'utilisation de la sortie standard (pour afficher une valeur à un moment précis d'un algorithme), de boîtes d'information (pour afficher une information ou prévenir de l'entrée dans une méthode, tout en bloquant l'interface le temps de l'affichage), ou de fichiers traces (permettant d'écrire des valeurs dans un fichier, afin de contrôler certaines variables ou certaines sorties de fonctions), etc. Ces techniques couramment utilisées avant l'utilisation massive d'outils de débogage n'empêchent en rien le développement, en revanche elles sont fortement chronophages.

Le développement de scénarii utilise aussi un environnement de développement particulier que nous avons créé. Il s'agit d'une interface se superposant à la sortie graphique de la plateforme de simulation, nous permettant de lui envoyer des ordres destinés à modifier l'environnement. Par exemple, le placement d'un objet se fait en plusieurs phases : la création d'un espace mémoire alloué pour l'objet, l'application des matériaux et des textures lui correspondant, la définition de sa position dans un système de coordonnées cartésiennes puis l'application de rotations suivant les mêmes trois axes (ou avec des quaternions). Cet environnement de développement de scénarii nous permet d'avoir les outils nécessaires à la création en simultané avec la visualisation en direct de notre travail, identique à celle du sujet futur.

Enfin, quelques autres outils de développement ont été utilisés, comme Excel pour Microsoft Visual Basic et la création de scripts de génération automatique d'environnements, Blender pour la création d'objets graphiques à intégrer dans SiVIC, ou SQL management studio pour la création de requêtes SQL permettant le traitement automatique des données brutes.

⁷Application Programming Interface : interface de programmation

4.1.3 Création de protocoles de communication

L'échange d'informations au sein du système **COSMODRIVE-SiVIC** est un point très important : d'une part, la plateforme **SiVIC** doit pouvoir synchroniser plusieurs représentations en même temps, d'autre part le modèle **COSMODRIVE** est basé sur une architecture modulaire nécessitant une communication inter-module (et intra-module). Nous avons donc créé, à partir de protocoles existants, des méthodes de communication permettant de faire transiter de l'information. Deux méthodes ont été créées : la première (**UDP**⁸) est simple mais permet une fréquence de communication importante, la seconde (**XMPP**⁹) se base sur une approche plus complexe permettant une meilleure structuration de l'information dans les messages.

Le protocole **UDP** est un des principaux protocoles de communication utilisés par internet, il permet le transfert de données de manière très simple. En effet, il ne possède pas de système de contrôle d'arrivée des messages. De ce fait, il est possible d'envoyer des informations à haute fréquence entre deux adresses IP. Ce sont ces aspects de rapidité et de simplicité qui nous permettent de l'utiliser afin de synchroniser la position des objets mobiles entre deux instances de **SiVIC**.

La communication **XMPP** entre modules dans le modèle **COSMODRIVE** est l'un des points les plus importants. En effet, le comportement d'un modèle du conducteur est basé sur le fonctionnement conjoint des modules composant ce modèle, il apparaît donc nécessaire qu'un système de communication efficace soit mis en place pour le transit d'informations entre les modules. Ces informations peuvent être de natures différentes, il est donc nécessaire de penser une communication modulable acceptant une grande partie des modules présents dans le modèle cognitif du conducteur automobile.

La communication dans le modèle passe par protocole **XMPP**, basé sur la librairie libre (GNU GPL) **Gloox**¹⁰. Chaque module du modèle est doté d'une capacité de communication pour recevoir et envoyer des messages aux autres instances/logiciels/machines connectés au serveur **XMPP**.

Le serveur de messagerie utilisé pour délivrer les messages est géré par le logiciel sous double licence publique générale GNU et propriétaire : **OpenFire**¹¹. La majorité de l'administration du serveur se fait par interface web, permettant d'ajouter, supprimer, gérer les utilisateurs du serveur, mais aussi de gérer les ports utilisés, le protocole d'authentification, etc. La création d'un tel serveur se fait simplement, en suivant les instructions du projet que nous pouvons trouver sur le site de l'éditeur.

Le serveur **XMPP** permet de transmettre des messages entre plusieurs instances connectées. Celles-ci peuvent être des instances de logiciels de messagerie couramment utilisés comme **Pidgin**¹², mais aussi des instances créées par le biais de la librairie **Gloox**. Ce serveur permet, tout comme les logiciels de messagerie instantanée, d'affecter des états particuliers pour les instances connectées, mais aussi de différer l'envoi de messages. Cette dernière option n'est pas pertinente pour l'utilisation que nous avons, il est donc nécessaire de la désactiver dans le serveur (elle est activée par défaut). En effet, au redémarrage d'une instance, il ne faut pas qu'elle reçoive d'anciens messages concernant une simulation antérieure.

⁸User Datagram Protocol

⁹Extensible Messaging and Presence Protocol

¹⁰<http://camaya.net/gloox/>

¹¹<http://www.igniterealtime.org/projects/openfire/index.jsp>

¹²<http://www.pidgin.im>

Dans le modèle **COSMODRIVE** implémenté sur **SiVIC**, les connexions au serveur de communication **XMPP** sont nombreuses, comme le montre l'exemple de la figure 26

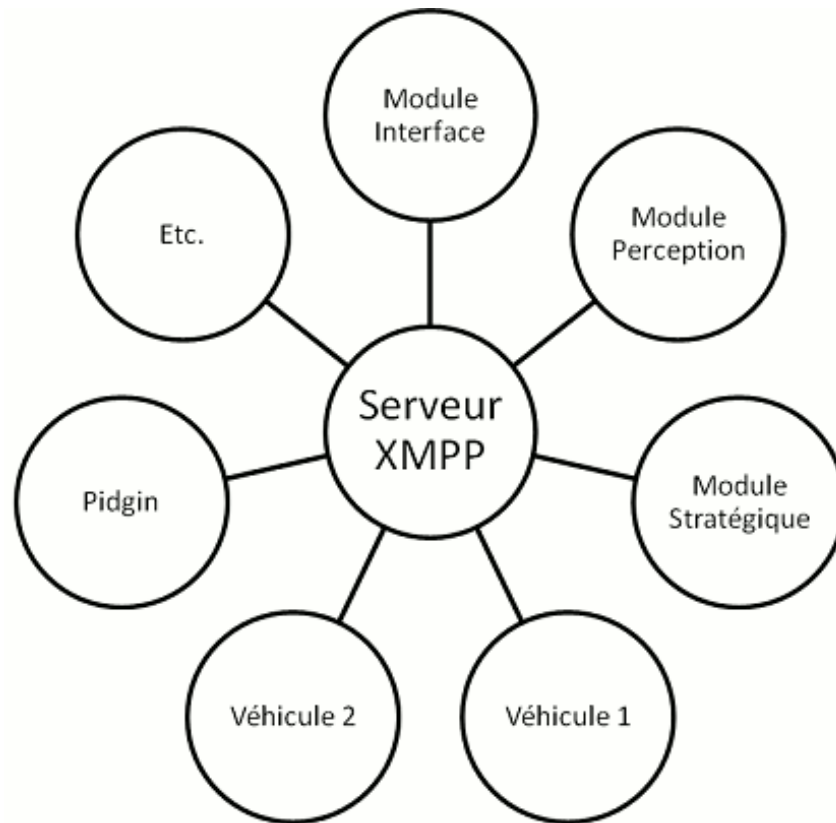


FIGURE 26 – Connexions au serveur XMPP

Chaque instance connectée au serveur peut émettre et recevoir des messages provenant de n'importe quelle autre instance. Les logiciels connectés au serveur par leur interface **XMPP** peuvent être sur une seule et même machine, sur plusieurs machines, voire sur plusieurs réseaux.

Les messages transmis par ce protocole comportent plusieurs éléments nécessaires : le type du message, le destinataire et le corps du message. Un quatrième est optionnel, mais permet l'ajout d'une extension au message (fig. 27). Pour les besoins du module de communication, l'élément « extension » est utilisé pour accueillir un « DataForm ». Un dataform est un conteneur pouvant être intégré à un message, il permet d'introduire, dans notre cas, un tableau de caractères à deux dimensions contenant les informations pertinentes du message.

Type de message : Nous n'utilisons que le premier type « Chat message » dans notre système de communication, ceci pour conserver le plus de possibilités. Nous pourrions penser à utiliser le type « groupchat message » en cas d'envois multiples d'un message de commandes pour plusieurs machines.

Corps du message : Le corps du message permet pour l'instant de différencier un message de type classique envoyé pour un module ou un message du type « command ». Ce dernier type permet d'exécuter une commande sur le simulateur depuis un poste distant.

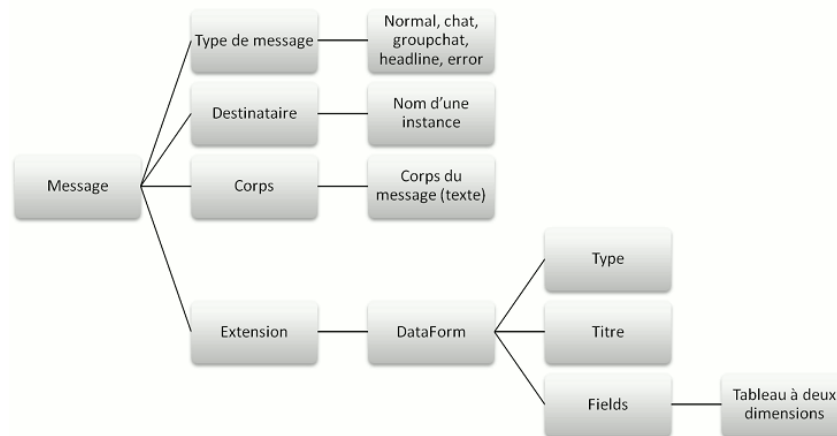


FIGURE 27 – Architecture d'un message XMPP

Extension DataForm : Le corps du message n'est qu'une suite de caractères, il n'est donc ni structuré ni ductile. L'utilisation de l'extension DataForm permet d'utiliser des tableaux de caractères dans le message et donc de structurer plus facilement son contenu. Dans certains cas, le Dataform peut aider à construire une instance d'objets nécessaires pour un module. Par exemple dans le module perception, chaque champ renseigné dans un DataForm est un champ pour paramétrer les attributs d'une nouvelle instance d'un objet « requête perceptive », qui est ensuite utilisée indépendamment par le module.

Un tel système de communication permet de connecter de nombreux logiciels différents (nous avons testé Matlab, le simulateur de conduite du LEPSIS¹³, le logiciel BIND, etc.), et permet donc de multiplier les plateformes pour la simulation cognitive du conducteur automobile, permettant ainsi d'utiliser les différents avantages de plusieurs outils. De plus, ce protocole est quasi-temps réel, ce qui signifie que le temps de latence entre l'envoi et la réception d'un message est de quelques millisecondes. Pour s'assurer de cela, nous avons fait quelques tests et nous obtenons un délai de transmission des messages inférieur à cinquante millisecondes (nos outils ne permettant pas une meilleure précision). Ce délai très court d'émission-réception des messages permet d'utiliser ce protocole de communication au sein du modèle COSMODRIVE.

4.2 Implémentation du module stratégique

Afin de rendre compte des spécifications décrites en section 3.1 p.55, nous avons développé un module dans SiVIC regroupant une simulation de fonctions cognitives nécessaires pour créer un réseau routier, planifier un itinéraire et réaliser un plan stratégique.

4.2.1 Planification d'itinéraires et déroulement de plan stratégique

Nous avons créé un module qui permet d'afficher une carte de l'environnement simulé par SiVIC. Cette carte est une vue aérienne de la zone globale, avec une option de zoom permettant de placer avec précision les points nécessaires aux déplacements effectués dans l'environnement. Ces points composent l'ensemble des sommets du graphe décrivant le plan stratégique du conducteur.

¹³Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations

Ce module informatique permet aussi de relier chacun de ces points à un de ses semblables afin de créer l'ensemble des arcs composant le graphe. Les objets C++ qui représentent ces objets (arcs et sommets du graphe) contiennent des paramètres permettant de simuler les caractéristiques qui leur sont attribuables. Par exemple, à la création d'un arc, celui-ci possède des champs « longueur », « nom de la rue » et « vitesse limite imposée » en plus de ceux nécessaires à l'utilisation informatique comme l'identifiant unique. Chacun de ces objets est enregistré dans une base de données réservée au module stratégique pour une utilisation future. Cela permet de construire un ensemble de plans stratégiques, simulant ainsi une partie de la MLT¹⁴ contenant l'ensemble des connaissances stratégiques du conducteur.

L'ajout, la visualisation, la modification ou la suppression d'un point ou d'un arc du graphe ou des paramètres se fait de manière graphique avec une interface affichant le graphe de manière synchrone avec la carte de l'environnement. Cela permet de sélectionner un point et d'afficher ses paramètres.

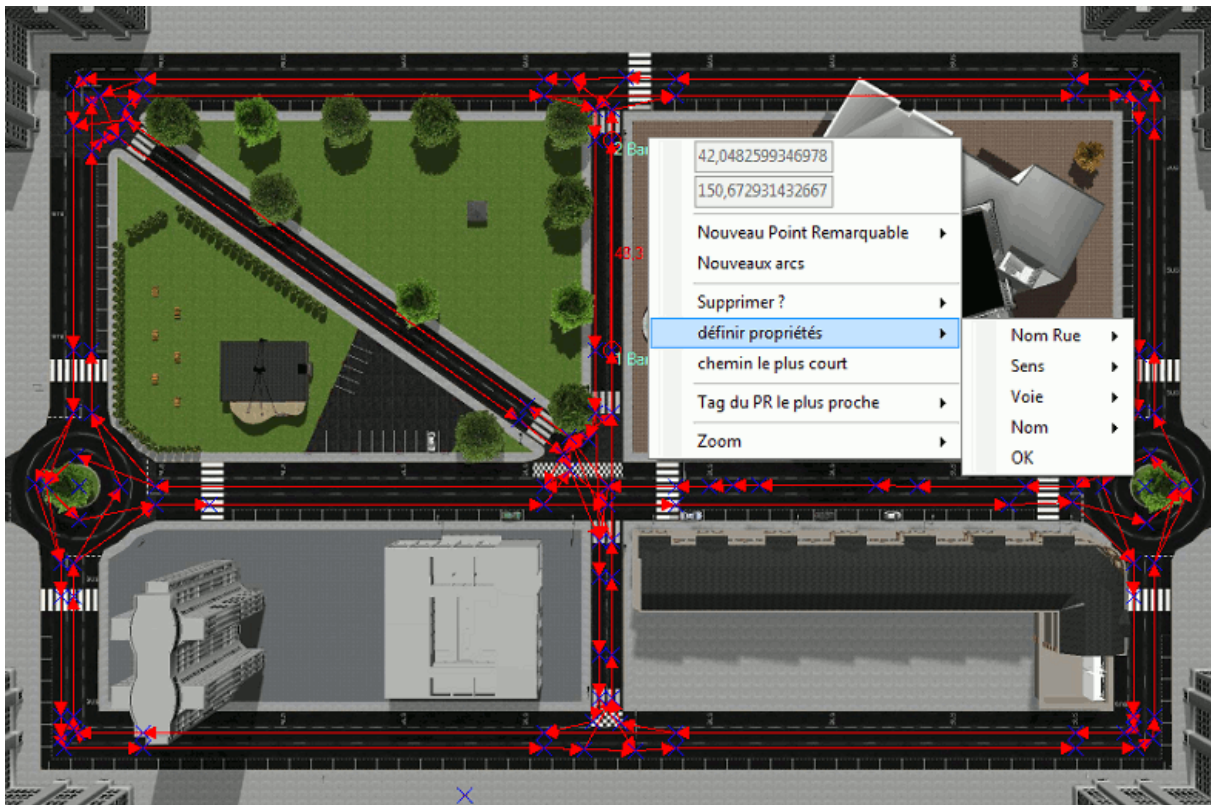


FIGURE 28 – Capture d'écran de l'interface du module stratégique

Le module stratégique ainsi structuré permet de définir un point A de départ et un point B d'arrivée avec, si nécessaire, des points de passage en nombre important¹⁵. Une fois ces informations collectées, le module stratégique calcule le chemin de plus court pour relier le point A au point B en passant par les éventuels points de passage définis. Les paramètres inclus dans les arcs permettent de calculer un trajet en fonction de la distance et du temps nécessaire à le parcourir, grâce aux caractéristiques de vitesse des portions de route. De plus, il est possible de

¹⁴Mémoire à Long Terme

¹⁵Nombre maximal stockable dans une structure integer = 2 147 483 647

prévoir l'itinéraire en tenant compte par exemple de l'habitude de prendre un tronçon, ou de l'affinité avec un sous-itinéraire.

Pour le calcul en lui-même, nous avons développé une fonction basée sur l'algorithme de Dijkstra [Dijkstra, 1971]¹⁶, qui est optimisé pour la recherche du plus court chemin, ce qui nous permet d'obtenir une complexité d'algorithme de l'ordre de $O((mn) \ln(n))$ avec n le nombre de nœuds et m le nombre d'arcs composant le graphe. Ainsi, le module stratégique consomme peu de ressources à l'ordinateur pendant le calcul d'un itinéraire. Une fois le calcul terminé, la fonction intègre au module un ensemble de points créant l'itinéraire sélectionné, ainsi qu'une liste de pointeurs vers les différents points, permettant un accès rapide à un point dans l'itinéraire. De plus, il est possible de lancer un nouveau calcul à partir d'une nouvelle position de départ afin de changer l'itinéraire pendant son déroulement.

4.2.2 Réalisation d'un plan stratégique

Une fois l'itinéraire calculé, le module stratégique envoie les points à rallier au module tactique pour définir les buts à atteindre. Ces points sont envoyés au fur et à mesure de l'avancement du modèle dans le plan stratégique, permettant ainsi la gestion d'erreurs potentielles dans le plan. Pour transmettre ces informations, le module stratégique utilise le protocole de communication XMPP que nous avons développé. Ainsi, il peut communiquer par messages, contenant les informations nécessaires, avec le module tactique. Ce dernier les réceptionne et les intègre dans la représentation mentale tactique courante (et ses dérivées temporelles potentielles).

4.3 Implémentation du module tactique

Dans les chapitres précédents, nous avons vu que le conducteur élaborait une représentation mentale visuo-spatiale de la situation à partir des informations prélevées dans l'environnement routier. Cette représentation est construite à partir d'un schéma de conduite qui est apparié au réel. Une fois instancié, ce schéma constitue la représentation tactique courante correspondant à la conscience de la situation du conducteur et à partir de laquelle il construira des représentations anticipées lui permettant de faire des prévisions sur l'évolution de la situation et de prendre ses décisions.

Les représentations mentales occupent ainsi une place prépondérante dans le module tactique COSMODRIVE. Il est donc nécessaire de pouvoir les construire au sein du modèle informatique, pour permettre à la fois la simulation numérique de la cognition, mais aussi pour pouvoir visualiser l'activité mentale du conducteur. Le caractère visuo-spatial des représentations mentales est bien supporté par la plateforme de simulation SiVIC qui permet de créer des simulations d'environnements dynamiques en trois dimensions. Mais la structuration des représentations mentales du conducteur se base aussi sur des connaissances : les *schémas de conduite*.

Ainsi, afin de simuler les fonctions cognitives tactiques de notre modèle, il sera tout d'abord nécessaire de définir un formalisme pour l'implémentation informatique des schémas de conduite sur SiVIC, puis de spécifier le processus d'appariement permettant d'instancier un schéma à la réalité physique de l'environnement routier. Une fois instancié au réel, le schéma tactique pourra permettre au modèle de « charpenter le monde » autour d'une structure informatique capable

¹⁶Algorithme de Dijkstra sur Wikipédia

d'accueillir les informations provenant du module de perception et, au-delà, lui permettant de comprendre la situation, de prendre des décisions et de planifier des actions.

4.3.1 Génération des représentations mentales tactiques : Instanciation de schémas de conduite

4.3.1.1 Formalisme pour l'implémentation des schémas de conduite : la théorie des graphes

Du point de vue cognitif, un schéma de conduite est une représentation fonctionnelle de l'environnement routier permettant au conducteur de se déplacer dynamiquement afin d'atteindre un but tactique. Du point de vue informatique, il est donc nécessaire de définir une structure computationnelle permettant de soutenir l'implémentation informatique des schémas tactiques sur SiVIC et de simuler leur utilisation par le système cognitif du conducteur.

Tout d'abord, un schéma tactique, tel que décrit dans la section 2.5.4.2, doit permettre de générer une *trajectoire* à parcourir qui sera transmise au module d'exécution d'actions. Il est donc nécessaire de pouvoir construire cette trajectoire à partir du schéma. Nous avons décidé d'utiliser la trajectoire comme élément primaire de nos schémas tactiques numériques. Pour construire ses trajectoires, le conducteur utilise des points de repère dans l'environnement, les *points remarquables*, que nous avons donc décidé d'intégrer à nos schémas. De plus, les schémas tactiques contiennent des *zones de déplacement* et des *zones d'exploration perceptive* permettant de structurer fonctionnellement l'espace routier. Les zones de déplacement peuvent être représentées par deux points, correspondant aux états *Initial* et *Final* de la zone, reliés par une trajectoire permettant de passer d'un état à l'autre. En pratique, l'état initial d'une zone correspond généralement à l'état final de la zone précédente, si bien qu'un schéma peut être modélisé comme une séquence de « *Fins de zones* » reliées par une trajectoire. Si la zone de déplacement est courbe, il est possible d'appliquer un rayon de courbure à la trajectoire. Chaque portion de route définissant une trajectoire entre deux points doit aussi pouvoir être enrichie d'informations événementielles, quelles qu'elles soient. Les zones d'exploration perceptive peuvent pour leur part être assimilées à un point de fixation dans l'espace assorti d'un rayon d'observation permettant d'explorer la zone perceptive dans son ensemble, ce qui revient à définir mathématiquement cette zone dans l'espace tridimensionnel comme une sphère.

Sur la base de ces spécifications conceptuelles, nous nous sommes tournés vers la théorie des graphes pour pouvoir modéliser et implémenter informatiquement les schémas tactiques sur SiVIC. En effet, nous pouvons considérer l'ensemble des « fins de zones de déplacement » et/ou des « points remarquables » comme les *sommets* d'un graphe, et l'ensemble des trajectoires joignant les points de fin de zones de déplacement comme les *arcs* d'un graphe. Celui-ci peut être cyclique (e.g. schéma d'un rond-point), orienté (une trajectoire se définit avec un sens) et non-connexe (certains points remarquables ne sont pas reliés à une trajectoire), mais il existe toujours une ou plusieurs composantes fortement connexes incluses dans ce graphe (le parcours de A vers B est fortement connexe, par définition d'une trajectoire).

Ainsi, nous proposons de modéliser les schémas de conduite tactiques au moyen de graphes composés de deux types d'éléments : des « sommets » et des « arcs », ayant certaines caractéristiques (chacun de ces éléments doit être accompagné d'un identifiant unique pour ce graphe nommé ID_{type})

- Les sommets du graphe peuvent correspondre aux éléments suivants :
 - Début et Fin de zone de déplacement (ID_{dep} , coordonnées cartésiennes, condition n pour dépasser l'état final (e.g. vérifier un ID_{perc}))
 - Points Remarquables de l'environnement (ID_{pr} , coordonnées cartésiennes, correspondance avec ID_{dep} , Nom)
 - Point Barycentrique d'une zone perceptive (ID_{perc} , coordonnées cartésiennes, rayon d'action)
- Les arcs du graphe représentent les différentes trajectoires reliant certains sommets entre eux (ID_{arc} , ID_{dep1} , ID_{dep2} , longueur, largeur de la zone de déplacement, courbure, vitesse max, etc.)

Pour faciliter la visualisation d'un tel graphe représentant un schéma tactique, la figure 29 présente un exemple de trajectoire rectiligne (courbure = 0), représentée en deux dimensions, avec comme graphe relatif :

```

GrapheLigneDroite(
{  $ID_{dep1}(x_1, y_1, z_1)$ ,  $ID_{dep2}(x_2, y_2, z_2, ID_{perc1})$ ,
 $ID_{perc1}(x_3, y_3, z_3, r_1)$ ,
 $ID_{pr1}(x_4, y_4, z_4, bordRoute1)$ ,  $ID_{pr2}(x_5, y_5, z_5, bordRoute2)$ ,
 $ID_{pr3}(x_6, y_6, z_6, ID_{dep1}, medianRoute)$ ,  $ID_{pr4}(x_7, y_7, z_7, ID_{dep2}, medianRoute)$  },
{ $ID_{arc1}(ID_{dep1}, ID_{dep2}, longueur_1, largeur_1, courbure (=0), vitesse\_max_1, )$ , } )

```

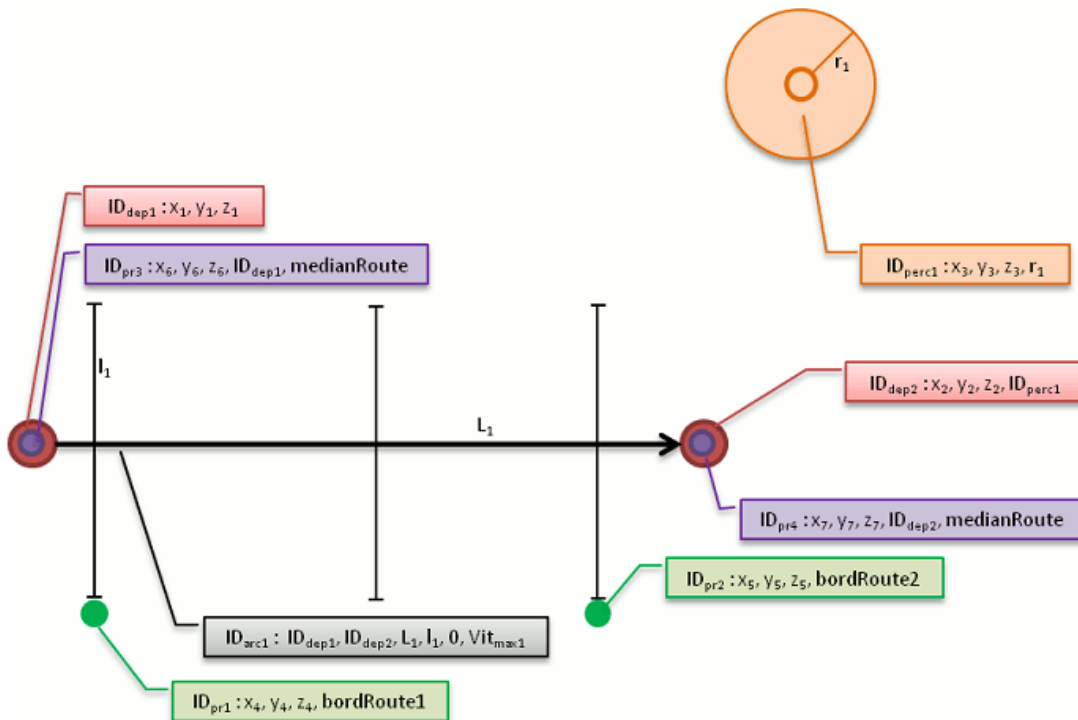


FIGURE 29 – Exemple d'un graphe représentant un schéma tactique de ligne droite

Le graphe relatif à un environnement possède tous les points remarquables possibles de l'environnement, sans prendre en compte la position et les buts du conducteur. Il est en revanche

possible d'extraire plusieurs sous-graphes de cette description d'une catégorie d'environnement. Ainsi, on peut par exemple sélectionner un sous-graphe connexe non cyclique permettant de répondre à un but local : le sous-graphe des {début et fin de chaque zone permettant d'aller du point A au point B, et les zones perceptives associées} en passant par {les trajectoires les reliant entre eux}. Pour obtenir le graphe relatif à un environnement dont s'approche le conducteur avec un but tactique particulier à atteindre (comme tourner-à-gauche, par exemple), il est donc nécessaire de reconnaître le graphe générique de la catégorie d'environnement dont on s'approche, puis d'extraire le sous-graphe permettant d'atteindre le but visé.

Grâce à la description des points remarquables proposée par [Mayenobe, 2004], nous pouvons modéliser un environnement grâce à la position de points dans l'espace décrivant des caractéristiques physiques visibles de cet environnement. Par exemple, un point remarquable est présent au centre d'un croisement nommé « centreIntersection » ([Mayenobe, 2004], p.83), qui définit l'origine du référentiel dans lequel sont exprimées les coordonnées des autres points remarquables du carrefour. Ce point ne peut exister dans le cas d'un environnement de type « ligne droite » car les points définissant les bords de voies dans ce dernier environnement ne cessent jamais d'exister. Dans une infrastructure de type « croisement », la route qu'emprunte le conducteur va rencontrer une autre route perpendiculaire à la sienne. Les points de bords de voies sont donc présents jusqu'à la rencontre avec l'autre route, c'est-à-dire jusqu'à ce que les points de bords de route se confondent avec l'entrée effective dans le carrefour (voir fig 30).

Le conducteur d'un véhicule explore visuellement ces points remarquables dans l'environnement, sans pour autant en avoir conscience. Il apparaît clairement qu'un conducteur observe les bords de voies, sans quoi son véhicule entrerait régulièrement en contact avec le trottoir. De plus, le centre du carrefour n'est pas uniquement le centre géométrique. C'est grâce à ce centre, possédant une localisation laissée à l'appréciation du conducteur, que ce dernier va placer son véhicule pour entamer une manœuvre de tourne-à-gauche avec une approche par contournement (passer derrière le véhicule venant d'en face, tournant lui aussi à sa gauche) ou par évitement (passer devant le véhicule venant d'en face, tournant lui aussi à sa gauche).

Malgré l'aspect relatif du positionnement effectif de certains points remarquables, il reste immuable que chaque point se situe dans une zone de l'environnement approximativement connue. Il est ensuite possible de l'explorer visuellement pour permettre une découverte plus précise. Par exemple, le centre du carrefour est relativement proche du centre physique et géométrique du carrefour, mais il est nécessaire d'explorer visuellement le carrefour pour en situer le centre. Il est donc possible de rechercher une partie des points remarquables d'un environnement avec des algorithmes de détection (via une procédure de balayage visuel). Par exemple, les points de bords de voies peuvent être détectés par un algorithme de détection des marquages au sol [Pollard et al., 2011] ou de bords de trottoirs. Une fois un certain nombre de points détectés, et principalement celui définissant le centre du carrefour, il est possible de positionner les autres en extrapolant leur position grâce à celle de leurs semblables et aux détections faites par algorithmes. Par exemple, une fois le centre du carrefour et trois des coins du carrefour détectés, il est possible d'extrapoler la position du quatrième coin. Ensuite, la détection des marquages au sol permet de définir les bords de voies et de routes, puis d'en extrapoler les centres de voies et de chaussées. Enfin, la détection de feux tricolores permet de définir les points remarquables relatifs à ceux-ci.

Grâce à cela, il est possible d'informer le module tactique et son générateur de représentations tactiques de la position de ces points pour qu'il instancie en conséquence la représentation mentale

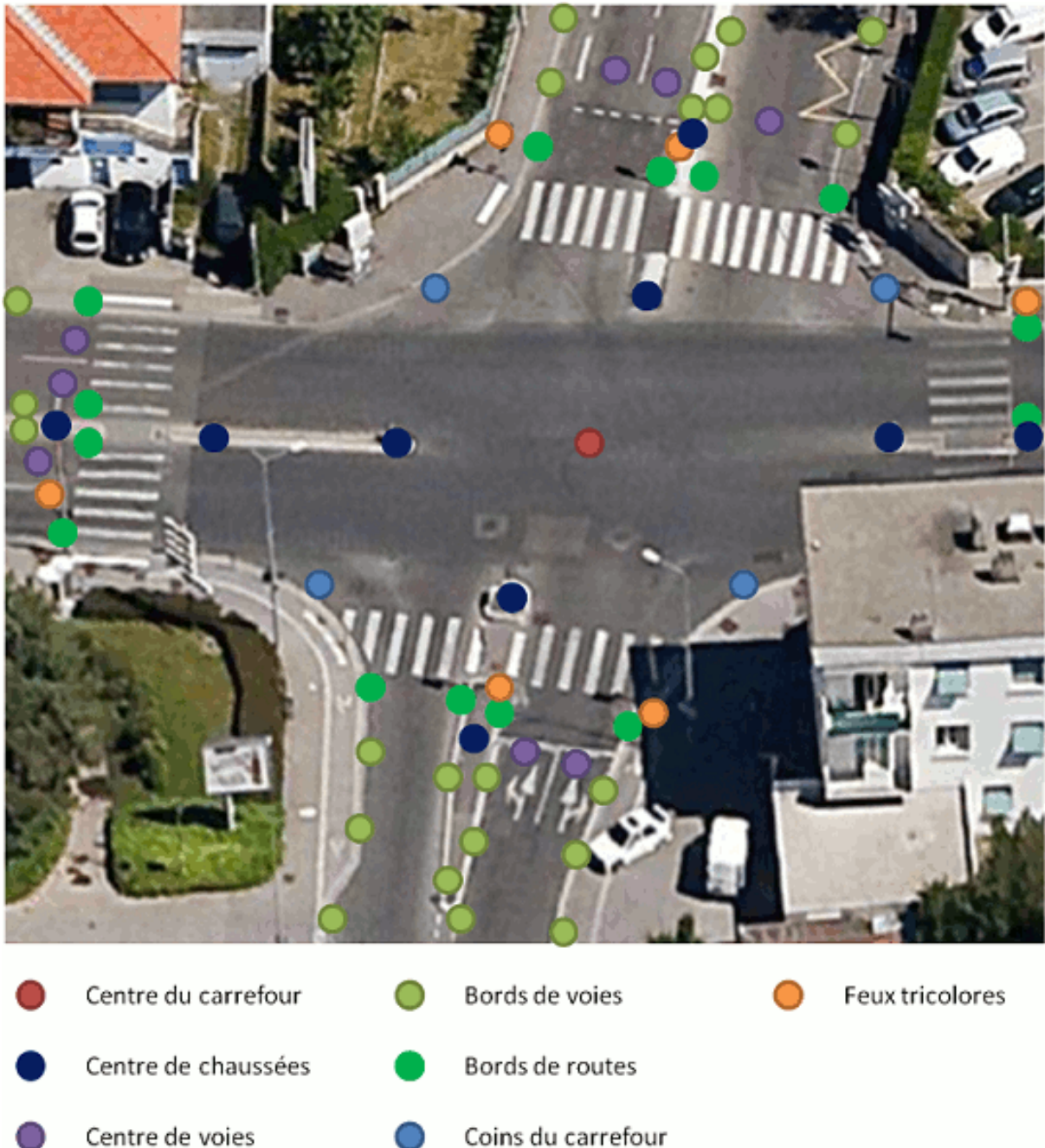


FIGURE 30 – Exemple de points remarquables dans un environnement de croisement

de la situation.

Une fois les points remarquables de l'environnement intégrés par le modèle, il est nécessaire de trouver quel schéma tactique générique doit être utilisé dans cet environnement. Pour cela, nous avons une base de connaissances comportant plusieurs schémas tactiques, organisés selon une hiérarchie. Nous pouvons commencer par éliminer des choix possibles les schémas ne correspondant pas au but local défini par le module stratégique. Par exemple, si le but est « tourner à gauche », nous ne sélectionnons que les schémas tactiques relatifs aux tourne-à-gauche. Ensuite, nous avons un ensemble de points remarquables dont la position a été mesurée dans l'environnement et un

ensemble de points définissant une partie du graphe-schéma. Il est nécessaire de reconnaître quel graphe correspond le mieux à l'ensemble des points remarquables de l'environnement.

4.3.1.2 Processus d'appariement des schémas de conduite

Pour implémenter informatiquement le processus d'appariement d'un graphe (correspondant à un schéma de conduite présent dans la base de connaissances) avec l'environnement routier, ce qui n'a pas encore été réalisé à ce jour, il doit être possible d'utiliser les cartes auto-adaptatives et l'algorithme de Kohonen (réseau de neurones artificiels basé sur un apprentissage non supervisé). En effet, « la carte auto-adaptative est particulièrement efficace dans diverses tâches de reconnaissance de formes impliquant des signaux très bruités »¹⁷. Avec des cartes auto-adaptatives, il serait ainsi possible de comparer les modifications à réaliser pour qu'une carte puisse appairer les points remarquables extraits de l'environnement avec les points remarquables contenus dans différents schémas génériques, le schéma conservé au final étant celui nécessitant le moins d'adaptation de la carte.

D'une façon plus détaillée, ce processus d'appariement (présenté en figure 31) devrait intégrer, selon nous, trois étapes principales. Tout d'abord, la carte auto-adaptative devra s'adapter à la géométrie des points remarquables extraits de l'environnement. Une fois cette première phase effectuée et enregistrée, il conviendra de présenter à la carte auto-adaptative les différents schémas tactiques génériques « candidats », pour que la carte s'adapte à leur géométrie respective. Il s'agira ensuite de mesurer la quantité d'adaptations nécessaires pour procéder à l'appariement avec chacun des schémas génériques présentés. Le schéma demandant le moins d'adaptation (donc le plus proche de la situation réelle) pourra alors être sélectionné en tant que schéma tactique à activer et à utiliser dans cet environnement.

Une fois ce schéma tactique générique sélectionné, il sera alors nécessaire de l'instancier plus précisément à la géométrie réelle de l'environnement routier. A ce niveau, on pourrait utiliser les résultats de la carte auto-adaptative pour modifier la position relative de certains points remarquables du schéma générique ainsi que la longueur des arcs le composant, ceci afin de permettre une bonne corrélation entre les points remarquables extraits par les algorithmes de perception de l'environnement et les points remarquables contenus dans le graphe générique modifié. Ceci réalisé, les autres points du graphe étant relatifs à ceux modifiés, ils s'en retrouveront eux aussi déplacés, et le schéma générique sera alors complètement instancié à l'environnement réel.

Pour optimiser ce processus d'appariement, il serait possible de diminuer le temps de calcul en procédant à un « écrémage » du nombre de schémas tactiques à comparer. En effet, si le module stratégique connaît en temps réel la position du véhicule sur le plan stratégique (cf.4.2), il est possible d'ajouter aux sommets du graphe stratégique des caractéristiques permettant d'éliminer des solutions dans les différents graphes tactiques génériques existant dans la base de connaissances. Grâce à cela, il devient possible de pré-sélectionner une partie des schémas tactiques potentiellement éligibles pour un nouvel environnement, ce qui diminuera le temps de calcul induit par l'utilisation de cartes auto-adaptatives.

¹⁷ « the Self-Organizing Map has been particularly successful in various pattern recognition task involving very noisy signals. » [Kohonen, 1990],p.1

Pour visualiser concrètement ce que produirait une telle procédure d'appariement implémentée informatiquement selon ces principes, nous allons considérer l'exemple du schéma tactique de « Tourne-à-gauche » de COSMODRIVE que nous avons initialement discuté en section 2.5.4.2 (figure 15), et qui est représenté en figure 32 sous la forme d'un graphe. Chaque point présent dans le schéma est positionné dans le référentiel du centre du carrefour. Pour ne pas surcharger cette figure, seuls sont représentés ici les arcs relatifs au but tactique « tourner à gauche ». Par conséquent, le seul sous-schéma connexe extractible dans la base est le « schéma de tourne à gauche » (mais une figure complète posséderait tous les « ID_{perc} » et « ID_{dep} » relatifs aux trajectoires permettant d'aller tout droit ou de tourner à droite, et cela pour chaque entrée du carrefour).

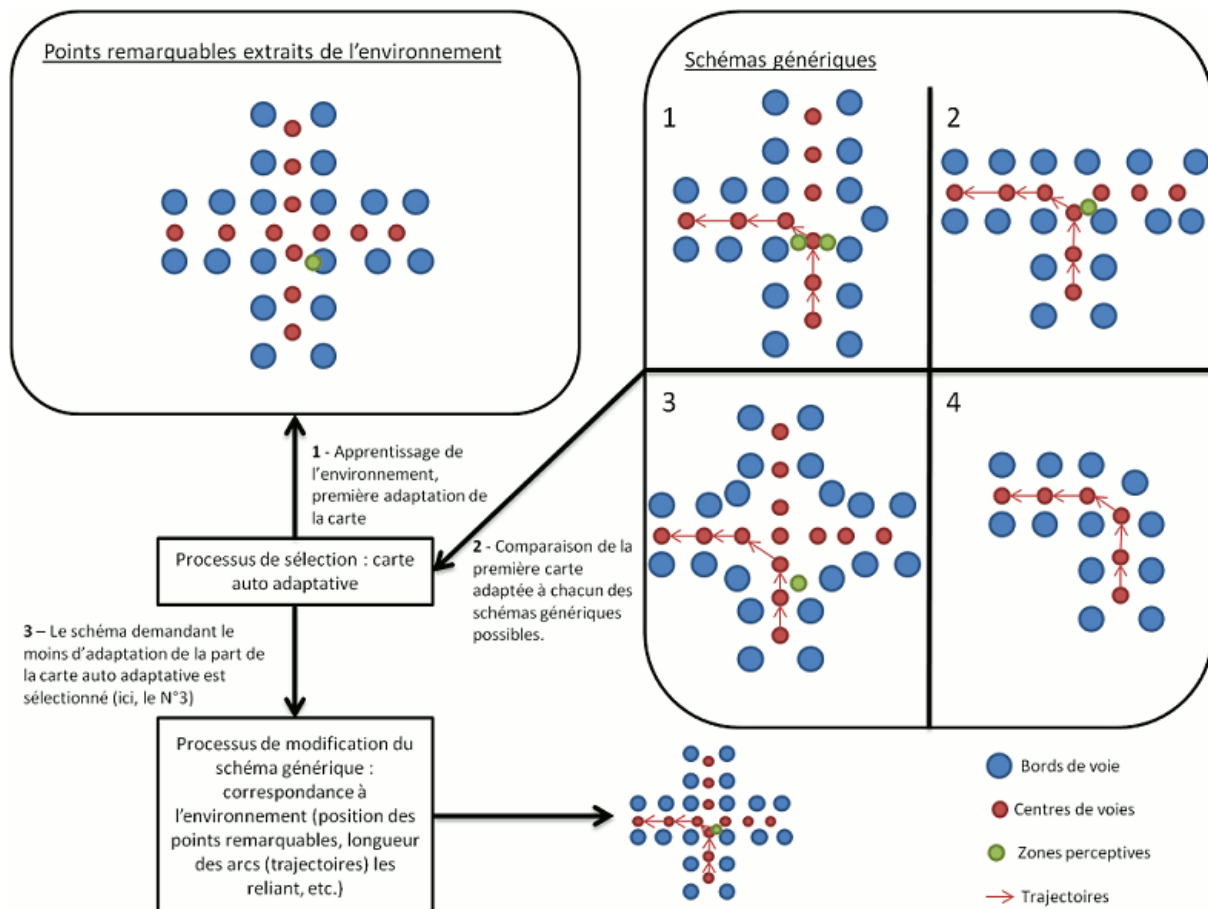


FIGURE 31 – Processus de sélection et d'instanciation d'un schéma tactique générique

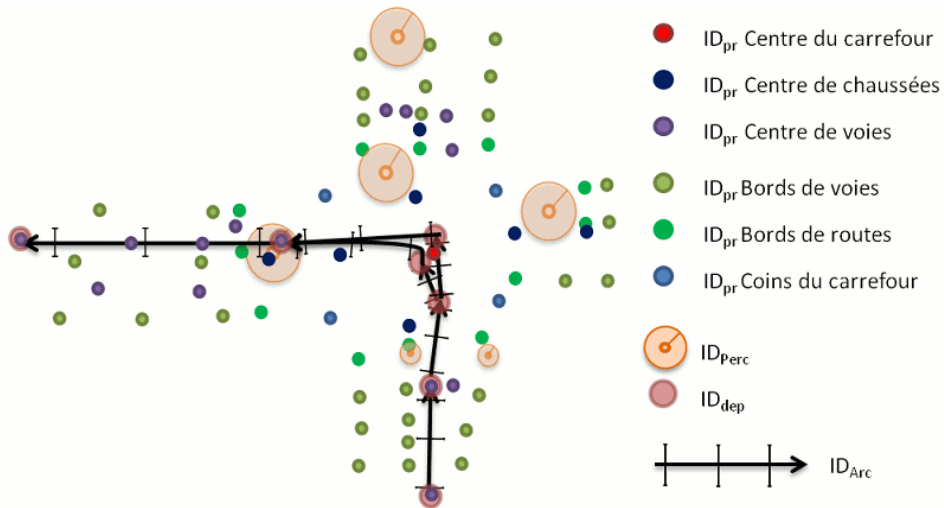


FIGURE 32 – Schéma tactique de tourne-à-gauche, structuré en graphe

En partant du schéma tactique de la figure 32, nous avons manuellement placé les zones de déplacement et les zones d’exploration perceptive de ce schéma générique sur une photo aérienne d’un croisement urbain particulier. Ce premier résultat est représenté en figure 33.

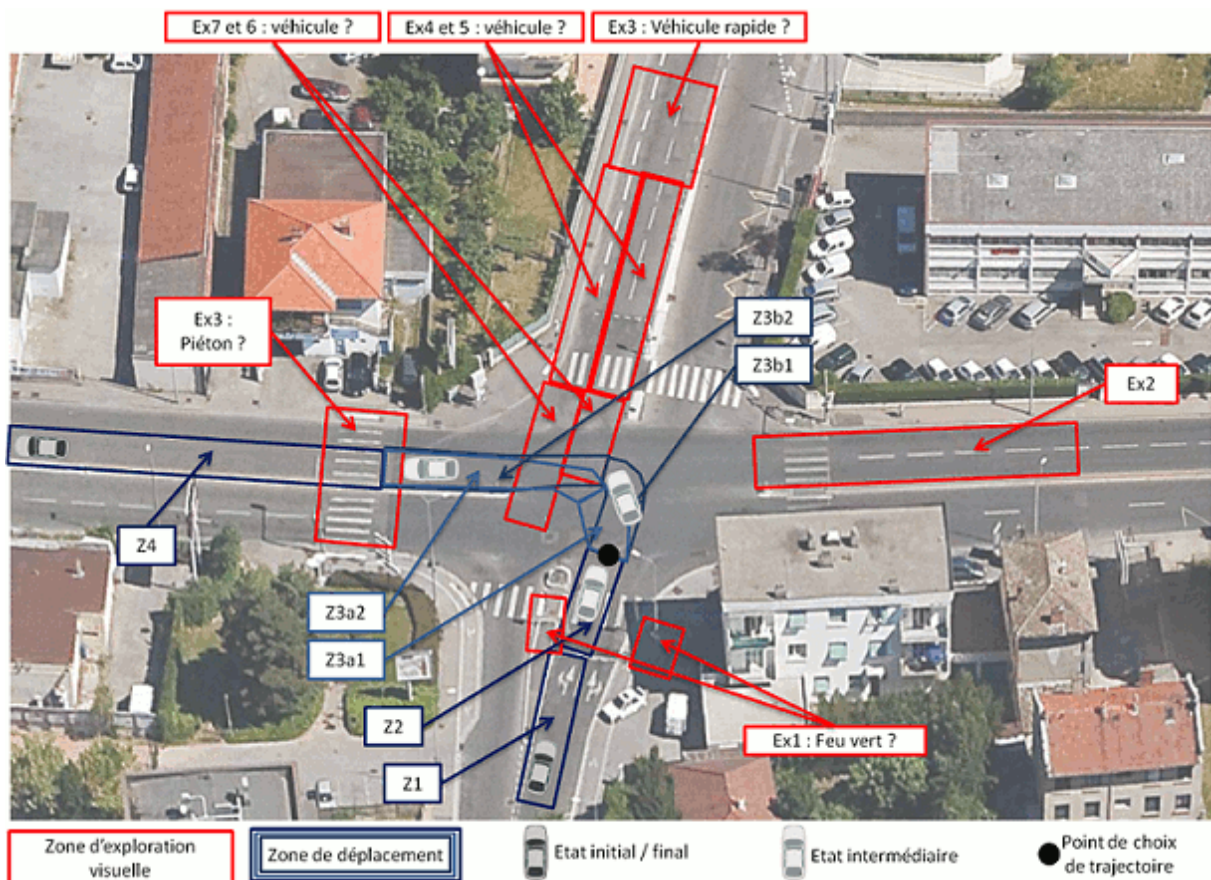


FIGURE 33 – Un schéma de conduite de Tourne-à-gauche appliqué à un carrefour à feu particulier

4.3. Implémentation du module tactique

Pour pouvoir comparer ce schéma générique avec l'environnement réel, nous avons alors superposé le graphe correspondant à ce schéma générique avec la photo aérienne de ce carrefour. La figure 34 présente la résultat de cette comparaison. Nous pouvons d'emblée remarquer que les bords de voies et les zones d'exploration perceptive ne sont pas correctement appariés avec l'infrastructure réelle, et que les trajectoires de conduite du schéma générique ne suivent pas les centres de voies. Ces différences proviennent du fait que la géométrie réelle de ce carrefour n'est pas à angle droit, comme cela est postulé par défaut dans le schéma générique (car c'est la géométrie la plus typique des carrefours urbains). Il est donc nécessaire de mettre en œuvre des processus de modification et d'adaptation du schéma générique afin de le faire mieux correspondre avec l'infrastructure routière.

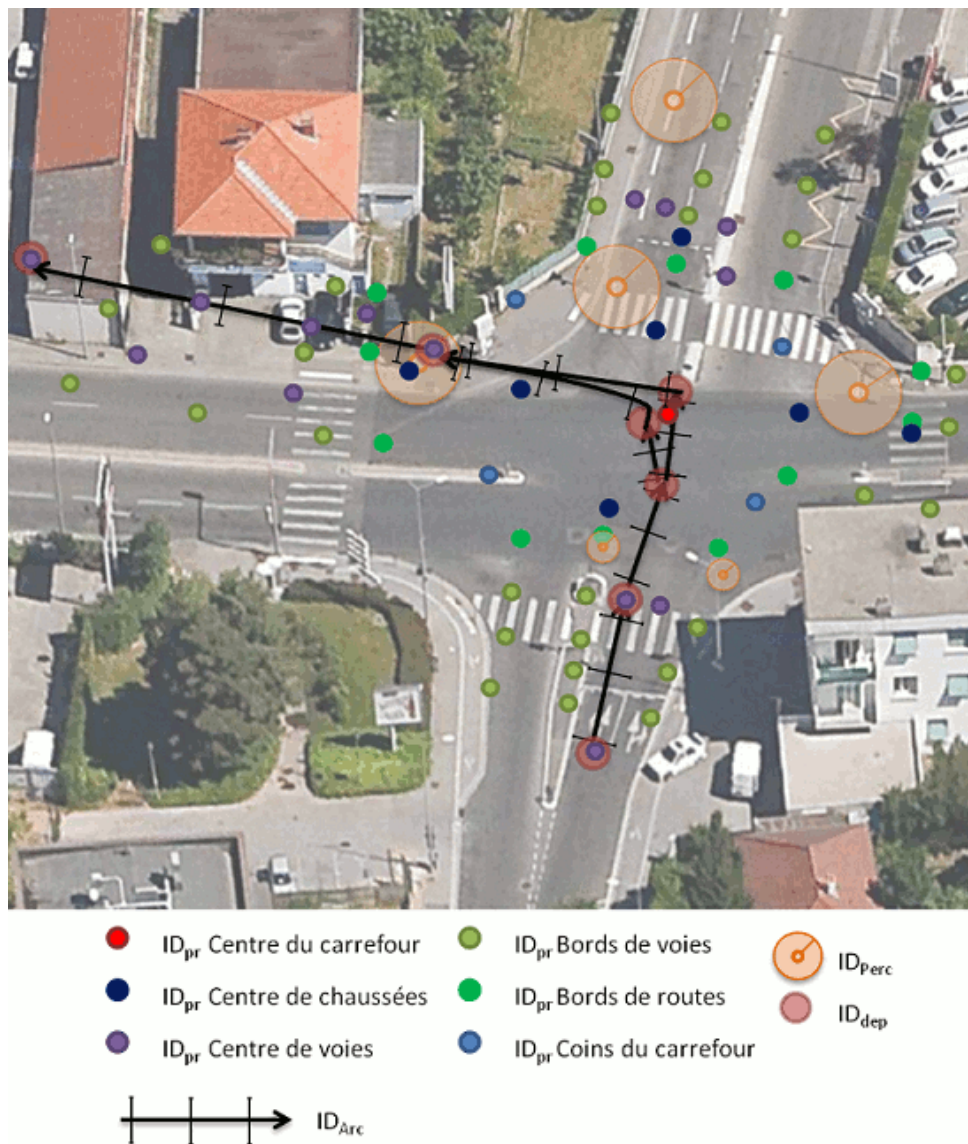


FIGURE 34 – Comparaison entre le schéma générique et l'environnement exemple

Une fois l'extraction des points remarquables de l'environnement réalisée par des algorithmes de perception (comme illustré en figure 30 p.101.), il conviendrait alors de faire « apprendre » cet environnement à une carte auto-adaptative, afin qu'elle puisse le comparer avec le schéma

générique présenté en Figure 32. Cette partie du processus d'appariement, bien que non testée à ce jour, devrait produire de bons résultats. En effet, une carte auto-adaptative permet la reconnaissance de formes à partir d'un signal bruité. Ainsi, le manque de certains points remarquables ou les dispositions variables des points entre le schéma et la réalité devraient pouvoir être absorbés par les capacités auto-adaptatives de la carte. En revanche, si l'environnement n'est pas caractérisé par un nombre suffisant de points remarquables (erreurs des algorithmes de perception, manque d'informations visibles comme les lignes au sol, etc.) cela pourra mettre à mal ce processus d'appariement. Pour garantir le bon fonctionnement de ce processus, il conviendrait aussi de définir des seuils d'acceptation minimaux des appariements, afin d'éviter l'activation de schémas absurdes face à un environnement atypique.

Pour les besoins de l'exemple, nous considérerons ici que le « bon » schéma générique a été sélectionné (modulo, par exemple, un écrémage par le module stratégique qui informerai le processus de sélection du schéma que le croisement est à quatre entrées non perpendiculaires). Une fois ce schéma sélectionné, il convient alors de faire correspondre les points de bords de voies, de centre du carrefour, et de bords de routes avec les points remarquables du schéma afin de pouvoir superposer ce schéma avec l'environnement réel (figure 35).

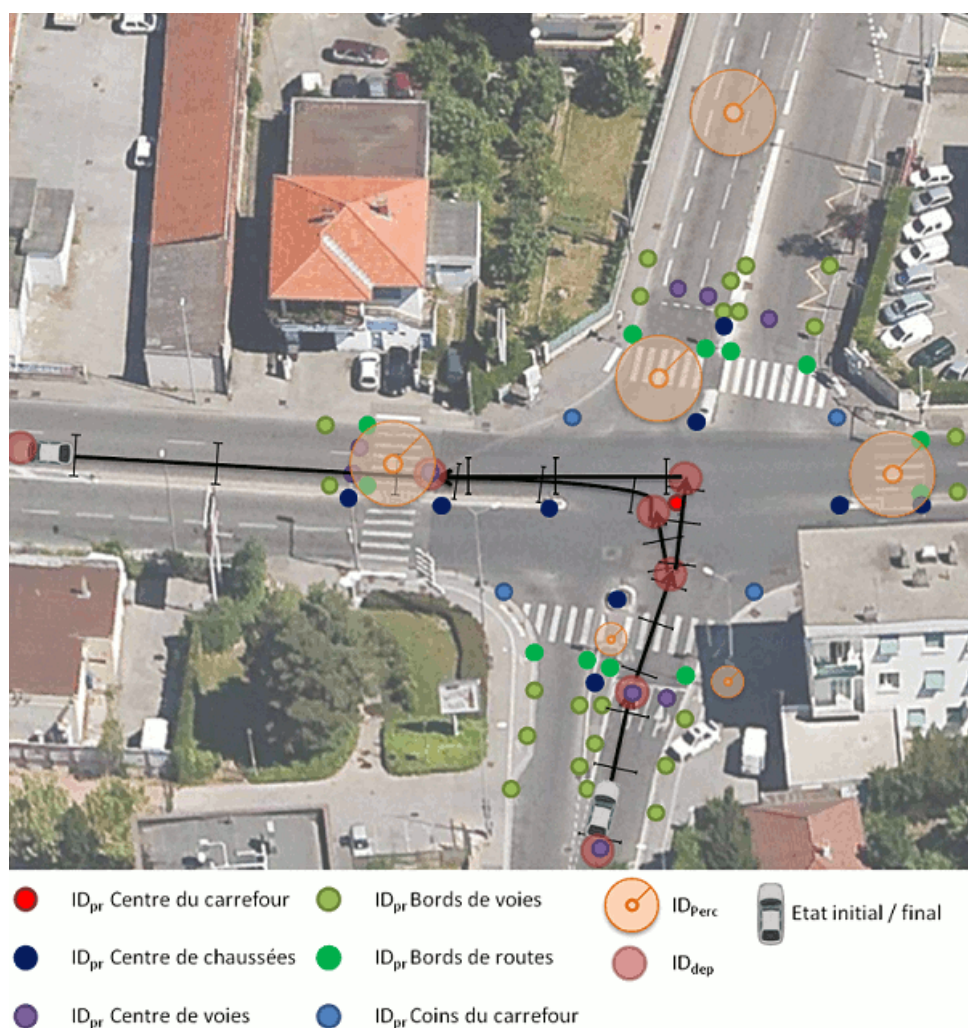


FIGURE 35 – Schéma tactique superposé à l'environnement après sélection et adaptation

Cet exemple d’instanciation, réalisé ici manuellement mais en se basant sur des méthodes informatiques que nous avons clairement identifiées, nous permet de voir comment un schéma tactique de COSMODRIVE (cf. figure 15) pourra être progressivement instancié au réel. Il est clair que l’implémentation complète de ce processus pour permettre la sélection et l’appariement automatique d’un schéma générique demandera encore beaucoup de travail, mais l’analyse conceptuelle et algorithmique que nous venons de présenter nous conforte dans l’idée que les graphes, structure computationnelle que nous avons utilisée dans notre modèle informatique pour modéliser les schémas de conduite, constituent un formalisme pertinent et efficace pour permettre l’implémentation effective de ce processus d’appariement.

4.3.2 Implémentation effective des schémas de conduite et simulation des représentations mentales

Afin d’implémenter des schémas de conduite utilisables par notre modèle, nous avons pris la décision de simplifier le problème en créant des schémas tactiques partiellement instanciés (comme s’il s’agissait d’environnements familiers du conducteur, par exemple). Pour construire les zones de déplacement, nous avons utilisé un raccourci informatique nous permettant, grâce au plan stratégique que nous avons créé, de définir les points remarquables (les ID_{dep}) dans l’environnement marquant les entrées et les sorties des différentes zones de déplacement du schéma de conduite. Une fois ces points définis, le module tactique du modèle peut construire sa trajectoire au sein de chaque zone et transmettre cette information au module d’exécution d’actions en charge de faire évoluer le véhicule sur cette trajectoire. Cela permet au modèle de se déplacer, selon un schéma tactique instancié à une infrastructure connue, en utilisant une partie de la méthode que nous avons explicitée en 4.3.1.

Les zones d’exploration perceptive des schémas tactiques ont été pour leur part simulées en définissant, au sein de l’environnement routier virtuel, des points d’intérêt permettant de diriger l’œil virtuel du modèle. Ces points servent à définir les zones perceptives qui doivent être observées par le modèle (vérification de conditions à respecter pour engager une action ou définir une vitesse, par exemple) afin de pouvoir progresser sur la trajectoire du schéma tactique. A ce jour, nous avons directement intégré ces points d’intérêt dans l’environnement pour construire les stratégies visuelles du module perception, mais une fois les méthodes décrites en 4.3.1.2 développées, ces points pourront être identifiés « à la volée » dans l’environnement routier extérieur par le module tactique.

En ce qui concerne la construction des schémas tactiques et leur stockage en mémoire (à long terme), nous avons développé des outils informatiques permettant la création de graphes et leur stockage dans une base de données. Facilement modifiables et accessibles, les « objets » composant ces graphes sont activables (en mémoire de travail) pour autoriser un accès rapide à leurs caractéristiques. Ces *objets* ont été développés en C++ natif. Ainsi, les développements futurs pourront, si nécessaire, les utiliser au sein d’une autre plateforme de simulation.

Pour simuler la représentation mentale tactique courante du conducteur, nous créons une instance particulière de SiVIC, construite sur une machine différente de celle supportant la simulation de l’environnement routier virtuel, mais ne comportant que les informations ayant fait l’objet d’une intégration cognitive par le modèle. A ce niveau, nous émuloons aussi le processus de structuration de l’environnement externe par les schémas de conduite en important directement dans la représentation mentale les caractéristiques générales de l’infrastructure routière

(e.g. route, trottoir) et les éléments de décor les plus imposants et/ou décoratifs (e.g. immeubles, arbres, bancs, etc.), ce qui permet en retour de projeter/d'apparier facilement les points remarquables du schéma avec l'environnement routier. Grâce à cela, le schéma de conduite pour une infrastructure est fonctionnel : il définit les zones de déplacement et d'exploration visuelle permettant au modèle de se déplacer dans cette infrastructure.

4.3.3 Prise de décision et anticipation

Les processus de prise de décision et d'anticipation, internes au module tactique et décrits en section 3.2, n'ont pas encore été totalement développés. En effet, leur fonctionnement est très imbriqué et il est nécessaire de créer de multiples représentations mentales anticipées (et donc autant d'instances SiVIC spécifiques) pour simuler adéquatement ces deux processus cognitifs, ce qui relevait d'une gageure inaccessible dans la durée de cette thèse. Nous avons donc été contraints d'émuler la prise de décision en utilisant un système « d'événements » permettant de transmettre des buts à atteindre localement par le véhicule durant son déplacement, et permettant aux processus d'anticipation de créer une dérivation temporelle de la situation courante. Sur ce principe, et avant de se lancer dans l'implémentation effective de ces processus, nous avons décidé de réaliser une expérimentation avec des conducteurs humains nous permettant d'explorer la théorie du « déploiement cognitif » de COSMODRIVE utilisée pour la prise de décision en fonction des risques de conflits inter-zones enveloppes (cf.3.2.4). Pour pouvoir émuler complètement ces processus cognitifs au-delà des premières briques de simulation que nous avons d'ores et déjà développées (permettant notamment de générer une représentation anticipée), nous avons « déroulé » mathématiquement le cycle complet du fonctionnement de ces deux processus dans le cadre d'une prise de décision en situation de tourne-à-gauche. Ce déploiement mathématique du processus décisionnel et l'expérimentation qui en a découlé pour son investigation auprès de conducteurs humains seront présentés dans le chapitre 5. Cela nous permettra de montrer l'apport de l'utilisation de la simulation numérique de l'anticipation et de la prise de décision pour pouvoir prédire et expliquer les performances des conducteurs humains.

En dépit de ces limites, les avancées réalisées durant la thèse en matière de simulation des représentations mentales, dont nous visualiserons quelques résultats à la fin de ce chapitre, constituent un premier pas significatif vers la génération et la gestion en parallèle de plusieurs représentations visuo-spatiales sur une machine possédant Matlab et Simulink. Ces logiciels utilisent le formalisme des *statecharts* [Harel, 1987], qui nous paraît bien approprié pour modéliser un système générant une décision grâce à plusieurs paramètres prélevés dans la représentation mentale courante [Harel and Politi, 1998]. Les nombreux échanges d'informations, potentiellement à haute fréquence, nécessaires pour alimenter les charts pourront en outre largement bénéficier des protocoles de communication XMPP ou UDP dont nous avons doté notre plateforme de simulation virtuelle (cf. section 4.1.3).

4.4 Implémentation du module de perception

La conception et l'implémentation informatique d'un module de Perception permettant au modèle COSMODRIVE de percevoir l'environnement routier était l'un des objectifs majeurs de cette thèse. Le développement de ce module a donc représenté un effort conséquent. Dans cette

partie, nous allons décrire l'architecture et les fonctions de ce module informatique que nous avons développé au sein de la plateforme SiVIC.

4.4.1 Description de l'architecture fonctionnelle du module

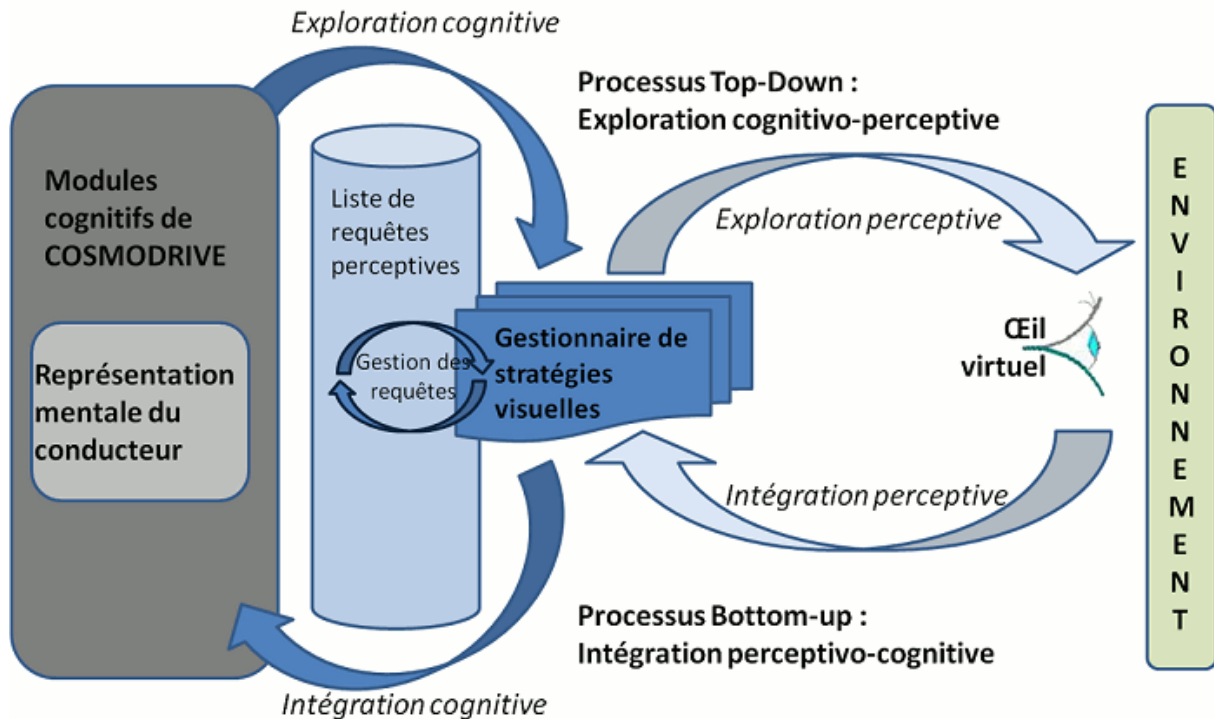


FIGURE 36 – Architecture du module Perception

Comme nous l'avons spécifié en 3.3.3.4, le module de perception doit permettre d'extraire les informations visuelles dans la scène routière afin d'alimenter les représentations mentales du modèle. Ce processus de prise et de traitement d'informations doit par ailleurs s'inscrire dans un « cycle perceptif » combinant un processus bottom-up « d'Intégration Cognitive » (qui sera dirigé par les données perçues dans l'environnement) et un processus top down « d'Exploration Perceptive » (dirigé par les schémas de conduite), qui permettra d'orienter la perception du monde en pilotant « l'œil » du modèle.

C'est sur la base de ces spécifications générales que nous avons défini l'architecture fonctionnelle de notre module informatique, présentée en figure 36. Ce module de perception est architecturé autour d'un processus de « Gestion des Stratégies Visuelles » permettant de diriger l'attention visuelle du conducteur, via le positionnement de l'œil virtuel, dans une zone particulière de l'environnement routier. Ce processus reçoit, d'un côté, des « demandes d'informations » en provenance des modules cognitifs (tactiques et stratégiques) et, de l'autre côté, des « sollicitations perceptives » plus ou moins fortes (en fonction de la saillance des stimulations visuelles, notamment), en provenance de l'environnement routier. Du point de vue informatique, ces demandes et ces sollicitations ont été modélisées sous la forme de « Requêtes Perceptives ».

Ces requêtes perceptives contiennent les informations géographiques nécessaires pour pouvoir diriger l'œil virtuel dans son examen de la scène routière, ainsi qu'une valeur de priorité relative à l'urgence du besoin en information. Cette valeur d'urgence est produite par le processus générateur de la requête. Le gestionnaire de stratégies visuelles va alors utiliser ces valeurs d'urgence pour déterminer quelle zone de l'environnement doit être explorée en priorité. L'utilisation d'une telle technique permet une gestion centralisée des requêtes provenant de multiples sources (des modules cognitifs pour une recherche active ou du flux optique pour l'attirance du regard par le phénomène de saillance). Mais cette gestion reste interne au module de perception, il ne peut donc pas de lui-même augmenter ou diminuer une valeur de priorité. Celle-ci peut en revanche augmenter avec la pression temporelle (au fur et à mesure que je me rapproche d'un objet à percevoir, par exemple, afin de l'observer avant de l'avoir dépassé) ou sur demande du processus générateur de la requête toujours en attente de réponse. Toutefois, dans ce second cas, le processus générateur devra créer une copie de la requête ayant une valeur d'urgence plus élevée et qui prendra alors la place de la requête initiale. De plus, en cas d'urgence, il est possible de générer des requêtes permettant d'interrompre une fixation en cours. Enfin, les requêtes possèdent aussi un « temps de vie », car le conducteur évolue dans un monde dynamique qui, par définition, se modifie même en cas d'inaction du conducteur. Une requête peut donc devenir obsolète après quelques secondes, même si le conducteur n'a pas pu prélever l'information dans l'environnement.

Au centre du module se trouve le « gestionnaire de stratégies visuelles ». C'est ce processus qui va réceptionner chaque requête, la placer dans une liste structurée de requêtes, rafraîchir cette liste (priorité, ordre des requêtes en attente, destruction des requêtes obsolètes, etc.), puis sélectionner la requête la plus prioritaire pour diriger l'œil virtuel à un instant donné. Une fois l'information prélevée dans l'environnement, une requête réponse est alors adressée au processus demandeur, et les représentations mentales perceptives (de façon systématique) et tactiques (en fonction du niveau d'intégration de l'information) sont alors mises à jour. La liste des requêtes ne fait que stocker les requêtes en attente. Elle ne comporte pas d'autre accès que celui utilisé par le gestionnaire de stratégies visuelles, il est donc impossible d'intégrer une requête autrement qu'en la faisant transiter par le gestionnaire de stratégies visuelles.

4.4.2 Fonctionnement algorithmique du module

Le fonctionnement algorithmique du module de perception est décrit dans la figure 37. Nous pouvons voir que les requêtes perceptives peuvent provenir des différents modules du modèle, ou être générées au niveau du flux optique perçu par l'œil virtuel, en raison d'une saillance élevée détectée dans le champ de vision global. Le codeQR 1 suivant permet une visualisation dynamique du cheminement d'une requête dans le module de perception.



CodeQR 1: <http://www.youtube.com/watch?v=tqRBP3cTqKE>

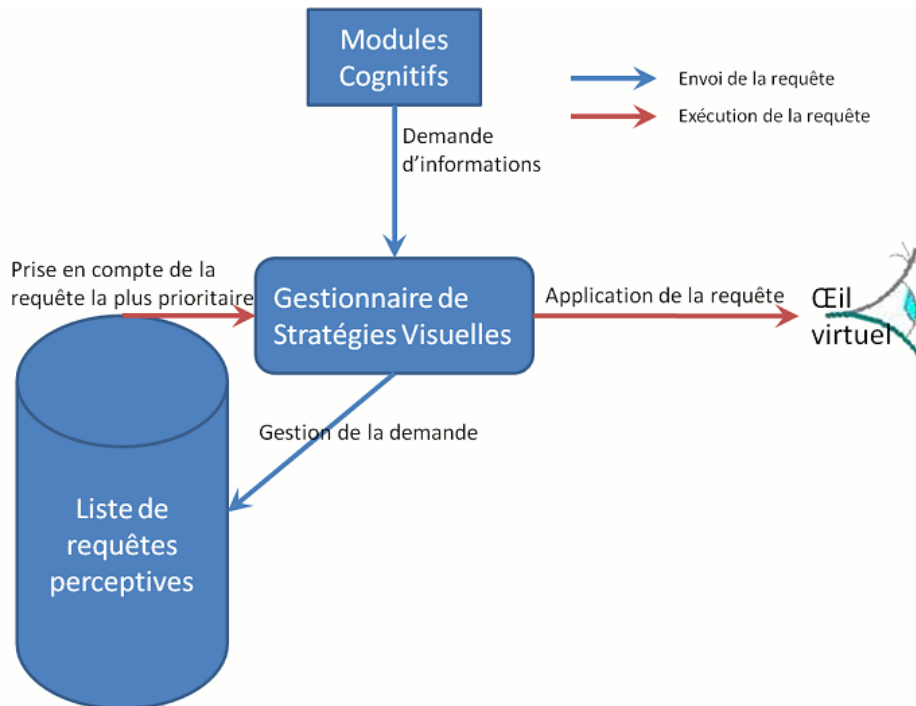


FIGURE 37 – Fonctionnement du module Perception

Du point de vue de son implémentation informatique dans la plateforme SiVIC, le module de perception, comme tous les autres modules du modèle, est intégré par une Dll chargeable par la plateforme au moment de son démarrage. Le module de perception est une classe C++ utilisant le CLR¹⁸ du framework .NET, et intégrant à la fois (1) une partie graphique permettant la visualisation du module et (2) de nombreux objets et méthodes pour la simulation de la perception du conducteur.

A l'image de l'architecture fonctionnelle de la figure 36, le module développé est composé de plusieurs structures informatiques comme le gestionnaire de stratégies visuelles, l'œil virtuel ainsi que des fonctionnalités de communication, permettant de diriger l'œil virtuel dans l'environnement en fonction des requêtes perceptives provenant de différents processus générateurs.

Structurellement, la « classe perception » contient des fonctions membres manipulant les données membres qui représentent les structures de données nécessaires au fonctionnement du module. Pratiquement, la liste des requêtes perceptives est un objet « list » permettant de stocker des pointeurs vers les requêtes perceptives reçues par l'opérateur de communication. Cette liste est manipulée par le gestionnaire de stratégies visuelles, comportant plusieurs fonctions, comme l'ajout ou la suppression de requêtes dans la liste, ou la modification de priorité de requêtes en fonction d'ordres provenant d'autres requêtes, etc. Le processus de communication se base sur XMPP pour envoyer et recevoir les requêtes des autres modules. Il traite une partie de l'information contenue dans un message puis l'intègre dans le module de perception avant de traiter la requête en fonction de sa priorité et des priorités des autres requêtes déjà présentes dans la liste. Le message en lui-même est ensuite détruit. La réponse sera construite en fonction de la requête perceptive et d'un nouveau message forgé par le processus de communication.

¹⁸Common Language Runtime

Le gestionnaire de stratégies visuelles permet de gérer toutes les requêtes : les nouvelles requêtes entrantes, celle en cours de traitement, la liste de celles en attente de traitement, et celles en fin de vie qui doivent être détruites. A la réception d'une requête, le gestionnaire de stratégies visuelles positionne celle-ci dans la liste des requêtes à effectuer, en fonction de sa priorité. Lorsqu'une exploration perceptive peut être effectuée, le gestionnaire prend la requête la plus prioritaire pour l'exécuter : il la lit puis demande la rotation de l'œil virtuel en direction de la cible (objet, zones, angle de rotation ; etc.). Gérer la liste des requêtes en attente consiste à trier les requêtes en fonction de leur priorité. Comme nous l'avons déjà souligné, la priorité d'une requête est déterminée par le processus qui l'a générée, mais au niveau du module de perception, cette valeur de priorité peut augmenter en fonction du temps d'attente. En l'état actuel de notre implémentation informatique, cette progression est linéaire, mais il est prévu que cette progression évolue en même temps que la complexité du logiciel. En effet, une progression non linéaire est tout à fait envisageable, mais une progression variable en fonction de la nature de la requête (et/ou de sa provenance) serait aussi intéressante pour la simulation cognitive de la perception. Enfin, le gestionnaire s'occupe de la destruction des requêtes non exécutées et arrivées en fin de vie. La liste des requêtes contient toutes celles qui sont en attente d'exécution. Elle est illimitée (relativement aux capacités de la mémoire vive de l'ordinateur, bien entendu) et permet un tri rapide avec une complexité en $O(n \ln(n))$.

4.4.3 Implémentation du processus d'exploration cognitivo-perceptive

Ce processus de perception top-down permet la recherche active d'informations dans l'environnement. C'est l'exploration cognitive qui permet au conducteur de rechercher des informations grâce à ses schémas tactiques, et c'est l'exploration perceptive qui va diriger l'œil dans l'environnement pour extraire l'information. Nous allons ici décrire comment nous avons simulé ce processus d'exploration cognitivo-perceptive dans notre module perception sur la plateforme SiVIC.

4.4.3.1 Les requêtes perceptives descendantes

Le module perception est en mesure de recevoir des messages par le protocole XMPP provenant de n'importe quelle source connectée au même serveur openfire que lui. Les requêtes qu'il reçoit sont des messages contenant les informations nécessaires pour qu'il dirige son attention visuelle en direction d'une zone de l'environnement simulé.

Les demandes formulées par les autres modules du modèle (Stratégique, Tactique et Exécution d'Actions) sont envoyées sous la forme d'un message intégrant un Dataform, pour obtenir une structure au sein d'un message XMPP. Une requête perceptive valide doit répondre à certains critères, comme la durée du regard à porter, le temps de vie de la requête, ou l'objet à regarder dans la scène. Le tableau 2 récapitule les champs nécessaires. Chaque entrée ou couple d'entrées du tableau précédé par XOR signifie qu'il est nécessaire d'avoir un de ceux-ci et un seul.

Trois solutions sont possibles pour diriger le regard dans la scène routière. La première, la plus pratique, est de donner le « nom » de l'objet sur lequel nous souhaitons placer le regard. Dans ce cas, le module perception va calculer automatiquement les rotations à appliquer à l'œil virtuel pour aller regarder l'objet en question. L'intérêt de l'utilisation de cette technique repose sur les schémas tactiques et leurs zones d'explorations perceptives de l'environnement implémentées

DataForm définissant une requête perceptive			
	nom du champ	type	description
	Durée	int	temps de la requête
	Priorité	int	priorité de la requête (de 0 à 10)
	LifeTime	int	temps de vie de la requête
XOR	PositionEcranX	int	localisation abscisse écran du regard
	PositionEcranY	int	localisation ordonnée écran du regard
XOR	AngleAlpha	int	angle zénithal du regard
	AngleBeta	int	
XOR	ItemName	std : :string	nom de l'objet à regarder
XOR	DTV	int (0,1 ou 2)	activation double tâche + type
	Id	int	Id de la requête (unique)

TABLEAU 2 – Dataform d'une requête perceptive

comme des « objets invisibles ». Un *objet invisible* est un marquage informatique effectif mais inaccessible à un certain processus de traitement. En l'espèce, ce seront des objets que ne percevra pas notre œil virtuel tel que nous l'avons implémenté, mais qui pourront être néanmoins utilisés pour diriger le regard dans l'environnement virtuel et observer ainsi tous les objets visibles présents dans cette zone.

La seconde méthode consiste à donner au module les angles α, β à appliquer à l'œil virtuel. Ceci permet de diriger manuellement l'œil, grâce à l'interface du module. En effet, notre développement a débuté avec des mouvements de l'œil dirigés par des clics de souris pour avoir le contrôle total de la perception et permettre la vérification de certaines fonctions. Cette technique est active principalement pour les tests pendant le développement. Elle n'est pas conçue pour la modélisation cognitive, mais si l'utilité se présente, elle conserve les caractéristiques de vitesse et d'utilisation par XMPP.

La troisième consiste à donner au module les points x, y de l'écran d'affichage de l'environnement. Une fois les coordonnées de l'écran données au module, l'œil se dirigera vers la zone de l'environnement correspondant à la zone sur l'écran d'affichage. Cette technique permet de diriger le regard en direction de zones présentes sur l'écran, visibles par l'utilisateur du simulateur. Elle est particulièrement intéressante lors de l'utilisation d'un oculomètre permettant l'extraction en direct des coordonnées d'écran que le sujet regarde. En effet, nous avons utilisé un oculomètre au sein du simulateur de conduite que nous décrivons à la section 5.1.1 p.144. Cela nous permet de connaître la position (x,y) de l'écran visualisée dans les 200 ms suivant le déplacement du regard du sujet. Il est donc possible de diriger le module perception en fonction d'une entrée définie par le regard d'un sujet pendant une expérimentation. Cette technique novatrice nous semble très intéressante pour construire par exemple une représentation mentale perceptive potentiellement proche de celle d'un sujet. Cela permettrait aussi d'entamer un apprentissage supervisé de nos stratégies visuelles, et d'obtenir un module perception fonctionnant grâce à des stratégies construites sur le modèle humain.

La « durée de consultation » définie dans la requête perceptive permet de déterminer le temps de fixation du regard nécessaire pour exécuter la requête. C'est un moyen simple que nous avons décidé d'utiliser dans notre modèle pour émuler de façon rudimentaire le temps

nécessaire pour réaliser le traitement perceptif d'une information par le conducteur (à terme, si des algorithmes de reconnaissance d'objets étaient implémentés dans le module et calibrés sur les temps de traitement de la perception humaine, ce paramètre ne serait plus utile). En tant qu'exécuteur de requêtes, le module perception va donc prendre cette durée pour déterminer le temps de fixation que l'œil virtuel va devoir consacrer à l'observation d'une zone et/ou d'un objet. Ce temps ne peut pas être modifié par le module perception. En revanche, le gestionnaire de stratégies visuelles peut décider d'interrompre une fixation en cours, bien que non achevée, pour engager une nouvelle requête urgente (suite à la perception d'un événement critique dans la vision périphérique, par exemple). Le « temps de vie » d'une requête permet de définir un temps maximal pour effectuer la requête, car dans un environnement dynamique, quelques secondes suffisent à rendre une demande inutile ou inexécutable. Lorsque ce temps de vie est dépassé, la requête est automatiquement détruite par le gestionnaire de stratégies visuelles.

Enfin, pour simuler des situations de distraction visuelle induites par un écran d'affichage embarqué, le module tactique peut envoyer une séquence de requêtes perceptives permettant d'alterner la consultation de l'écran et celle de la route selon différentes stratégies visuelles. Cette fonctionnalité nous a permis, par exemple, d'étudier les risques liés à la distraction visuelle en conduite auprès de conducteurs humains et d'en simuler les effets potentiels au niveau de la représentation mentale du conducteur. Cette problématique a fait l'objet d'une expérimentation spécifique qui sera présentée et discutée dans le chapitre suivant (cf.5.3).

4.4.3.2 La génération du cycle d'exploration cognitivo-perceptive

L'exploration cognitivo-perceptive de l'environnement est un processus top down engendré dans notre module de perception par la réception de requêtes perceptives émises par les autres modules de COSMODRIVE. Le module stratégique peut orienter la perception vers l'observation de panneaux de direction, par exemple, ou de points de repère géographiques dans l'environnement pour vérifier sa position sur le plan stratégique. Le module d'exécution d'actions va pour sa part générer de façon récurrente et systématique des requêtes permettant de piloter le véhicule et de le maintenir sur sa trajectoire, ou pour observer droit devant et détecter la présence d'obstacles. Enfin, le module tactique va générer des requêtes à court terme visant à répondre aux besoins du schéma tactique activé (correspondant à la représentation tactique courante du conducteur), et des requêtes à plus long terme visant à catégoriser l'environnement lointain et sélectionner ainsi un futur schéma de conduite.

Le processus d'exploration cognitivo-perceptive tel que nous l'avons modélisé puis implémenté au moyen de notre gestionnaire de requêtes perceptives permet ainsi de reproduire dans notre modèle du conducteur l'ensemble des principes de fonctionnement du cycle perceptif de Neisser (Neisser, 1976 ; cf.3.3.2.2), ceci pour tous les niveaux cognitifs de la conduite automobile : la réponse à une requête perceptive simule la modification des représentations mentales par les informations remontées depuis l'environnement via notre œil virtuel, et modifie par là-même le schéma perceptif actif. Ce processus de recherche active de l'information permet ainsi au modèle du conducteur de s'informer en permanence sur son environnement, en fonction des informations qu'il possède déjà dans ses représentations internes, perceptives et cognitives, et de celles qui lui manquent pour prendre ses décisions, ce qui nécessite de générer une nouvelle requête.

Ce cycle d'exploration perceptive permet ainsi de générer « par émergence » les stratégies visuelles d'un conducteur automobile (voir un exemple en situation de tourne-à-gauche : codeQR 8

section 4.6.2), mais aussi d'analyser et d'expliquer les données oculométriques collectées auprès de conducteurs humains. Nous reviendrons en détail sur ces questions dans le chapitre suivant (cf. section 5.2, p.150), en présentant et en discutant les résultats d'une expérimentation que nous avons mise en place pour étudier les stratégies visuelles des conducteurs en situation de tourne-à-gauche dans un carrefour à feux.

Ainsi, grâce au module de perception tel que nous l'avons conçu et développé, il est possible de simuler les processus de recherche active de l'information dans l'environnement routier et de visualiser les représentations mentales du conducteur en observant dynamiquement leurs mises à jour, en fonction de ce que le modèle a perçu (représentation perceptive) puis intégré cognitivement (représentation cognitive tactique) de la situation de conduite dans laquelle il évolue. Mais il est également possible de simuler des erreurs en cas de non perception ou de mauvaise intégration cognitive d'une information. Dans la dernière partie de ce chapitre (sections 5.1 et 4.6.2), nous présenterons quelques exemples de visualisation de ces résultats de simulation des représentations perceptives et cognitives du conducteur automobile.

4.4.4 Implémentation du processus d'intégration perceptivo-cognitive

Ce processus simule pour sa part l'intégration d'informations perçues dans l'environnement en l'absence d'une recherche active, ou en parallèle de celle-ci. L'intégration perceptivo-cognitive (cf.3.3.3.3 p.78) est donc un processus dirigé par les données contenues dans l'environnement routier : des informations présentes dans nos champs visuels peuvent attirer notre attention et/ou être intégrées de manière plus ou moins complète sans que nous ayons besoin de placer notre regard dessus ou d'y accorder de l'attention.

Dans notre démarche de modélisation et de simulation informatique de la perception du conducteur, nous avons tout particulièrement cherché à simuler les phénomènes « d'attraction du regard » induits par la saillance d'un objet situé dans le champ visuel périphérique de notre œil virtuel, incitant alors potentiellement le conducteur à porter son regard (vision fovéale) sur une zone particulière de l'environnement.

4.4.4.1 Définition de la saillance

Est saillant ce qui capte l'attention, ce qui saute à l'esprit (saillant a une étymologie latine du verbe *salio*, « sauter, bondir »). Pour simuler informatiquement le processus d'intégration perceptivo-cognitive de l'information visuelle, nous nous sommes dirigés vers l'utilisation des *cartes de saillance*, permettant de définir sur une image les points les plus attractifs pour le regard, avec quelques ajouts spécifiques pour permettre la prise en compte de la composante dynamique de la perception en conduite automobile.

Le calcul d'une carte de saillance pour notre modèle de perception permet de simuler une partie de la vision périphérique, celle qui dirige le regard du conducteur vers un objet plutôt qu'un autre. Pour ce faire, il est nécessaire de traiter une image provenant de l'œil virtuel du modèle afin d'extraire les points saillants de la scène. Grâce à la plateforme SiVIC et l'œil virtuel que nous avons implémenté à partir d'un modèle de caméra, nous pouvons recueillir des images successives codées en RVB classique (trois composantes de couleurs : Rouge, Vert, Bleu) et permettant d'extraire des informations supplémentaires grâce à l'utilisation de l'API OpenGL.

Pour générer une carte de saillance, plusieurs étapes sont nécessaires. A partir de l'image provenant de notre « œil-caméra », il faut appliquer plusieurs filtres (séquentiellement ou en parallèle) puis combiner les différentes cartes obtenues afin de créer la carte de saillance. D'après nos recherches (cf.3.3.3.3), il est nécessaire de créer (1) une carte d'orientation, (2) des cartes de couleurs relatives aux couleurs les mieux captées par les cellules photoréceptrices du globe oculaire, (3) une carte de mouvements et (4) une carte de profondeurs.

4.4.4.2 Simulation de la saillance visuelle

Nous allons ici décrire ces quatre types de cartes utilisées dans notre modèle pour permettre l'extraction des zones saillantes du champ visuel périphérique.

La carte d'orientation :

Cette carte, calculée à partir de l'image RGB de la caméra, permet de mettre en évidence principalement les orientations horizontales et verticales. Pour ce faire, l'application d'un filtre de Gabor en deux dimensions est la manière la plus économe en calcul et la plus précise. Le filtre de Gabor est une modulation d'une fonction gaussienne 1 par une sinusoïde 2.

$$g(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x^2+y^2)} \quad (1)$$

$$\omega(x, y) = \cos(x\omega_x + y\omega_y) \quad (2)$$

avec :

$$\omega_x = \omega_0 \cos(\theta)$$

$$\omega_y = \omega_0 \sin(\theta)$$

σ largeur de gaussienne, ω_0 fréquence de base, θ rotation appliquée (0, $\pi/2$, π , etc.) D'où l'équation du filtre de Gabor 3

$$G(x, y) = g(x, y) * \omega(x, y) \quad (3)$$

Grâce à cela, et pour faciliter l'utilisation, nous pouvons calculer un **noyau de convolution**. Suite au calcul des cartes d'orientation verticales et horizontales, une recombinaison est nécessaire pour obtenir une seule carte d'orientation.

Malgré la puissance de calcul des ordinateurs utilisés pour la simulation, ce filtre a peu de chance de tenir le temps réel. Il apparaît donc nécessaire que le calcul de ce filtre soit fait sur un ordinateur distant, spécifié pour le calcul matriciel et que le nombre d'images traitées par seconde soit bien considéré.

Les cartes de couleurs :

Ces cartes permettent de prendre en compte l'affectation pour certaines couleurs des différentes cellules photoréceptrices du globe oculaire. Grâce à l'image en RGB obtenue par l'œil-caméra, les composantes des trois couleurs majoritairement captées par l'appareil visuel humain peuvent être extraites. Nous utilisons un dernier canal pour créer les cartes de couleurs antagonistes (inhibition d'une couleur par une autre, du fait de cellules *doubles antagonistes* présentes dans l'œil). Les canaux de quatre couleurs peuvent être définis comme tels :

$$R = r - \frac{g + b}{2} \quad (4)$$

$$G = g - \frac{r + b}{2} \quad (5)$$

$$B = b - \frac{r + g}{2} \quad (6)$$

$$Y = \frac{r + g}{2} - \frac{|r - g|}{2} - b \quad (7)$$

Le rouge, le vert et le bleu sont les couleurs les mieux perçues, le jaune est une couleur antagoniste avec le bleu (comme le vert avec le rouge). Nous pouvons créer les cartes de couleurs antagonistes (carte rouge/vert, carte bleu/jaune) en calculant les intensités de couleurs de chaque pixel pour chaque carte. Puis, dans chaque carte de la couleur antagoniste, nous calculons l'influence moyenne du voisinage d'un pixel donné.

Ces cartes ne sont pas très difficiles à mettre en œuvre et demandent un nombre de calculs relatifs au nombre de pixels ($O(\text{Nombre_de_pixel})$). Elles peuvent donc être traitées rapidement par l'ordinateur de simulation sans perdre le temps réel.

La carte de mouvements :

Afin de déterminer quels mouvements sont présents dans une séquence d'images, une méthode présentée par Renan Coudray [Coudray and Besserer, 2004] et modifiée dans les travaux de Brouard [Brouard et al., 2009] est intéressante. Elle estime le mouvement apparent dominant et le déplacement local de chaque objet. Brouard prend ensuite en compte la faculté de poursuite oculaire de l'humain, entraînant un mouvement des objets sur la rétine, mais pas dans l'environnement.

Le mouvement relatif est mesuré en fonction du mouvement global et du mouvement d'une zone prédéfinie de l'image. Cela permet de définir les vecteurs de déplacement associés à différentes zones. Par la suite, les travaux de Brouard se penchent sur la capacité de suivi de cibles par l'humain, permettant de moduler les vecteurs de mouvement relatif en fonction du mouvement oculaire de l'observateur. Cette technique de mesure de déplacement est très pertinente pour la simulation de la saillance visuelle, mais d'autres algorithmes de calcul de mouvement sont possibles.

La carte de profondeurs :

Cette carte n'est pas utilisée comme celle précédemment décrite, elle permet une modulation de la carte finale en fonction de la distance des objets de la scène par rapport à l'observateur. Cette carte met en valeur les zones proches et allège le poids des objets plus distants. Elle n'est pas linéaire et il est nécessaire de paramétrer sa plage d'action (définir la zone la plus proche et sa distance maximum). Une telle carte se calcule grâce au *Z-Buffer* (ou *tampon de profondeur*), méthode employée par le moteur graphique de la plateforme SiVIC. Le Z-buffer est utilisé pour définir quels éléments d'une scène 3D doivent être affichés en fonction de leur distance et des différentes occultations. Il est donc calculé en permanence par le moteur graphique. Pour utiliser une telle carte dans notre modèle, il est nécessaire de demander au moteur graphique générant l'image caméra de générer aussi la carte de profondeurs. Une fois extraite, cette carte de profondeurs permet de moduler la saillance d'une zone en fonction de sa distance, car un élément saillant lointain attire moins le regard lors de la tâche de conduite qu'un élément saillant proche.

Application des algorithmes :

Les algorithmes permettant de générer ces cartes peuvent être utilisés sur une image provenant d'une caméra virtuelle de SiVIC. Sur la dernière version de cette plateforme, des filtres peuvent être directement appliqués sur la caméra. Un tel système demande beaucoup de développement, mais la capacité de calcul est optimisée : la plupart des filtres que nous avons présentés peuvent s'écrire en code CUDA¹⁹. Le calcul des algorithmes peut ainsi être traité sur le processeur graphique plutôt que sur le processeur central et cela entraîne une possibilité de calcul parallèle, donc un gain de temps à l'exécution. Grâce à une telle technologie, il est potentiellement possible de conserver le temps réel avec des traitements complexes sur des images de définition acceptable.

L'utilisation des cartes :

Une fois ces quatre cartes calculées, il est nécessaire de les combiner linéairement [Itti and Koch, 1999] entre elles puis de normaliser les valeurs (figure 38), pour obtenir une seule carte normalisée fusionnant les différents calculs précédemment décrits. Ensuite, cette carte est modulée par la carte de profondeurs et aussi par une image de fonction gaussienne bidimensionnelle, afin de simuler la disposition des cellules photoréceptrices sur la rétine (plus de cellules au centre que sur la périphérie de la rétine).

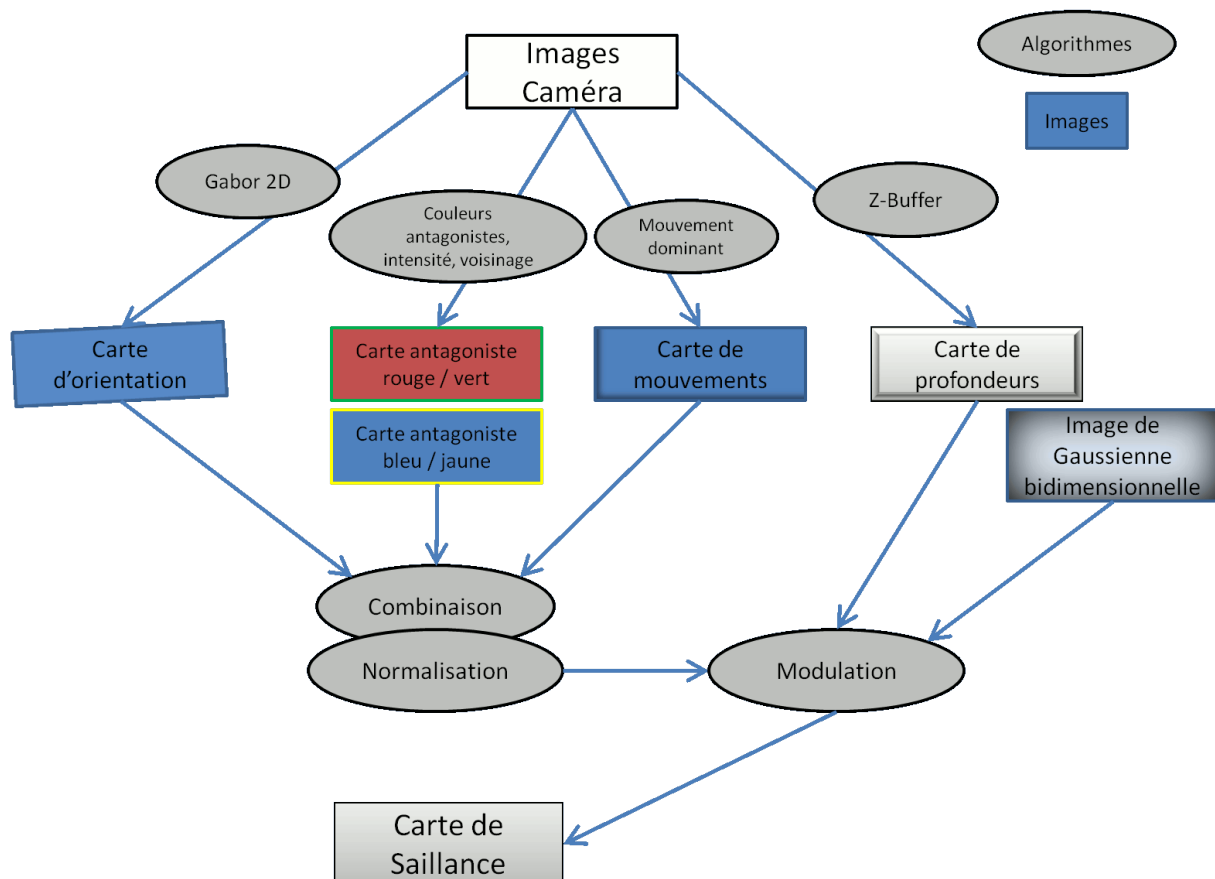


FIGURE 38 – Création d'une carte de Saillance

¹⁹Compute Unified Device Architecture

Le résultat de la combinaison, de la normalisation, puis la modulation de ces cartes est la carte de saillance elle-même. L'utilisation d'autant de filtres pour sa création n'est pas obligatoire. En effet, Itti et Koch [Itti and Koch, 2000] n'utilisent que des filtres de couleurs, intensité et orientation, ceci pour diminuer le temps de calcul de la carte de saillance pour l'utilisation temps réel. La définition de la précision de l'image pour simuler au mieux la vision périphérique dépend de la capacité de calcul lors de la simulation : plus les machines sont puissantes (ou nombreuses) plus les filtres peuvent être précis et nombreux, et plus la carte de saillance a une grande définition. Mais il reste possible de tester les capacités de calcul en fonction de la taille du rendu de caméra : un filtre sur une image HD1080 (i.e. 1920x1080 pixels) sera beaucoup plus long que le travail sur une image en WVGA (i.e. 854x480 pixels).

Une fois la carte de saillance obtenue, des zones dans l'image apparaissent comme étant plus saillantes que d'autres (i.e. la valeur associée à un pixel de la carte de saillance est plus élevée). Pour un système de vision synthétique, la méthode de sélection des zones est généralement la technique du « Winner Take All » : le regard se porte vers l'objet le plus saillant, puis l'objet immédiatement moins saillant ([Itti and Koch, 2001], [Michael, 2007]). Mais dans notre cas, la carte de saillance va générer des requêtes perceptives plus ou moins prioritaires pour chaque zone. Plus la saillance de la zone est importante, plus la priorité de la requête perceptive associée est importante. Le temps de vie de chaque requête est identique et relatif à la vitesse de déplacement de l'observateur. Un objet saillant à un instant donné ne l'est plus en peu de temps si l'observateur se déplace rapidement dans une direction transverse. La saillance n'est donc remarquée que si la priorité de la saillance est plus importante que celle des autres requêtes en attente. Cela entraîne une inhibition des saillances peu élevées et/ou pas suffisamment élevées à un instant donné. Nous apportons donc un système permettant l'émergence d'inhibitions sans qu'un processus dédié ne s'y affère.

Malheureusement, le calcul des cartes de saillance n'est pas possible avec les outils que nous connaissons sur SiVIC. En effet, le processeur central ne peut tenir le temps réel avec la quantité de calculs imposés par les différentes cartes, nécessaires à la création de la carte de saillance, même si nous diminuons la fréquence de calcul des cartes. En revanche, la dernière version de la plateforme permet de commander des calculs en CUDA, ce qui pourrait permettre le calcul des cartes de saillance grâce aux nouveaux processeurs graphiques de marque Nvidia. De plus, pour un calcul très rapide des cartes de saillance, il est possible d'utiliser une machine secondaire dédiée. Pour cela, l'utilisation de notre protocole de communication UDP permet de créer un environnement identique sur plusieurs machines en parallèle, et de dédier une de celles-ci au calcul de la saillance. En utilisant une machine performante utilisant la technologie Tesla²⁰ de Nvidia, nous pouvons espérer que le temps réel sera conservé malgré le nombre de calculs nécessaires. Enfin, le protocole XMPP nous permet d'envoyer les requêtes perceptives définies par la saillance au module perception présent sur l'ordinateur de simulation primaire (simulant l'environnement et l'œil virtuel).

4.4.5 Implémentation d'un « œil virtuel »

Pour doter notre modèle de fonctions perceptives complètes, il était nécessaire de développer un « œil virtuel » sur SiVIC capable de simuler certaines caractéristiques essentielles de l'œil

²⁰<http://www.nvidia.com/object/tesla-supercomputing-solutions.html>

biologique humain, comme la vision fovéale versus périphérique, sans avoir toutefois la prétention de modéliser ici un œil humain dans toute sa complexité naturelle.

4.4.5.1 Création de l'œil virtuel au moyen de caméras SiVIC

Pour simuler l'œil humain dans SiVIC, nous avons utilisé les caméras existantes sur cette plateforme, permettant ainsi de bénéficier pleinement de leurs caractéristiques techniques très utiles pour nos objectifs de simulation numérique. En effet, les caméras SiVIC sont des objets informatiques particulièrement élaborés et permettant une configuration précise, tant par leurs paramètres propres que par leurs paramètres dérivés de OpenGL [Gruyer et al., 2010b]. Comme tous les objets de cette plateforme logicielle, une caméra peut être positionnée dans un référentiel (immobile ou non, comme celui du véhicule) et peut pivoter selon les trois axes. Grâce à cela, il est possible de diriger la caméra en direction d'un point de l'environnement et de la déplacer en même temps que le véhicule.

Pour développer notre œil virtuel, nous avons donc utilisé une ou plusieurs caméras SiVIC que nous avons configurées de manière spécifique, au regard de nos objectifs de simulation de la perception du conducteur automobile. Nous allons présenter ici de manière chronologique les développements informatiques que nous avons réalisés durant la thèse, afin de mettre en évidence les découvertes progressives et les difficultés que nous avons rencontrées liées à l'utilisation des caméras SiVIC pour simuler l'œil humain.

Dans un premier temps, avec la version 2008 de SiVIC, nous avons utilisé une caméra « classique », avec une ouverture verticale de 25 degrés d'angle, placée à hauteur de la tête du conducteur dans son véhicule, et attachée au châssis de ce véhicule. Pour permettre la visualisation de l'œil, nous avons ainsi intégré cette caméra dans la simulation de l'environnement et son rendu graphique a été ajouté à la visualisation de l'environnement assuré par une caméra immobile, placée au niveau du conducteur. Les champs visuels présents dans cette vue ont été définis grâce à des objets graphiques semi-transparents placés juste devant la caméra, permettant ainsi de flouter une partie de l'image.

Avec l'arrivée de la version 2010 de SiVIC, nous avons pu tester de nouvelles caméras virtuelles. Nous nous sommes alors tournés vers l'utilisation d'une caméra de type « grand-angle » permettant d'obtenir un angle d'ouverture conséquent et offrant ainsi une bonne simulation du champ visuel humain grâce à une seule caméra (les 180 degrés de champ visuel total de l'humain proviennent de la vision binoculaire). Hélas, l'utilisation d'une telle caméra fait chuter drastiquement les performances de l'ordinateur d'accueil et ne permet pas de conserver le temps réel de la simulation. Nous avons donc dû renoncer à cette option pour notre modèle de simulation numérique.

Nous nous sommes alors dirigés vers l'utilisation de deux caméras distinctes pour simuler l'œil. En effet, l'utilisation d'une seule caméra impose de subdiviser l'image collectée pour traiter séparément chaque partie de l'image, selon qu'elle corresponde à la vision fovéale ou périphérique. A l'inverse, l'utilisation d'une caméra par champ visuel nous permet de spécialiser chaque caméra, ce qui simplifiera considérablement les développements futurs. Ainsi, la première caméra, correspondant à la vision fovéale, possède une ouverture verticale de 5 degrés d'angle avec un rendu carré (800 pixels par 800 pixels). La seconde caméra, correspondant à la vision périphérique, possède une ouverture verticale de 24 degrés d'angle, mais avec un rendu rectangulaire de

ratio 7.08 (5464 pixels par 768 pixels), permettant ainsi une ouverture horizontale de 170 degrés d'angle. Cela ne reflète pas l'ouverture angulaire verticale de la vision humaine, mais nous avons néanmoins choisi cette option pour deux raisons principales. Tout d'abord, le rendu est très fluide, car les images créées sont simples à calculer. De plus, une ouverture verticale de 24 degrés nous permet la visualisation du haut du tableau de bord du véhicule ainsi que du début du plafonnier du véhicule simulé, ce qui est pour l'instant suffisant pour nos objectifs de simulation.

Nos développements informatiques ont été initialement basés sur le modèle de caméra disponible dans SiVIC 2008, mais toutes les fonctions développées ont été ensuite transposées avec succès vers la nouvelle version de la plateforme, permettant ainsi l'utilisation des nouvelles caméras pour simuler au mieux l'œil humain.

4.4.5.2 Simulation des champs visuels

Comme nous l'avons rapidement abordé ci-dessus, la caméra utilisée pour concevoir notre œil virtuel doit pouvoir simuler les deux champs visuels de l'œil biologique humain. Pour cela, nous avons opté pour la création et l'utilisation d'objets semi-transparents placés devant la caméra. Ces objets graphiques tridimensionnels sont des cônes de révolution blancs semi-transparents, coupés à leur sommet pour laisser l'image sans floutage à cet endroit.

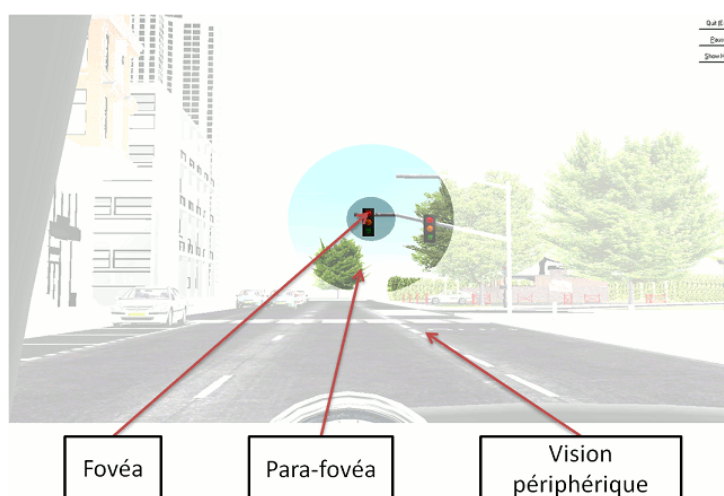


FIGURE 39 – Capture d'écran de la caméra simulant l'œil et ses champs visuels



CodeQR 2: (1) <http://youtu.be/ZYdCsmJOQF8> (2) <http://youtu.be/Y5lPE18AAs0>

L'utilisation des cônes semi-transparents placés devant la caméra permet une bonne visualisation des caractéristiques de l'œil humain, avec ses différents champs visibles. Le floutage de la

vision périphérique permet de représenter cette vision imprécise et offre une bonne représentation de ce champ visuel pour la compréhension par l'observateur du modèle. En revanche, elle n'offre pas une ouverture angulaire importante, nous ne pouvons donc pas obtenir l'intégralité de l'ouverture d'angle représentant la vision périphérique humaine. Le centre représente la zone fovéale, où la vision est la plus précise, qui reste constamment nette.

La seconde approche, utilisant deux caméras distinctes, nous donne un rendu bien différent, car la séparation des caméras pour chaque champ visuel n'offre pas une représentation facile à interpréter, elle demande un peu plus d'abstraction. En revanche, la représentation de la vision périphérique est plus précise : l'angle d'ouverture se rapproche plus de la vision périphérique humaine.



(a) Fovéa



(b) Périphérique

FIGURE 40 – Capture d'écran des caméras dans SiVIC simulant l'œil et ses champs visuels

4.4.5.3 Simulation de la fovéa

La zone fovéale est la zone du champ de vision permettant de faire remonter la majorité des informations provenant de l'environnement. Il a donc été nécessaire de simuler cette zone pour permettre l'extraction d'informations dans l'environnement simulé. Pour cela, deux solutions étaient possibles : le traitement d'images ou l'envoi de lasers. La première option impose principalement la reconnaissance de formes, qui peuvent ne pas être entières dans la zone fovéale, elle est donc inutilisable dans notre approche, même si elle est pertinente pour la robotique ou la vision synthétique. Nous avons donc opté pour la seconde solution

L'envoi de lasers est une technique permettant de savoir quel(s) objet(s) se trouve sur le chemin d'un laser tiré sur un pixel d'un rendu caméra en OpenGL. Il s'agit de tirer un laser en ligne droite dans le monde simulé à partir d'un pixel d'une caméra. Ce laser va rencontrer plusieurs objets sur sa trajectoire et il est nécessaire de sélectionner le premier objet rencontré pour savoir quel objet visible est trouvé par le laser.

Nous avons donc créé une zone de caméra correspondant à la zone fovéale de l'œil, où nous tirons plusieurs lasers pour savoir quel(s) objet(s) est(sont) présent(s) dans la zone fovéale. Il est théoriquement possible de prendre chaque pixel de la zone fovéale pour obtenir tous les objets

présents dans la zone, mais cette approche demande tout d'abord énormément de puissance de calcul, et surtout ne rend pas compte de l'acuité maximale de l'œil. En effet, un humain ne peut distinguer deux objets séparés de moins d'une minute d'arc. Avec une fovéa de 800x800 pixels correspondant à 5 degrés d'angle, un pixel représente 0,375 minute d'arc. Nous avons donc pu limiter le nombre de lasers envoyés dans la zone fovéale, car une minute d'arc correspond à 2,6 pixels.

L'envoi de lasers dans SiVIC grâce à l'OpenGL repose sur un algorithme permettant de savoir quel objet est traversé par le laser, parmi tous les objets présents dans la scène. Suite à plusieurs tests, nous avons décidé d'optimiser cet algorithme pour gagner en rapidité d'exécution, sans quoi nous devions nous limiter en nombre d'envois de lasers pendant une requête perceptive. Nous avons donc modifié l'algorithme pour ne prendre en compte qu'une liste réduite d'objets. Cette liste est accessible par l'interface du module perception. Elle intègre initialement tous les objets de la scène, mais intègre aussi un filtre (inclusif ou exclusif, à la convenance de l'utilisateur) permettant de se limiter à des objets déterminés. Pour notre travail, nous avons listé les objets pertinents pour la simulation de la perception : nous filtrons tous les objets de type décors (arbres, bancs publics, etc.) et ceux utiles à d'autres modules (points de poursuite, points de trajectoires, etc.).

Cette optimisation d'algorithme réalisée, nous avons calculé que l'envoi de 100 lasers prenait approximativement 110 ms, moyennant les erreurs des chronomètres Windows de quelques millisecondes. Au vu des données apportées par [Plavsic et al., 2010] ainsi que [Yarbus, 1967] et [Rayner, 1998], mais aussi avec les résultats obtenus pendant notre expérimentation sur les stratégies visuelles (cf.5.2.5 p.154), nous avons décidé que le temps minimal d'une fixation pour notre modèle serait de 100 ms : il est possible d'observer des fixations à 75 ms, mais l'intégration de l'information n'est pas suffisante. Ainsi, nous pouvons nous permettre d'envoyer 93 lasers durant une fixation. Pour envoyer ces lasers, nous subdivisons une fixation en plusieurs envois de 100 ms. Ainsi, pour une fixation de 100 ms, nous envoyons d'un seul coup 93 lasers, mais dans la majorité des cas nous envoyons les lasers par paquets pour éviter tout problème de surcharge du CPU (e.g. une fixation de 350 millisecondes possèdera 2 paquets de 46 lasers puis un paquet de 1 laser, les 50 dernières millisecondes étant réservées au traitement des objets vus).

Ensuite, nous avons déterminé comment disposer les lasers dans la zone fovéale. Pour cela, il est nécessaire d'avoir une disposition homogène sur le disque. Mais l'utilisation de formules classiques de parcours d'un disque (composées de sinus et cosinus, utilisation de coordonnées polaires, etc.) implique un balayage particulier du disque qui ne convient pas (sens direct, du centre vers la périphérie, etc.). En effet, une fixation peut être stoppée net en cas de réception par le module perception d'une nouvelle requête urgente à traiter toute affaire cessante. Nous ne pouvons donc pas nous contenter d'observer le quadrant supérieur droit de la fovéa, par exemple. Il est donc nécessaire d'envoyer les lasers de manière aléatoire dans le disque, avec une disposition finale homogène. Pour cela, nous avons opté pour la création d'un patron permettant de définir où envoyer les lasers avec sélection aléatoire, car l'utilisation d'algorithmes particuliers (comme la technique « Poisson-Disk Sampling » [McCool and Fiume, 1992] [Jones, 2006]) diminue le temps d'exécution de l'algorithme d'envoi de lasers. Ce patron est présenté figure 41. Lors d'un mouvement de suivi de cible, l'envoi des lasers se fait tout au long du suivi, et la plateforme SiVIC positionne la caméra avant d'effectuer l'envoi de lasers. Cela permet, à grande vitesse, de tourner la caméra, envoyer les lasers, tourner la caméra, envoyer les lasers, etc.

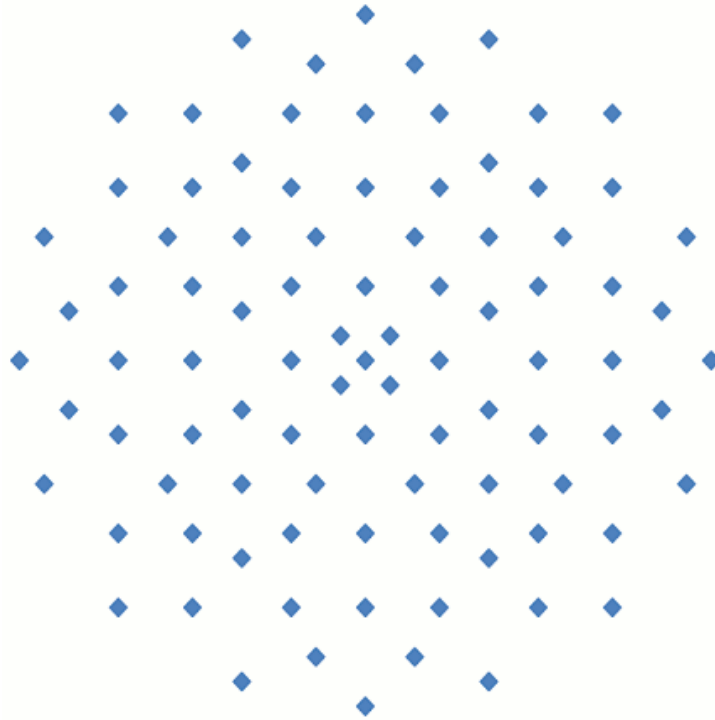


FIGURE 41 – Disposition des lasers dans le disque représentant la fovéa

Lorsque les lasers ont été envoyés, notre fonction renvoie une liste des objets traversés. Cette liste ne contient que les objets ayant été les premiers sur la trajectoire des lasers. De plus, cette liste contient pour chaque objet, le nombre de lasers l'ayant percuté, ce qui permet d'obtenir un ordre d'idée de la taille de l'objet dans la fovéa. Nous pouvons par exemple, supprimer les objets n'ayant qu'une seule percussioin par laser. Enfin, une fois la liste obtenue, le module perception peut répondre à la requête perceptive qui l'a amené à regarder dans cette direction et voir les objets de la liste.

Cette technique d'envoi de lasers dans la fovéa peut permettre de nombreuses autres options au sein du module perception, telle que l'estimation de la vitesse d'un objet observé en calculant la différence de taille estimée entre deux envois globaux de lasers, avec le nombre de lasers percutant l'objet visé. Pour cela il est nécessaire d'augmenter la vitesse de la fonction pour envoyer 200 lasers en moins de 100 ms. Cela rejoint la capacité des êtres vivants à estimer la vitesse relative d'un objet par rapport à eux, en utilisant le grossissement de l'image de cet objet sur leur rétine [Lee, 1980] [Savelsbergh et al., 1991] [Bootsma and Craig, 2002]. Cette méthode permettrait de mettre en place une boucle de régulation très bas niveau au sein du modèle. Elle permettrait de contrôler, par exemple, la régulation de vitesse nécessaire à un suivi de véhicule ou l'activation d'un type de freinage particulier plutôt qu'un autre, grâce à une boucle de régulation ne passant pas par le module tactique du modèle, mais uniquement par les modules de perception et d'exécution d'actions.

4.5 Implémentation du module d'exécution d'actions

Le module d'exécution d'actions a été, chronologiquement, le premier module que nous avons développé, afin de vérifier la possibilité de piloter un modèle de véhicule SiVIC à partir d'un module externe. Pour ce faire, nous avons dû créer un module fortement lié aux véhicules virtuels de SiVIC. Afin de garantir l'accès à l'objet informatique « sivicCar » et ses méthodes, nous avons créé une classe fille pour nos propres besoins. En effet, pour pouvoir se déplacer dans l'environnement routier virtuel, notre modèle de conducteur se doit de piloter un véhicule SiVIC spécifiquement approprié.

4.5.1 Contrôle longitudinal du véhicule

Le contrôle longitudinal du véhicule tel que nous l'avons implémenté repose sur un processus de régulation de la vitesse géré par une fonction utilisant une « vitesse de consigne ».

Cette fonction permet tout d'abord d'appliquer une accélération ou une décélération au modèle de véhicule afin d'atteindre la vitesse cible. Une fois cette vitesse atteinte, elle contrôle ensuite son maintien. Le modèle peut aussi accélérer ou décélérer de plusieurs façons différentes (accélération forte ou accélération moyenne, par exemple), et il est enfin possible de spécifier ou d'imposer une oscillation autour de la vitesse de consigne.

4.5.2 Contrôle latéral du véhicule

Pour piloter le véhicule, la prévision et le maintien de la position sur la trajectoire de conduite se font par l'entremise des points de poursuite décrits en 3.4 (p.83). Pour améliorer cette méthode, nous avons cependant décidé d'utiliser deux types de points : les « points de poursuite » tels que nous les avons précédemment décrits, et des « points cibles », qui sont les projetés orthogonaux des points de poursuite sur le segment composant la trajectoire prévue.

Les points de poursuite que nous avons intégrés à SiVIC peuvent être visualisés sous la forme de petits cubes rouges positionnés en avant du véhicule. Les points cibles sont visualisables pour leur part comme de petits cubes bleus (cf. fig.42).

Une fois ces points positionnés dans l'environnement, le calcul de l'angle de braquage à appliquer pour permettre le suivi de la trajectoire est réalisé au moyen de la formule mathématique décrite en 3.4 p.83. Les points cibles ne sont que des moyens permettant de faciliter le calcul de l'angle de braquage nécessaire, calculé par la fonction $\pm \arcsin\left(\frac{D_{Vehicule-PointCible}}{D_{Vehicule-PointPoursuite}}\right)$; le signe étant déterminé par produit scalaire.

Une fois l'angle de braquage déterminé par le modèle, le module d'exécution applique ce braquage au modèle de véhicule SiVIC, qui effectuera alors la rotation des roues [Gruyer et al., 2006].

De plus, il est possible de pondérer les points pour permettre de trouver un équilibre entre le point de poursuite proche et le point lointain. Cette pondération se fait par le passage d'instructions au module d'exécution. Ces paramètres doivent être deux valeurs rationnelles comprises dans [0,1], pondérant l'importance du point dans le calcul de l'angle à appliquer. Par exemple, en zone urbaine (plage de vitesse dans [0,50]), nos valeurs de pondération sont 0,6 pour le point proche et 0,4 pour le point lointain.

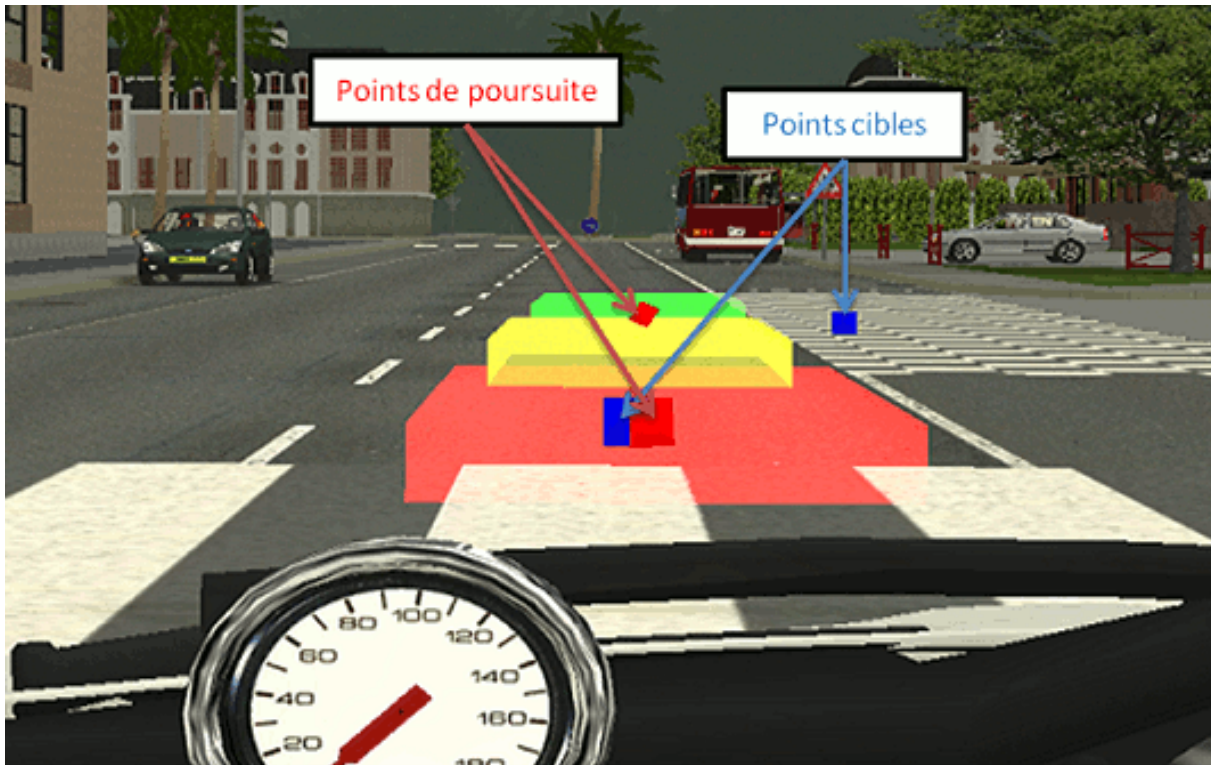


FIGURE 42 – Capture d'écran avec les points de poursuite visibles

4.5.3 Implémentation des zones enveloppes

La figure 42 nous montre aussi trois objets semi-transparents de couleur respectivement rouge, jaune et verte. Ces trois objets représentent les zones enveloppes du véhicule en cours de déplacement. Elles sont respectivement placées à 0,6, 1,2 et 1,8 seconde en avant du véhicule. Leur position latérale et leur orientation dans le repère du véhicule sont calculées en fonction du braquage appliqué au volant. Leur position longitudinale est pour sa part fonction de la vitesse du véhicule.

L'utilisation de ces zones enveloppes permettra à terme de faire émerger des conflits potentiels, comme la présence d'un obstacle sur la route, ou un conflit avec les zones enveloppes d'un autre véhicule. Cela sera possible, car la plateforme SiVIC permet de détecter les collisions entre les objets de la simulation. Mais un problème majeur nous est apparu pendant le développement : détecter une collision, c'est comparer la collision d'un objet avec tous les objets du monde. Le calcul d'intersection entre deux solides déterminés est un algorithme complexe, et malgré les optimisations envisageables [Lin, 93] [Lin and Manocha, 2004] (élagage pair-à-pair, diminution du nombre d'objets, cohérence temporelle, etc.), il n'est pas encore possible à ce jour de calculer la collision des zones enveloppes avec les autres objets de l'environnement tout en conservant le temps réel. Ce sera l'un des enjeux majeurs des futurs développements de COSMODRIVE sur SiVIC.

Par ailleurs, comme nous pouvons le voir sur la figure 42, il existe un espace entre les zones enveloppes. Cela provient du fait que le moteur graphique de la plateforme SiVIC empêche la modification à la volée de la taille des objets graphiques. Il nous est donc impossible d'augmenter la taille de l'objet *zone enveloppe* en fonction de la vitesse du véhicule. Pour pallier ce problème,

4.6. Démonstrations : visualisation de résultats obtenus par la simulation numérique

nous avons essayé de créer une zone enveloppe construite par la superposition de trois objets graphiques s'étirant avec la vitesse du véhicule. Ainsi, plus la vitesse augmente, plus les trois objets se séparent, créant par là-même un groupe d'objets ayant une taille relative à la vitesse du véhicule. Mais si une zone enveloppe est composée de trois objets graphiques, trois zones enveloppes demandent neuf objets graphiques, et cela pour chaque objet mobile du monde. Les premières limites de calcul apparaissent ici, car les performances graphiques chutent fortement avec le nombre d'objets à afficher. Avec quelques véhicules dans la simulation (six) nous sommes arrivés à la limite du nombre d'images affichées par seconde. Nous avons donc préféré conserver des zones enveloppes à taille fixe, pour nous permettre de conserver le calcul temps-réel. Cela ne devrait pas créer de biais important à faible vitesse, car la distance entre deux zones enveloppes restera très courte et un objet présent ou traversant devant le véhicule entrera alors en collision avec l'une d'elles. En revanche, à plus grande vitesse, au-dessus de 110 km/h, il est possible qu'un objet traverse les zones enveloppes sans entrer en contact avec un objet graphique représentant une zone enveloppe.

Grâce à ces zones enveloppes, le modèle peut prévoir un obstacle sur sa route pour engager très rapidement un évitement de celui-ci, calculé à partir de la position et de la taille de l'obstacle à l'intérieur de la zone enveloppe (intersection de solides tridimensionnels). Il peut aussi grâce à la matrice de risques (figure 19, p.65), évaluer la dangerosité de la situation à 1,8 seconde d'horizon pour pouvoir engager ou non une action de régulation en fonction de son niveau d'acceptation du risque.

En l'état actuel de son implémentation, le modèle est capable de générer des conflits de zones enveloppes et d'en permettre la visualisation, mais les limites de la plateforme SiVIC évoquées ci-dessus (en termes de gestion dynamique de la taille des zones comme de procédure de calcul d'intersection entre solides) et la puissance de calcul de notre machine ne lui permettent pas encore de prendre des décisions pour adapter ses actions en conséquence, tout en préservant le temps réel. Cependant, les résultats obtenus sont suffisants pour pouvoir générer des prédictions comportementales intéressantes. Nous allons donc présenter dans la section suivante une démonstration des fonctionnalités de visualisation des conflits que permet le modèle actuel, puis, dans le chapitre suivant (section 5.4), une expérimentation réalisée auprès de conducteurs en vue de comparer les prédictions du modèle avec des performances humaines.

4.6 Démonstrations : visualisation de résultats obtenus par la simulation numérique

Cette section vise à présenter différents exemples de résultats de simulation que permet d'obtenir notre modèle de simulation numérique de conducteur tel que nous l'avons implémenté sur SiVIC. Une première série de démonstrations portera sur la visualisation des conflits de zones enveloppes entre le véhicule-sujet et les autres véhicules. La seconde série présentera différents exemples de simulation des représentations mentales du conducteur, dont le contenu sera potentiellement altéré par une tâche de distraction visuelle parallèle à la conduite. La dernière série de démonstrations permettra de visualiser les stratégies visuelles du modèle, résultant du processus d'exploration perceptive, ainsi que d'observer les résultats du processus d'intégration cognitive de l'information, via la mise à jour des représentations perceptives et cognitives du modèle.

4.6.1 Simulation des conflits de zones enveloppes et du déploiement cognitif pour la prise de décision

Cette première démonstration porte sur la visualisation des conflits de zones enveloppes inter-véhiculaires, ce qui nous permet d'utiliser la simulation pour prédire un comportement en fonction des différents conflits possibles. La prise en compte de ces conflits de zones est utilisée par le conducteur humain au moment de l'exécution de ses manœuvres, mais aussi très en amont pour pouvoir anticiper les effets d'actions alternatives, lors de déploiements cognitifs lui permettant de « dérouler » une situation dans le futur afin d'estimer les conséquences d'une ou plusieurs actions sélectionnées en amont.

La simulation présentée dans la figure 43 et le QR code 3 permet de visualiser les résultats qu'il est possible d'obtenir avec notre modèle concernant ce déploiement cognitif des représentations mentales. Cette simulation concerne une situation de tourne-à-gauche en intersection urbaine. Dans ce type de situation, lorsque des véhicules circulent à contresens, le conducteur doit déterminer quand il est possible d'engager la manœuvre de tourne-à-gauche sans provoquer de collision. Selon la théorie postulée par COSMODRIVE, cette décision repose sur le déploiement cognitif de la représentation courante permettant au conducteur d'examiner mentalement les risques de conflits susceptibles de se produire en fonction de différentes alternatives comportementales. En utilisant une matrice de conflits, il pourra alors comparer ces solutions et opter pour celle qui lui semblera la plus appropriée aux caractéristiques de la situation telle qu'il l'a perçue.

La figure 43(a) correspond à la situation au départ du processus de déploiement. La suivante (43(b)) permet de visualiser un premier conflit possible : il s'agit d'un conflit « Rouge(véhicule-sujet)-Vert(véhicule à contresens) » modérément critique. Le déploiement cognitif se poursuit en engageant la manœuvre de tourne-à-gauche. La figure 43(c) permet alors de visualiser un second conflit, mais cette fois celui-ci est extrêmement risqué : un conflit Rouge-Rouge. Grâce à cela, le conducteur peut, certes, estimer qu'il est possible d'engager la manœuvre sans avoir de collision (figure 43(d)), mais que cela impose une prise de risque très élevée.

L'examen d'une solution alternative est donc souhaitable. Le déploiement cognitif présenté en figure 44 et code QR 4 permet de visualiser ce qui se produira si le conducteur décide de s'arrêter, afin de réaliser le tourne-à-gauche une fois le dernier véhicule à contresens passé.

Dans cette dernière configuration, il n'y a pas de conflit avec le véhicule circulant à contresens : traverser la voie d'en face ne représente alors aucun risque, mais en revanche, le temps nécessaire pour atteindre le but final du schéma tactique sera aussi beaucoup plus conséquent.

Cette démonstration permet de visualiser ce que notre modèle de simulation permet de générer en matière de déploiement cognitif d'un schéma tactique.

A terme, l'objectif est de rendre le module tactique autonome pour la génération et la comparaison de telles représentations anticipées, lui permettant de prendre ses décisions en temps réel. Cependant, comme nous l'avons souligné dans les sections 3.2.3 et 4.5.3, cela nécessitera d'optimiser l'implémentation des zones enveloppes sur SiVIC (en termes de gestion dynamique de la taille des zones comme de procédure de calcul d'intersection entre solides), mais aussi, très probablement, d'utiliser en parallèle de notre programme plusieurs machines capables de réaliser simultanément différents déploiements cognitifs.

4.6. Démonstrations : visualisation de résultats obtenus par la simulation numérique

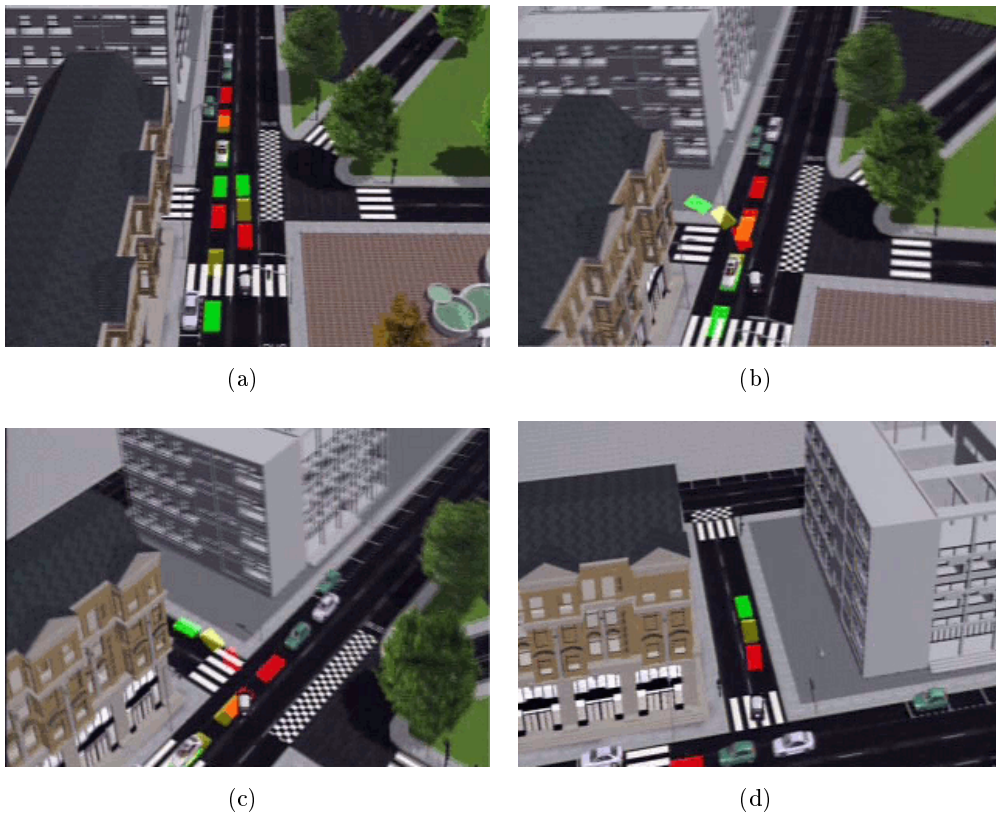


FIGURE 43 – Premier déploiement cognitif possible en situation de tourne-à-gauche



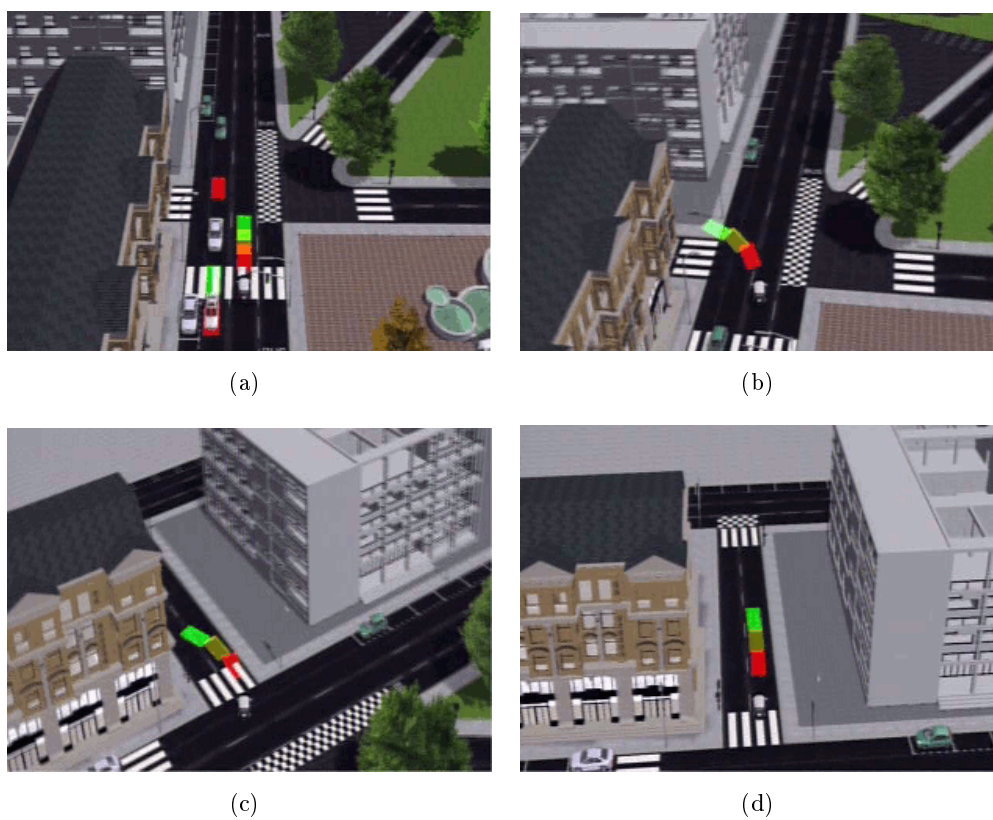


FIGURE 44 – Second déploiement cognitif possible en situation de tourne-à-gauche



CodeQR 4: <http://youtu.be/KCtH4knfoSY>

4.6. Démonstrations : visualisation de résultats obtenus par la simulation numérique

Néanmoins, si la version actuelle du modèle ne permet pas de simuler automatiquement l'ensemble du processus de prise de décision fondé sur l'anticipation, il est en revanche possible de l'utiliser pour générer successivement - à l'image de nos démonstrations précédentes - des déploiements alternatifs et d'observer les conflits de trajectoires se produisant. Ce processus de génération assistée est certes laborieux, mais il permet de produire les mêmes résultats finaux qu'obtiendrait un modèle de simulation complètement implémenté. Il est donc possible, en assistant manuellement notre modèle, de générer des prédictions comportementales à partir de notre simulation numérique du processus de décision fondée sur le déploiement cognitif et la matrice de conflits des zones enveloppes. Nous présenterons dans le prochain chapitre (section 5.4) une expérimentation réalisée auprès de conducteurs réels, en vue de comparer les prédictions de notre modèle avec des performances humaines.

4.6.2 Simulation des représentations mentales et des effets de la distraction visuelle

La simulation et la visualisation des représentations mentales du conducteur étaient l'un des enjeux majeurs de notre travail. En effet, observer ces représentations, c'est accéder aux états internes du système cognitif humain et visualiser « en dynamique » l'activité mentale du conducteur. Il était donc primordial de pouvoir visualiser ces représentations et analyser leurs différences potentielles avec la réalité situationnelle. Grâce à l'utilisation de plusieurs machines, il est possible d'avoir plusieurs écrans affichant en même temps les différentes simulations synchronisées de l'environnement routier virtuel d'un côté et des représentations mentales de l'autre.

Pour illustrer les capacités de notre modèle de simulation numérique, nous allons présenter ici trois exemples de simulations obtenues dans le cadre d'une situation de suivi de véhicule en zone urbaine, avec arrivée à hauteur d'un carrefour à feux. Si la tâche de conduite du modèle reste toujours la même, c'est-à-dire suivre un véhicule en maintenant une distance de sécurité acceptable, ces trois simulations renvoient à trois scénarii différents.

Scénario 1 : suivi en approche carrefour à feux verts

Dans le cadre du premier scénario, le suivi est réalisé alors que les feux tricolores restent au vert durant le franchissement du carrefour. Le modèle réalise la tâche de suivi correctement et traverse le carrefour sans aucun problème particulier.

Nous voyons sur chaque image de la figure 45, à droite le monde réel et l'œil virtuel, à gauche la représentation mentale. Au début de la situation (fig 45(a)), le véhicule blanc (que le modèle doit suivre) roule normalement. Ensuite, le modèle du conducteur observe le feu (fig 45(b)) en déplaçant son œil virtuel en direction des feux tricolores, puis il repose le regard sur la scène avant et la situation suit son cours normalement (fig 45(c)).

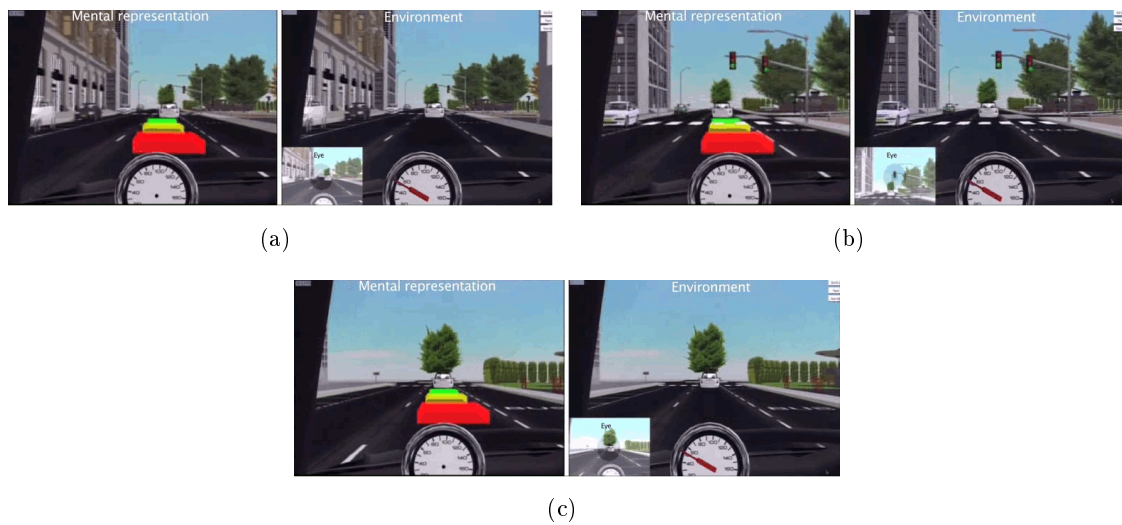


FIGURE 45 – Simulation de suivi en approche de carrefour à feux (verts)



CodeQR 5: <http://youtu.be/P7RFhDVgeB8>

Scénario 2 : suivi en carrefour avec changement de couleur des feux

Dans le second scénario, la tâche de conduite reste la même, mais la couleur des feux change alors que le véhicule précédent s'approche du carrefour. Celui-ci va donc freiner puis s'arrêter. La figure 46 ainsi que le codeQR 6 présentent le résultat de cette simulation.

Le modèle arrive au niveau de l'intersection en regardant le véhicule le précédent (fig 46(a)). Grâce à cette observation continue du véhicule suivi, le modèle met en permanence à jour sa représentation mentale et il intègre rapidement le changement de couleur des feux de stop du véhicule le précédent (fig 46(b)). Il va donc prendre en compte cette information pour engager le freinage nécessaire et s'arrêter (fig 46(c)).

4.6. Démonstrations : visualisation de résultats obtenus par la simulation numérique

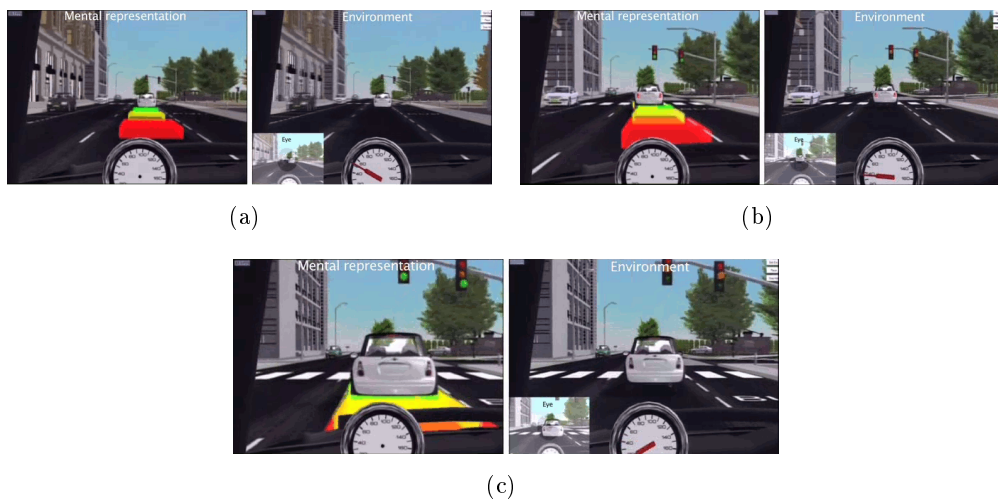


FIGURE 46 – Simulation de suivi en carrefour avec changement de la couleur des feux



CodeQR 6: <http://youtu.be/0sn-A1thsLg>

Scénario 3 : suivi en carrefour avec tâche de distraction visuelle

Dans le troisième scénario, la tâche de conduite reste toujours la même, mais une distraction visuelle est générée une seconde avant que les feux tricolores ne changent de couleur. Le véhicule précédent freine pour s'arrêter au feu. La figure 47 ainsi que le codeQR 7 présentent le résultat de cette simulation.

Le modèle se présente à l'intersection en observant le véhicule situé devant lui (fig 47(a)). Lorsque la tâche de distraction visuelle apparaît, le modèle tourne son regard en direction de l'écran placé dans l'habitacle du véhicule (fig 47(b)). Nous pouvons remarquer sur cette vue que le feu est passé à l'orange dans le monde réel, mais qu'il est encore vert dans la représentation mentale du modèle. Une fois la double tâche réalisée, le modèle repositionne l'œil virtuel sur la scène avant (fig 47(c)) et découvre la différence de position entre le véhicule réel et sa représentation. 100 ms après, le modèle met à jour sa représentation (fig 47(d)), cela entraîne un freinage d'urgence du modèle puisqu'il a détecté la présence d'un véhicule dans la zone enveloppe rouge. Ce freinage n'est pas suffisant pour stopper le véhicule, l'accident est inévitable (fig 47(e)).

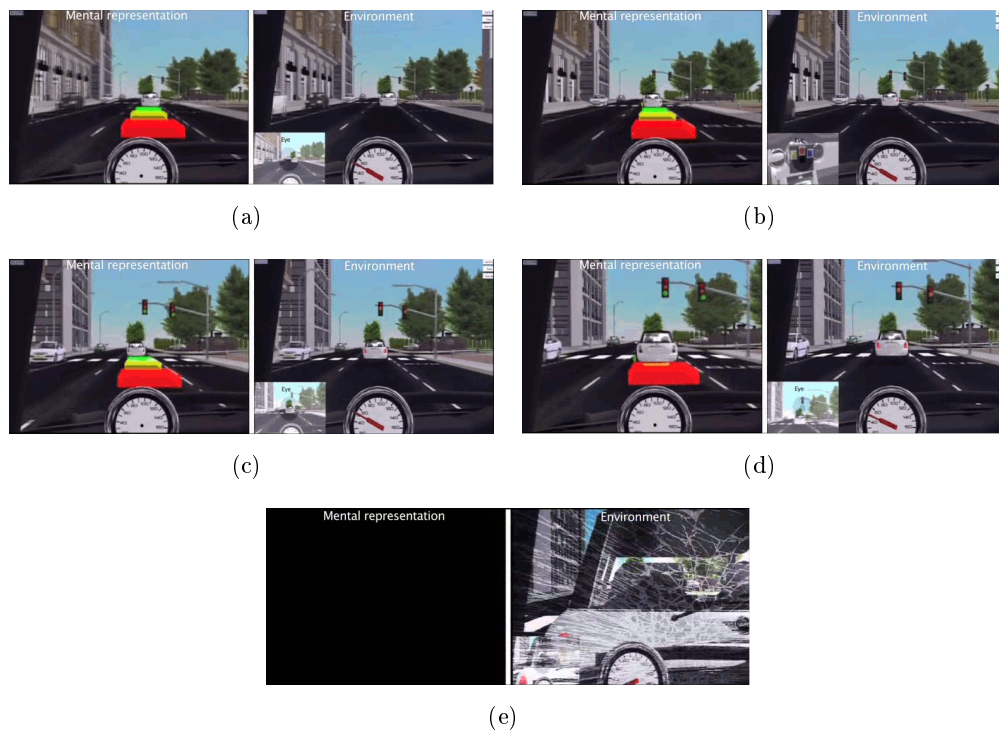


FIGURE 47 – Simulation de suivi en carrefour à feux, avec tâche secondaire de distraction visuelle et changement de la couleur des feux



CodeQR 7: <http://youtu.be/k9QAAVkooVY>

L'erreur simulée dans ce dernier scénario provient du fait que le modèle n'a pas accordé son attention visuelle aux bonnes sources d'information de l'environnement pour éviter l'accident. Il s'est laissé distraire en considérant, durant sa consultation de l'écran, que le feu est resté vert et que le véhicule blanc n'a pas changé de vitesse. Mais lorsque le feu change de couleur et que le véhicule suivi freine, sa représentation mentale devient erronée et se différencie de plus en plus de la situation réelle au fur et à mesure que le temps passe. C'est en positionnant de nouveau l'œil virtuel sur la route qu'il découvre une forte différence entre sa représentation et la réalité. Une fois l'erreur découverte, il freine en urgence, mais de façon trop tardive pour éviter la collision.

4.6.3 Simulation du cycle d'exploration et d'intégration de l'information et visualisation des stratégies visuelles

Dans cette dernière série de simulations, nous allons nous intéresser aux stratégies visuelles mises en œuvre par le modèle. Ces stratégies visuelles sont le résultat émergent d'un cycle perceptif reposant sur deux processus complémentaires : l'exploration perceptuelle et l'intégration

4.6. Démonstrations : visualisation de résultats obtenus par la simulation numérique

cognitive. Grâce à notre modèle informatique, il est possible de simuler le processus de recherche active d'informations dans l'environnement et de visualiser en retour le produit du processus d'intégration réalisé par l'œil virtuel, en observant la mise à jour dynamique des représentations mentales du modèle.

Pour illustrer ce fonctionnement, nous allons nous intéresser aux stratégies visuelles du modèle en situation de tourne-à-gauche dans le cadre du même carrefour à feu que les situations précédentes. Dans cette situation, le véhicule de notre modèle arrive à l'intersection tandis que deux véhicules circulent à contresens. Nous allons décrire deux prises de décision différentes, en fonction des conflits de zones enveloppes détectés et du niveau de risque accepté par le conducteur, en termes d'écart inter-véhiculaire minimal pour engager la manœuvre de tourne-à-gauche. Ces simulations ont donné lieu à des hypothèses de recherche pour une expérimentation réalisée auprès de conducteurs humains que nous décrivons en section 5.2 p.150.

Tourne-à-gauche sans conflit

Dans ce premier scénario, notre conducteur virtuel détecte la présence de véhicules circulant à contresens, et prend la décision de tourner à gauche après le second véhicule. La figure 48 et le codeQR 8 présentent le résultat de cette simulation.

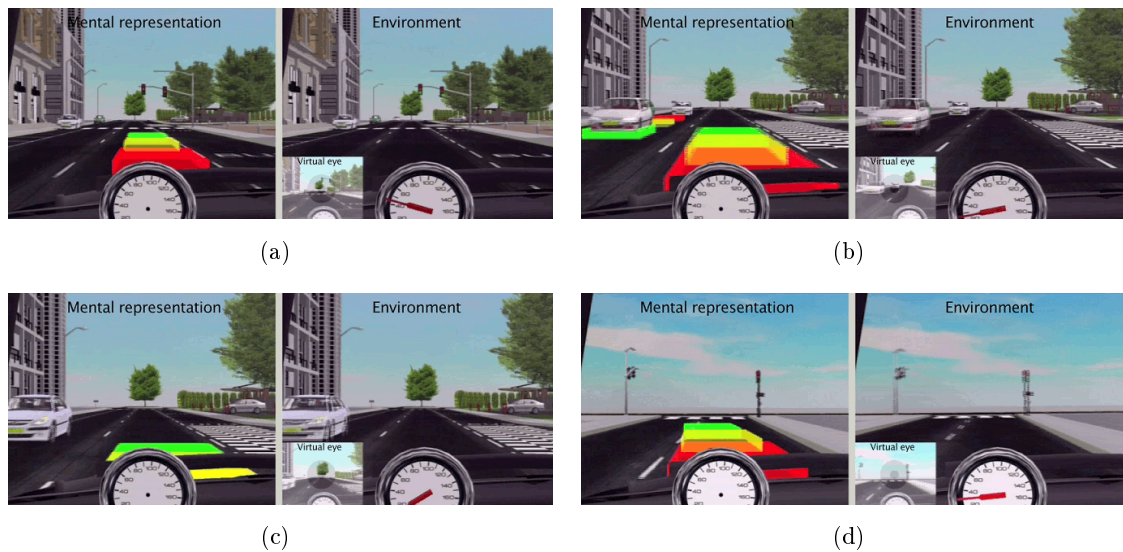


FIGURE 48 – Situation tourne-à-gauche sans conflit de zones enveloppes



CodeQR 8: <http://youtu.be/sWew6qwrXJ0>

Nous remarquons qu'à l'arrivée sur l'intersection, les véhicules à contresens sont présents au loin dans le monde réel, mais pas encore dans la représentation du conducteur (fig 48(a)). Suite à l'exploration perceptuelle préconisée dans les zones du schéma tactique (codeQR 8), cette partie

de l'espace est observée par le modèle en approche de l'intersection, et ces véhicules sont alors intégrés dans sa représentation mentale (fig 48(b)). Notre véhicule prend la décision de traverser la voie opposée une fois la dernière voiture passée (fig 48(c)), pour finir son tourne-à-gauche sans encombre (fig 48(d))

Tourne-à-gauche avec conflit

Dans ce second scénario, notre conducteur virtuel détecte bien la présence de véhicules circulant à contresens, mais il engage cette fois-ci la manœuvre de tourne-à-gauche avant le passage du second véhicule, en traversant sa zone enveloppe Rouge. La figure 49 et le codeQR 9 présentent le résultat de cette simulation.

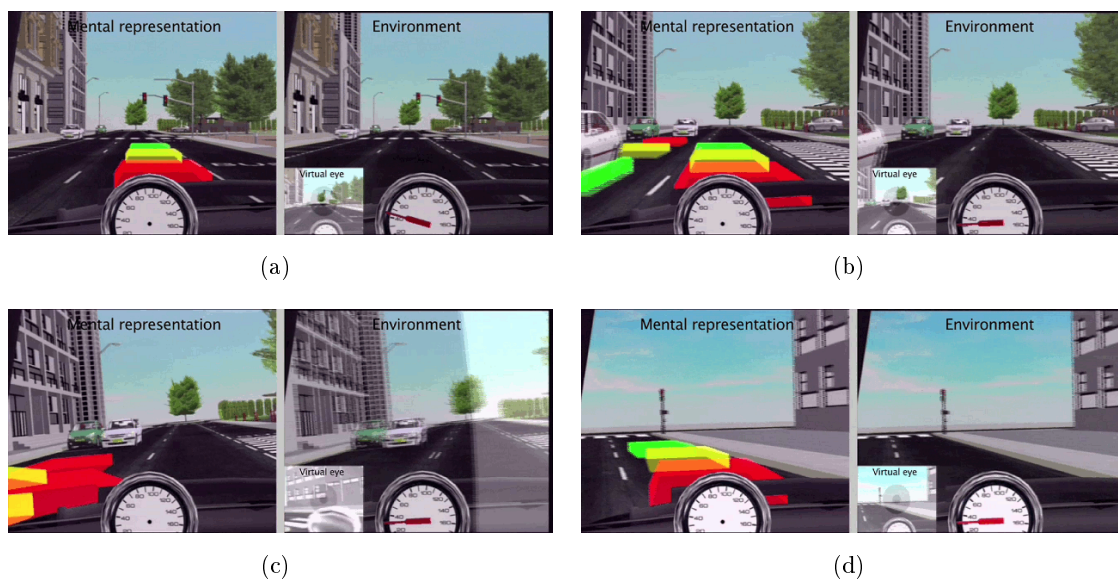


FIGURE 49 – Situation tourne-à-gauche avec conflit important de zones enveloppes



CodeQR 9: <http://youtu.be/Rs5n13kUTh4>

Comme pour le scénario précédent, le modèle n'a pas encore intégré les véhicules circulant à contresens en début de séquence (fig 49(a)), et ce n'est qu'après le déploiement d'une stratégie visuelle appropriée (codeQR 9) qu'il va obtenir ces informations (fig 49(b)). Mais à la différence de la situation précédente, notre modèle engage ici le tourne-à-gauche malgré le conflit critique que cela entraîne avec les zones enveloppes du véhicule opposé (fig 49(c)), pour finir rapidement son tourne-à-gauche sans accident (fig 49(d)). Cette manœuvre délibérée (il ne s'agit pas en effet ici d'une mauvaise perception puisque le véhicule opposé est bien intégré dans la représentation mentale) pourrait correspondre à ce que ferait un conducteur extrêmement pressé et/ou ayant un style de conduite particulièrement agressif, ou « sportif ». Mais il y a de fortes chances pour qu'il ait, dans ce cas, le sentiment de prendre (s'il s'agit d'un jugement précédant la manœuvre)

ou d'avoir pris (s'il s'agit d'un jugement a posteriori) un certain risque. Cette question sera investiguée expérimentalement dans le chapitre suivant.

Enfin, nous voulons souligner ici que les stratégies visuelles déployées par le modèle sont le résultat émergent du processus de gestion des requêtes perceptives générées par le module tactique, ayant une valeur de priorité élevée de 8 sur 10. Ces requêtes sont issues des zones d'explorations perceptives contenues dans le schéma de conduite de tourne-à-gauche utilisé par le module tactique, imposant d'explorer certaines zones de l'environnement routier au fur et à mesure que le modèle progresse sur sa trajectoire. Pour ce qui est des durées de fixation contenues dans ces requêtes perceptives, comprises entre 150 et 400 ms, elles se basent sur des valeurs observées auprès de conducteurs humains.

Au final, nous avons aussi montré dans cette section comment notre modèle de conducteur implanté sur SiVIC pouvait élaborer et mettre à jour dynamiquement ses représentations mentales de la situation à partir des informations prélevées dans l'environnement par l'œil virtuel puis intégrées cognitivement. La visualisation des représentations mentales issue de notre outil de simulation numérique permet ainsi de rendre compte des différences entre les représentations et la réalité objective. Ces différences peuvent être la conséquence d'une absence d'observation de l'environnement (parce que l'attention du conducteur se porte sur d'autres choses), d'une impossibilité de perception par l'œil virtuel (information trop peu saillante, par exemple), ou d'une non-intégration de l'information dans le module tactique. Ces différences peuvent être le résultat d'un processus sélectif efficace (comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, un bon conducteur ne doit pas intégrer toutes les informations, mais privilégier celles qui font sens pour son activité), mais elles peuvent aussi être la conséquence d'erreurs (effet de la distraction, par exemple, ou application d'un schéma de conduite inadéquat) que notre modèle informatique peut permettre de simuler et de visualiser, non seulement du point de vue de l'activité comportementale observable, mais aussi du point de vue de l'activité mentale, inobservable lorsqu'on s'intéresse aux conducteurs humains.

4.7 Bilan : choix et contraintes d'implémentation

Pour clore ce chapitre sur le développement informatique, nous souhaitons aborder rapidement quelques problèmes techniques que nous avons rencontrés. En effet, le développement computationnel et l'implémentation informatique d'un modèle de simulation cognitive sur un ordinateur imposent nécessairement des choix d'implémentation qui permettent de simuler certaines spécificités propres à l'être humain. Par exemple, le calcul parallèle est facilement réalisable par notre cerveau, mais techniquement impossible avec une seule machine.

Ces choix de développement ont été dirigés parfois par la théorie, parfois par les besoins techniques. Nous allons donc exposer les principales causes justifiant nos choix pour réaliser le modèle de simulation cognitif sur une plateforme numérique de simulation.

4.7.1 Les limites du temps de calcul

La première et principale source de choix d'implémentation est la limite de calcul possible par une machine. En effet, bien que les ordinateurs atteignent aujourd'hui des capacités de calcul très importantes, nous nous sommes heurtés à la limite de capacité de notre machine de simulation. Cette première limite a été atteinte rapidement : nous avons pu créer nos premières briques

de simulation permettant de faire évoluer un modèle aveugle dans un environnement simulé, mais dès l'implémentation du premier module perception nous avons atteint les limites de calcul permettant de conserver le temps réel.

Les limites de calcul qui empêchent l'ordinateur de conserver le temps réel peuvent provenir de deux unités de traitement différentes. La première est le GPU²¹, qui permet le calcul de l'affichage à l'écran des sorties vidéos de la carte graphique. Ce processeur graphique prend en compte les informations provenant du logiciel SiVIC afin d'afficher la sortie-écran correspondant à la simulation. Ce processeur est en charge de calculer les différents objets à afficher, ainsi que les ombres, les occlusions, etc. Cette unité de calcul est donc sensible à l'augmentation du nombre d'objets dans la scène, à la qualité graphique des objets intégrés, mais aussi à certains calculs que nous pouvons demander au moteur graphique du simulateur, comme l'envoi de lasers pour simuler la perception fovéale (cf. section 4.4.5.3) ou le calcul d'une carte de profondeurs (cf. section 4.4.4.2). La seconde unité de traitement concernée par les limites de calcul est le CPU²², le processeur central de l'ordinateur. Cette unité est impliquée dans tous les calculs qui n'impliquent pas une dimension graphique. Par exemple, c'est elle qui est chargée d'exécuter un programme ou de calculer les instructions nécessaires à l'écriture sur disque dur. Nous avons atteint les limites du CPU dans des cas précis et temporellement courts, car nous ne demandons que rarement de lourds calculs au processeur central. Par exemple, lors du calcul des itinéraires (cf. section 4.2) de plusieurs véhicules en même temps, nous atteignons 90% de charge processeur pendant un court instant. Mais cela ne perturbe en rien le temps réel, car ces calculs sont faits simultanément avant le début de la simulation. La gestion d'un calcul d'itinéraire à la volée, pour un conducteur isolé de la simulation, est effectuée grâce à un algorithme optimisé qui ne surcharge pas, à lui seul, le CPU.

Pour gérer les ralentissements graphiques, la plateforme SiVIC peut ralentir la fréquence de simulation, ce qui entraîne la perte du temps réel, mais permet d'afficher une simulation fidèle à la réalité. Ainsi, il est possible de faire fonctionner des algorithmes gourmands en calculs, tout en conservant la pertinence de la simulation, car toute la simulation est ralentie pour attendre les calculs nécessaires à l'algorithme. Nous aurions pu utiliser cette technique dans nos développements, mais nous avons préféré nous imposer la contrainte du maintien du temps réel. Nous estimons que si cette contrainte est perdue en début de processus de développement du modèle, il sera difficile de continuer le développement et encore plus de récupérer cette caractéristique par la suite.

4.7.2 Les spécificités logicielles

Les ralentissements dus au temps de calcul peuvent aussi provenir de l'utilisation de logiciels non spécialisés pour certains calculs. Par exemple, la plateforme SiVIC est faite pour simuler un environnement, pas pour calculer un produit matriciel. En effet, l'utilisation dans certains cas de logiciels spécifiques pour certains calculs peut permettre l'amélioration des performances. Nous avons par exemple préféré transférer par protocole UDP les données à enregistrer provenant de SiVIC afin de confier la tâche d'enregistrement au système de gestion de base de données SQL server.

²¹Graphics Processing Unit

²²Central Processing Unit

Mais l'intérêt principal d'utiliser des logiciels spécialisés ou des logiciels permettant certaines exclusivités est d'offrir à notre modèle des capacités de simulation puissantes permettant de modéliser efficacement des processus mis en œuvre par le conducteur humain. Par exemple, le logiciel Matlab est spécialisé dans la manipulation de matrices, et offre l'exclusivité de l'environnement de simulation Simulink²³ ainsi que son extension Stateflow²⁴. Ces logiciels sont très intéressants pour simuler le processus de décision interne au module tactique de notre modèle (cf. section 4.3.3). Nous pouvons aussi penser au logiciel Man3D, développé au LBMC²⁵, permettant de simuler le corps humain et ses mouvements, et ainsi l'intégration d'un modèle de simulation numérique du corps humain au sein du modèle COSMODRIVE dans SiVIC.

La création d'un logiciel unique permettant la simulation cognitive du conducteur comporte de nombreuses limites, nous avons donc décidé de créer une plateforme de simulation cognitive offrant la possibilité de créer des liens avec d'autres logiciels grâce à des protocoles ouverts autorisant la communication entre logiciels et/ou entre machines. Cela permettra ultérieurement de ne pas se limiter aux développements sur la plateforme SiVIC, bien qu'elle reste centre de la simulation cognitive, en tant que plateforme de simulation de l'environnement routier. Ainsi, nous offrons la possibilité d'utiliser les spécificités de certains logiciels (car certains, propriétaires, ne permettront pas l'utilisation des protocoles que nous avons mis en place) pour continuer et améliorer la modélisation et la simulation cognitive du conducteur automobile.

4.7.3 La multiplication des machines

Nous venons de voir que l'ordinateur apporte des limites de calcul et que certains logiciels peuvent être des outils très appropriés. Nous avons donc répondu à ces besoins en nous basant très rapidement sur une modélisation utilisant plusieurs machines différentes. Nous ne pouvons parler d'architecture distribuée, car l'instance SiVIC simulant le monde réel est nécessaire et contient de nombreuses ressources nécessaires aux autres machines. En revanche, notre architecture peut intégrer de nombreuses machines en réseaux, permettant à la fois d'augmenter les capacités de calcul et le nombre de logiciels. En effet, l'utilisation de plusieurs logiciels sur une même machine est possible, mais la gestion du parallélisme des threads²⁶ au sein de Windows est obscure et peut faire apparaître des erreurs. Par exemple, en multipliant les threads pour faire coexister la simulation de l'environnement et la représentation mentale perceptive du conducteur (afin de limiter les ordinateurs nécessaires), nous avons découvert un problème. L'envoi de lasers pour une requête perceptive était parfois réalisé lors d'une seconde requête, mais la seconde requête n'obtenait pas les réponses attendues, car le thread des lasers était effectué après le traitement de la seconde requête.

De plus, l'utilisation de protocoles ouverts pour la communication entre les différentes machines permet de les faire évoluer au rythme du développement du modèle. En effet, il n'est pas nécessaire de mettre à jour une version sur un ordinateur, si cette mise à jour ne traite pas du module concerné par la machine, car la normalisation des messages permet de faire communiquer ensemble plusieurs logiciels et plusieurs versions de logiciel. Par exemple, lors de notre mise à jour du logiciel SiVIC, nous avons simulé l'environnement de conduite avec la dernière version

²³Site internet de Simulink

²⁴Site internet de Stateflow

²⁵Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs

²⁶Fil d'exécution au sein d'un processus, permettant l'exécution d'un ensemble d'instruction

pendant que la représentation mentale perceptive était simulée par la version antérieure. Cela nous a permis de chercher les différents bogues générés par le changement de version, avant de passer l'instance de représentation sur la nouvelle version.

4.7.4 Les changements de versions

Nous avons dû faire face à la mise à jour de la plateforme **SiVIC** durant ce travail de thèse. Ces mises à jours régulières permettent d'améliorer à la fois le rendu graphique de la simulation, mais aussi la modélisation des capteurs et l'ajout de nouveaux modèles (nouvelles caméras, nouveaux capteurs RADAR, etc.). Mais ces mises à jour doivent être intégrées à notre travail, afin de conserver un lien fort entre le développement du modèle du conducteur et le développement de la plateforme de simulation l'accueillant. Plusieurs mises à jour du logiciel **SiVIC** ont été faites et nous avons choisi de porter notre modèle sur la version 2010 du logiciel **SiVIC**, version qui apporte beaucoup d'améliorations par rapport à la version 2008 utilisée précédemment.

Pour notre modèle, le passage de la version 2008 à 2010 de **SiVIC** a été fait durant la dernière année pour assurer la pérennité de notre travail au sein de la plateforme **SiVIC**. Cette mise à jour nous a demandé (i) d'intégrer notre interface de contrôle à la nouvelle version de **SiVIC**, (ii) d'intégrer les fonctions de communication que nous utilisons au sein de la nouvelle version, (iii) de reprendre certaines de nos méthodes de classes utilisant des fonctions obsolètes, (iv) d'adapter certains scripts de simulation pour prendre en compte les nouvelles commandes de la plateforme, (v) de tester et déboguer le modèle sans nouvelles fonctionnalités. Nous avons, par la même occasion, porté notre logiciel de Windows XP à Windows 7, permettant ainsi l'utilisation future du modèle sur un système d'exploitation viable (la prise en charge de Windows XP par Microsoft s'arrêtera en 2014²⁷).

L'informatique pour accueillir un modèle de simulation cognitive du conducteur automobile est donc une solution qui permet de simuler, à l'aide d'un outil de calcul et de rendu graphique, le fonctionnement d'un modèle théorique visant à expliquer le fonctionnement cognitif du conducteur humain. Mais cette utilisation reste soumise aux différents avantages et inconvénients de l'outil informatique : il ne peut fournir que le résultat des outils que nous lui mettons à disposition pendant le travail de développement.

²⁷Source : microsoft.com

4.7. Bilan : choix et contraintes d'implémentation

Utilisation de la simulation numérique comme méthode d’investigation scientifique de la cognition

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté le modèle de simulation numérique du conducteur que nous avons développé. Nous allons à présent l’utiliser comme un outil d’investigation scientifique de la cognition du conducteur, ce qui constitue l’enjeu épistémologique initial de cette thèse, tel que défini dans le chapitre 1. Pour cela, nous avons réalisé des expérimentations auprès de conducteurs humains, avec l’objectif de comparer des prédictions issues du modèle et des observations collectées auprès des participants.

La première expérimentation portera sur le processus d’exploration cognitivo-perceptive de l’environnement. Nous y analyserons les stratégies visuelles déployées par les conducteurs en comparaison avec celles prédites par les schémas de conduite du modèle. Les données recueillies nous permettront également de calibrer notre modèle au niveau de ses stratégies d’exploration visuelle.

La seconde expérimentation portera sur le processus d’intégration perceptivo-cognitive de l’information. Nous nous intéresserons plus particulièrement à la mise à jour des représentations mentales et aux erreurs susceptibles de se produire à ce niveau, en cas de distraction visuelle.

La troisième expérimentation s’intéressera à la prise de décision en situation de tourne-à-gauche. L’objectif sera de comparer des performances prédites par la simulation et des performances de conducteurs humains confrontés aux mêmes situations de conduite. L’analyse de ces résultats nous permettra de tester la validité de notre modèle informatique du conducteur et de démontrer l’apport de la simulation numérique pour appréhender la cognition humaine.

Pour pouvoir réaliser des comparaisons entre les performances du modèle et les performances humaines, il est nécessaire de confronter les conducteurs et le modèle aux mêmes scénarii de conduite, dans des environnements les plus proches possible. Cela est souvent difficile à réaliser, car les modèles interagissent en général avec leurs propres « micro-mondes » qui sont souvent très différents des environnements réels ou simulés auxquels sont confrontés les participants humains. Pour dépasser cette limite, nous avons donc décidé de développer notre propre simulateur de conduite basé sur la plateforme SiVIC¹. Au prix de cet effort, il devient alors possible de confronter le modèle et les participants humains aux mêmes environnements et scénarii routiers, et cela de manière rigoureusement contrôlée.

Avant de présenter nos expérimentations, nous allons donc décrire le simulateur de conduite que nous avons conçu et développé durant cette thèse.

¹Simulateur Vehicule-Infrastructure-Capteur

5.1 Conception et développement d'un simulateur de conduite

5.1.1 Création du simulateur SiVIC

Toutes les expérimentations relatives à ce travail de thèse se déroulent sur un simulateur de conduite utilisant le logiciel **SiVIC** pour simuler le monde et le véhicule du sujet. Pour l'interaction entre le sujet et l'environnement routier, un poste de conduite a été construit avec volant-pédalier Logitech G25, un siège de Peugeot 106 sur une structure bois acier qui permet de placer trois écrans vingt-quatre pouces à hauteur du visage du sujet. Ces trois écrans sont positionnés pour offrir un champ de vision de 140 degrés au maximum (figure 50).

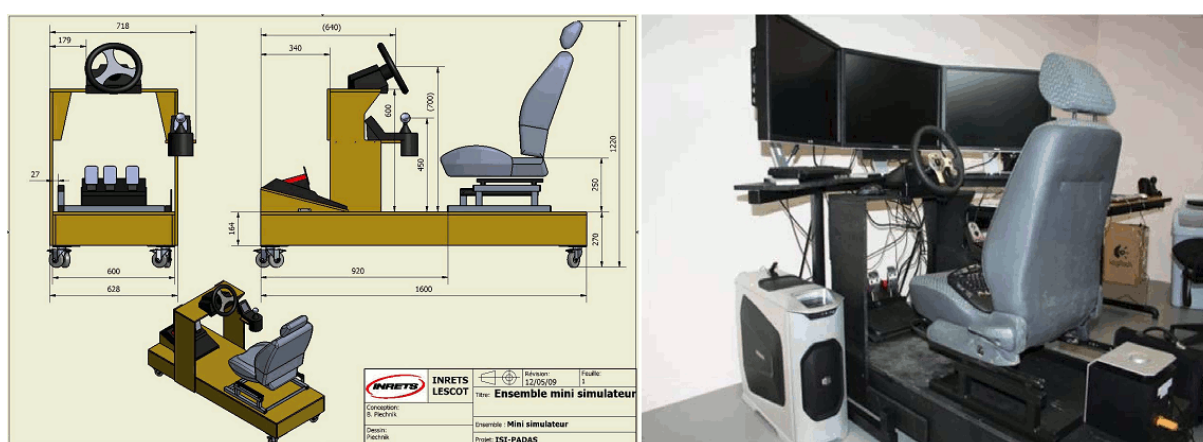


FIGURE 50 – Description de la cabine de conduite du simulateur

La fabrication au laboratoire de ce simulateur permet de lui apporter quelques modifications en fonction des expérimentations prévues. Par exemple, pour la seconde expérimentation sur ce simulateur, l'ajout d'un oculomètre Tobii X1-Light a été nécessaire (figures 51). Cette technologie repose sur un capteur en forme de barre qui se place sous l'écran où le regard du sujet va se poser. En revanche, il est nécessaire qu'aucun objet ne vienne s'intercaler entre le sujet et la barre d'oculométrie, cela pour permettre aux émetteurs infrarouges d'éclairer au mieux les yeux du sujet et aux caméras présentes dans la barre de bien les filmer. Il a donc fallu abaisser de quelques centimètres le volant et ajouter une tablette pour accueillir la technologie de suivi du regard.

De plus, un système **quadra-vision** a été ajouté pour agréger et synchroniser les vidéos (exemple au code QR 10) provenant de l'oculomètre, d'une caméra pointée sur le visage du sujet, d'une caméra braquée sur les pédales et la copie de l'écran de contrôle permettant la sauvegarde sur la vidéo du time code machine de la simulation. L'agrégation de ces vidéos est enregistrée à la fois sur un enregistreur numérique et sur un enregistreur analogique pour éviter tout problème de sauvegarde. Pour la seconde expérimentation, le simulateur était donc dans la configuration présentée en figure 52

5.1. Conception et développement d'un simulateur de conduite



FIGURE 51 – L'oculomètre Tobii



CodeQR 10: <http://www.youtube.com/watch?v=II4wNGaMFaA>

L'oculomètre Tobii X1-Light permet à la base de suivre le regard sur un seul écran mais, pour les besoins de l'expérience, nous avons dû modifier son fonctionnement pour nous permettre de suivre le regard sur les deux écrans de simulation de gauche (pour l'étude du tourne-à-gauche). Nous avons donc configuré l'oculomètre pour qu'il suive le regard sur un seul écran de 107 cm de long, comprenant les deux écrans vingt-quatre pouces de gauche. Nous avons placé la barre Tobii au centre des deux, lui faisant croire à un seul écran plat, alors que nous avons deux écrans formant un angle obtus de 148 degrés (voir figure 53). Cela est rendu possible par le fait que l'erreur commise par l'oculomètre dans cette configuration est de quelques dixièmes de degrés d'angle, négligeable face aux autres aléas comme le port de lunette, l'angle entre les émetteurs infrarouges et l'œil du sujet, ou le décalage vers le bas non corrigible de la position du regard. Cette dernière erreur est connue de Tobii, mais la compensation est interdite, car elle pourrait être utilisée pour modifier les résultats de visualisation de facing, un des secteurs commerciaux de Tobii.



FIGURE 53 – L'oculomètre devant les écrans

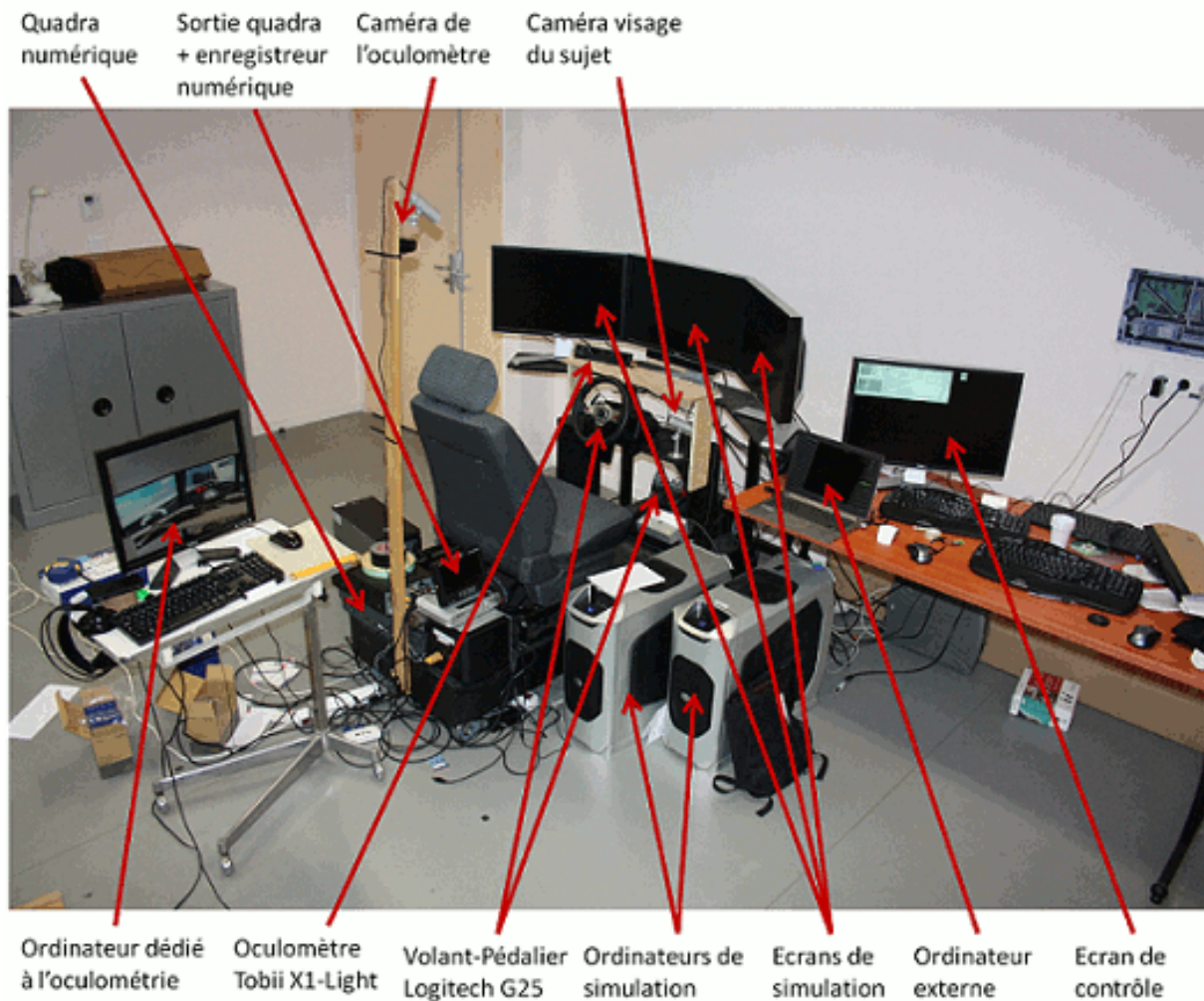


FIGURE 52 – Description de la configuration du simulateur

Enfin, le code QR 11 est une présentation vidéo du simulateur que nous venons de décrire.



CodeQR 11: <http://www.youtube.com/watch?v=TfTvZr7DkaI>

5.1.2 Modifications du logiciel

Il a fallu modifier le logiciel SiVIC pour l'utiliser dans un simulateur de conduite. En effet, le logiciel n'est pas prévu pour être un logiciel de simulation de conduite, car c'est avant tout un logiciel de simulation d'environnement, de capteurs et de véhicules. Par exemple, il n'est pas prévu pour fonctionner en plein écran, mais plutôt en mode fenêtré avec en interface des colonnes affichant les propriétés des objets sélectionnés dans le monde, en plus des différentes interfaces d'affichage de résultats de capteurs et/ou d'algorithmes. Il a donc été nécessaire de créer une

5.1. Conception et développement d'un simulateur de conduite

structure permettant d'accueillir une nouvelle interface pour le logiciel.

Pour cela nous avons opté pour le `framework .NET` de Microsoft. L'intérêt de ce framework est de pouvoir développer à la fois des interfaces et des bibliothèques dynamiques (Dll²) intégrables dans le logiciel `SiVIC`, cela afin de modifier et d'intégrer de nouvelles options. Nous avons donc créé un conteneur affiché en plein écran intégrant la fenêtre graphique de `SiVIC`, autorisant l'affichage plein écran de la fenêtre de simulation. Après cela, nous avons récupéré l'entrée et la sortie standard du logiciel pour les définir comme entrée/sortie standard de notre application. Enfin, nous avons développé une interface dissimulable permettant l'affichage de scripts pour le développement de scénarii, l'affichage d'onglets relatifs à différents modules (intégrés dans `SiVIC` par des Dll), etc.

Ces modifications ont permis d'obtenir un logiciel plein écran avec une interface prévue pour la simulation de conduite et le développement de scénarii. Par exemple, les scripts qui définissent la description du monde et donc la création de scénarii sont tous enregistrés dans une base de données affichée et structurée directement sur la fenêtre `SiVIC`. Ainsi, il est possible de faire des modifications à la volée des instructions `SiVIC` et donc d'observer les modifications en temps réel pendant le développement du scénario. Mais intégrer `SiVIC` dans un conteneur développé en partie grâce à `.NET` nous permet en plus de communiquer avec Microsoft `SQL server`, et donc de créer notre système d'enregistrement de données. C'est un élément crucial pour le simulateur de conduite, car observer le sujet et son comportement est l'un des points les plus importants (cf. section 1.4.1, p. 16).

Enfin, pour pouvoir afficher `SiVIC` sur les trois écrans du simulateur, il a été nécessaire de tester les capacités d'un ordinateur puissant pour soutenir cette épreuve. Hélas, quelle que soit la machine utilisée, aucune ne permet d'afficher correctement le logiciel `SiVIC` sur trois écrans (zone d'affichage de 5760×1200 points, avec trois caméras de visualisation (centrale, miroir intérieur, miroir extérieur gauche)). Il a donc été nécessaire d'utiliser deux ordinateurs de simulation : l'un gère l'écran central et l'écran de contrôle, l'autre gère l'affichage des deux écrans latéraux. Nous avons donc utilisé le protocole UDP³ de communication entre les deux ordinateurs pour que les images soient synchrones. En effet, même si les environnements chargés sont les mêmes (car provenant des mêmes scripts de la base de données commune grâce à notre interface de scripts) il est nécessaire de synchroniser les objets dynamiques du monde (les véhicules, les piétons). Le protocole de communication, à une fréquence de 60 Hz, permet l'envoi depuis l'ordinateur central de trames contenant les informations de position et de rotation des véhicules en direction de l'ordinateur latéral qui positionne les véhicules au même endroit que l'ordinateur central, dans le même environnement statique.

5.1.3 Collecte et stockage des données sur le simulateur `SiVIC`

Les données recueillies sont une partie essentielle de l'expérimentation, car ce sont elles qui vont permettre l'étude du comportement. Il est donc important de décrire les données extraites du simulateur et le travail fait sur ces données.

²Dynamic Link Library

³User Datagram Protocol

5.1.3.1 Type de données brutes

Les données sont collectées dans une base de données connectée au simulateur, ce qui permet d'enregistrer les valeurs désirées directement, sans passer par des capteurs comme dans un véhicule instrumenté. Plusieurs solutions sont possibles, mais nous allons décrire notre système d'enregistrement de données. Nous avons travaillé avec **SQL server** connecté à notre logiciel **SiVIC** modifié.

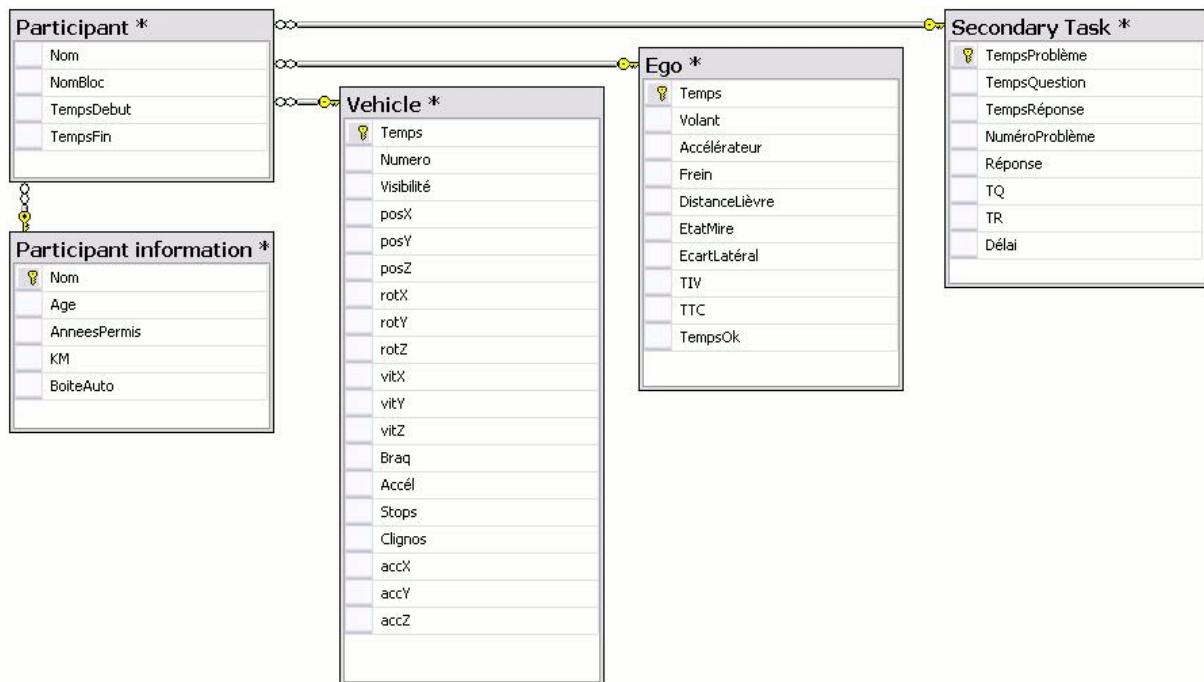


FIGURE 54 – Schéma relationnel de la base de données d'enregistrement des paramètres du simulateur

Ces données brutes sont enregistrées à une fréquence de 60 Hz, qui peut être augmentée ou diminuée (mais ceci n'est pas nécessaire pour nos expérimentations). Nous remarquons dans la figure 54 que la table « Participant » contient les données sur le sujet (avec la table « participant information »), la table « Vehicule » permet de contenir les données relatives à tous les véhicules présents dans la simulation (et que l'expérimentateur décide d'enregistrer), la table « Ego » contient les données relatives aux actions du sujet (comme la rotation du volant, la valeur de l'accélérateur, la couleur de la mire de suivi, etc.) et quelques données précalculées comme le TIV⁴ ou le TTC⁵ et la table « Secondary Task » contient les informations sur la double tâche (le temps exact de la question, le temps de la réponse, etc.)

Une partie de ces données brutes sont calculées en post traitement, c'est-à-dire qu'une fonction lancée après le passage du sujet permet de remplir certaines cases laissées vides pendant l'expérimentation. Par exemple, la ligne « EcartLatéral » dans la table « Ego » est calculée a posteriori, car il n'est pas aisé de calculer à 60 Hz la distance entre le centre de voie et le véhicule du sujet.

⁴Temps Inter-Véhiculaire

⁵Time To Collision : Temps à la collision

5.1. Conception et développement d'un simulateur de conduite

Comme nous pouvons le voir, à chaque nouveau participant, la base de données crée plusieurs champs dans la table « Participant » définissant ainsi les différentes phases de l'expérimentation en fonction du temps. Le temps dans la base de données est une référence, appelée **Time Code**. C'est grâce à cette clé primaire que nous allons pouvoir travailler les enregistrements. A la fin de l'expérimentation, nous possédons la liste de tous les sujets, subdivisée en blocs permettant un tri à la fois en fonction des sujets, mais aussi en fonction de la tâche que nous étudions. Par exemple, si nous souhaitons extraire toutes les situations de conduite en zone urbaine, nous pouvons rapidement exécuter une requête SQL permettant de trier les enregistrements provenant de la table « vehicle », de la table « ego » et de la table « secondary task » correspondant au « nomBloc » relatif à un parcours en zone urbaine.

Un second type de données est collecté sous la forme d'enregistrements vidéographiques.

5.1.3.2 Travail sur les données

Les données stockées dans la base de données ou collectées dans un fichier vidéo ne permettent pas directement d'extraire des résultats. Pour cela, il est nécessaire de travailler ces données, de leur donner forme pour pouvoir ensuite réaliser des traitements statistiques qui permettront d'extraire des résultats utilisables pour la modélisation.

Tout d'abord, il faut synchroniser la(ou les) vidéo(s) enregistrée(s) pendant l'expérimentation. Pour cela, si un [quadration](#) permettant la synchronisation automatique des vidéos a été utilisé, il suffit de tronquer le début de la vidéo au premier Time Code présent à la fois sur la vidéo et dans la base de données. En revanche, si une telle technologie n'était pas utilisable pendant l'expérimentation (ce qui était le cas pour celle concernant le suivi et les doubles tâches), il est nécessaire de synchroniser les vidéos entre elles. Il faut alors trouver le début de la vidéo correspondant au début de l'enregistrement dans la base de données, et ensuite vérifier les potentielles dérives de vidéo (une seconde de vidéo ne correspond pas obligatoirement à une seconde de time code machine). En cas de dérive temporelle de la vidéo, il est peu probable de pouvoir récupérer la vidéo entièrement synchrone avec les données. Avec un traitement vidéo lourd, il est possible d'extrapoler des frames de la vidéo pour faire correspondre les données avec la vidéo, mais le travail est de taille et ne peut pas être appliqué à toutes les situations. Néanmoins, il est possible de réduire la taille des vidéos en se concentrant sur les moments pertinents de l'expérimentation et de travailler ensuite avec des vidéos plus courtes, donc moins sensibles aux dérives temporelles.

Par ailleurs, les données brutes ne contiennent pas toutes les informations nécessaires à l'observation de l'activité de conduite automobile : il faut extraire des valeurs ou calculer certaines variables a posteriori. Ces calculs sont définis (et effectués) par l'expérimentateur, car c'est lui qui est le plus à même de définir les caractéristiques de la situation qu'il désire analyser. Pour extraire des données et calculer des valeurs non présentes dans la base de données, il est nécessaire d'interroger la base de données avec des requêtes SQL permettant de sélectionner, de modifier, de créer de nouvelles tables, colonnes, etc.

Grâce à ce simulateur créé de toutes pièces, il nous est donc possible d'observer une partie de l'activité de conduite d'un conducteur humain dans le même environnement que notre modèle. C'est grâce à cela que nous pouvons désormais utiliser la méthode expérimentale pour étudier les points mis en avant tout au long de cet ouvrage. Nous allons débiter par l'étude de l'exploration cognitivo-perceptive.

Nous avons conduit trois expérimentations sur le simulateur que nous venons de décrire. La première concerne l'analyse des stratégies visuelles pour l'exploration cognitivo-perceptive de l'environnement, la seconde traite de la mise à jour de la représentation mentale par l'intégration perceptivo-cognitive d'informations perçues dans l'environnement (en s'intéressant aussi au problème de la distraction visuelle), et la troisième abordera les processus cognitifs d'anticipation et de prise de décision en situation de tourne-à-gauche.

5.2 Expérimentation 1 : Analyse de stratégies visuelles pour l'exploration perceptive

5.2.1 Enjeux et objectifs

L'objectif de cette première expérimentation sera d'analyser et de modéliser les stratégies visuelles mises en œuvre par des conducteurs humains en situation de conduite. Pour ce faire, nous aurons recours à un système oculométrique nous permettant de mesurer les mouvements oculaires de conducteurs engagés dans une tâche de conduite sur simulateur.

Dans les chapitres précédents, nous avons décrit et modélisé informatiquement la perception du conducteur sous la forme d'un cycle perceptif impliquant un processus top-down de recherche active de l'information, l'exploration perceptive, reposant sur des connaissances de conduite et permettant au conducteur de porter son attention visuelle sur les zones les plus significatives de l'environnement routier.

Ce travail de modélisation cognitive et d'implémentation informatique nous a permis ensuite de simuler numériquement (cf.4.6.3) les stratégies visuelles d'un conducteur en approche de carrefour à feux, dans l'objectif d'engager une manœuvre de Tourne-à-Gauche (TàG).

A cet égard, l'enjeu de cette expérimentation sera à présent de tester l'intérêt de la simulation numérique pour l'investigation de la cognition du conducteur. En effet, les hypothèses que nous formulerons par la suite reposeront directement sur ces premiers résultats de simulation. Pour simuler les stratégies visuelles grâce à notre modèle, nous étions partis des zones de déplacement et des zones d'exploration perceptive contenues dans les schémas de conduite tactique. Pour cela, nous avons créé des requêtes perceptives associées aux zones de déplacement du schéma, permettant ainsi au modèle d'observer progressivement l'environnement routier, au fur et à mesure qu'il progressait sur sa trajectoire. Au vu des schémas tactiques tels que nous les avons décrits (cf.2.5.4.2 p.48 et 3.2.2 p.61) et de notre simulation informatique de la perception du conducteur, nous pouvons d'ores et déjà postuler ici que :

- Tout conducteur arrivant à une intersection à feux, avec pour but de tourner à gauche, devra regarder au moins une fois la couleur du feu avant de l'avoir dépassé.
- Tout conducteur devra aussi, avant d'entamer sa manœuvre de TàG, vérifier la présence de trafic sur la voie opposée qu'il s'apprête à traverser. Il peut le faire plusieurs fois, mais il doit l'avoir fait avant d'arriver au point de décision d'engagement de la manœuvre.
- Tout conducteur devra enfin, avant d'entamer sa manœuvre de TàG, observer la zone de sortie de l'infrastructure, ceci afin de pouvoir planifier sa manœuvre de TàG et s'assurer de l'absence d'obstacles sur la chaussée (notamment sur le passage piéton). Au même titre

5.2. Expérimentation 1 : Analyse de stratégies visuelles pour l'exploration perceptive

que le trafic inverse, il doit prélever cette information au moins une fois avant d'engager effectivement le tourne-à-gauche.

Au-delà de la vérification de ces hypothèses générales, que nous opérationnaliserons plus tard à partir des scénarios routiers utilisés dans notre protocole expérimental, cette expérimentation doit aussi nous permettre de collecter des données oculométriques auprès de conducteurs humains afin de calibrer les stratégies visuelles de notre modèle. Cette calibration concernera notamment les durées de fixation moyennes des différentes zones d'exploration perceptive contenues dans le schéma tactique, mais il s'agira aussi de s'intéresser aux patterns d'exploration visuelle à travers deux dimensions : le moment où le conducteur débute son observation d'une zone particulière, et l'ordre de balayage des différentes zones d'exploration.

Les données oculométriques seront collectées au moyen du système Tobii. Pour cette expérimentation, nous avons défini une « fixation » comme un mouvement oculaire de moins de 0.3° , restant dans une même zone plus de 50 ms, un temps maximal entre deux fixations de 75 ms, avec une vitesse maximum de 40 degrés/seconde [Rayner, 1998] [Tobii, 2012]. Cela permet de limiter le nombre d'erreurs de mesure de la part de l'oculomètre. De plus, le système oculométrique Tobii définit une consultation comme un nombre indéfini de fixations restant dans une zone sans discontinuer. Par exemple : une fixation Zone 1, une fixation Zone 2, puis une fixation Zone 1, nous donnent deux consultations Zone 1 et une Zone 2 ; alors qu'une fixation Zone 1 suivie d'une autre fixation Zone 1 puis d'une fixation sur la Zone 2, nous donnent une consultation Zone 1 et une consultation Zone 2. Par ailleurs, l'utilisation du logiciel de post traitement Tobii des données de l'oculomètre nous permettra de compter et de caractériser les regards portés sur chaque zone. Ce logiciel permet aussi le recalcul de la position du regard et des fixations en utilisant des filtres de calcul pour définir plus précisément les fixations (durée de fixation minimum, écart minimal entre deux points pour définir une seule fixation, angle et vitesse angulaire maximum entre deux fixations, etc.). C'est aussi ce logiciel qui permet d'utiliser les données d'un seul œil pour le calcul de position du regard.

5.2.2 Protocole expérimental

La tâche expérimentale des participants consistait à piloter un véhicule sur le simulateur de conduite décrit dans la section précédente. Avant de s'engager dans l'expérimentation, les sujets devaient se familiariser avec le simulateur.

A - La phase d'habitation :

Pendant cette phase, chaque participant était invité à se déplacer à sa guise dans l'environnement urbain pour se familiariser avec la conduite du véhicule virtuel. Généralement, cette phase durait une dizaine de minutes, mais elle pouvait être prolongée si le sujet en exprimait le besoin. L'expérimentateur vérifiait aussi, durant cette phase préparatoire, que le participant avait bien testé certaines manœuvres, comme le freinage et l'accélération du véhicule, mais aussi le braquage du volant en situation de tourne-à-gauche.

B - La tâche de conduite :

L'expérimentation en elle-même consistait à faire conduire les participants dans une zone urbaine en suivant les panneaux « centre-ville » pour leur faire parcourir un itinéraire de quatre minutes, répété trois fois. La consigne donnée au sujet était de conduire le plus naturellement possible tout au long du parcours en suivant les panneaux de direction centre-ville. Sur cet



FIGURE 55 – Parcours en zone urbaine

itinéraire nous avons plus particulièrement étudié une intersection à feux où le sujet devait réaliser trois TàG. Cette intersection est représentée en bleu sur la figure 55.

Trois scénarii de TàG y étaient générés. Le premier scénario est un TàG à réaliser en l'absence de tout trafic opposé. Le second mettait le conducteur aux prises avec quelques véhicules de trafic, dont deux véhicules arrivant à contresens au niveau du carrefour. Enfin, le troisième se déroulait avec plus de trafic encore : cette fois-ci trois véhicules circulaient à contresens.

5.2.3 Population

Vingt-trois conducteurs volontaires, âgés de 21 à 30 ans (moyenne d'âge de 25,09 ; écart-type de 2,57), ont participé à cette expérimentation. Il s'agit de conducteurs expérimentés (conduisant en moyenne 10 174 km par an), et notre échantillon se compose de 12 femmes et 11 hommes, avec ou sans problèmes visuels, mais portant des lunettes si nécessaire (14 myopes corrigés, dont 2 astigmatés corrigés, et 1 strabisme divergent). Un seul sujet n'a pas pu être suivi par l'oculomètre : les verres de ses lunettes étaient amincis et asphériques (compensation du défaut géométrique en bordure de verre) et cela empêche l'oculomètre de bien percevoir le reflet cornéen de l'infrarouge émis. Aucune donnée oculométrique n'a pu être collectée sur ce sujet. Le strabisme divergent a été contourné en utilisant seulement les valeurs de suivi de l'autre œil (suivi du regard légèrement moins précis, mais tout à fait possible).

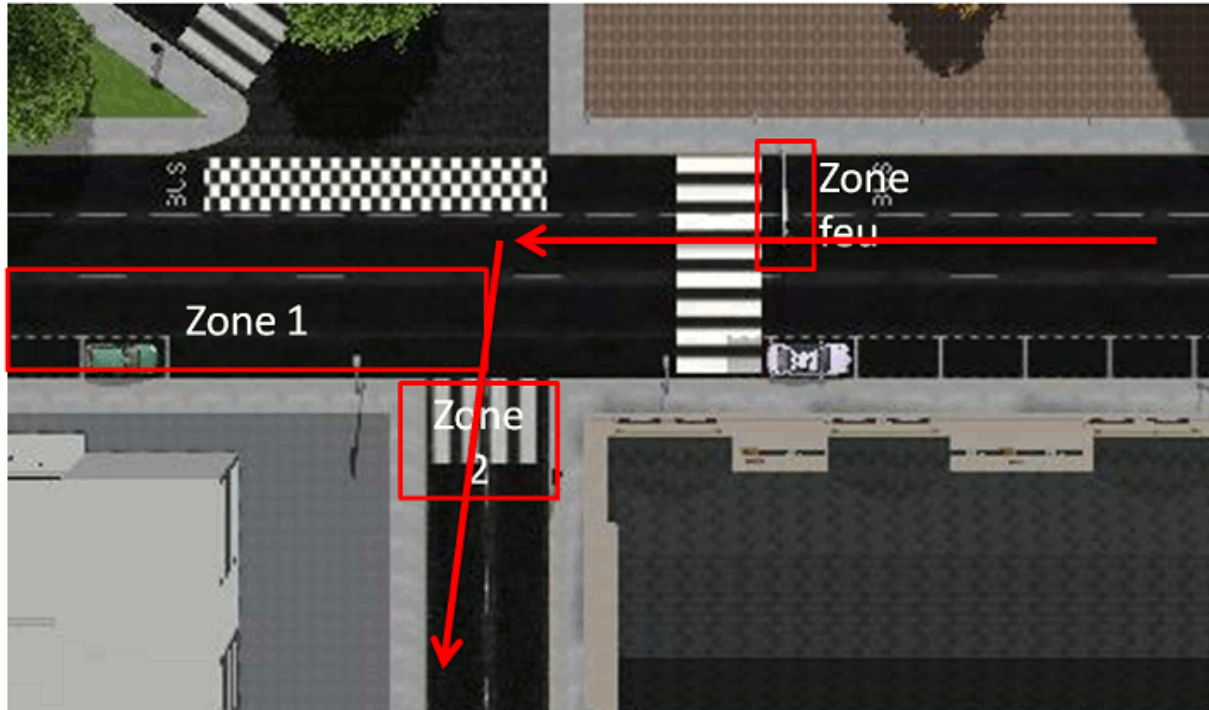


FIGURE 56 – Zones perceptives étudiées

5.2.4 Hypothèses et résultats attendus

Le but de cette expérimentation était d'étudier, grâce au système oculométrique, les stratégies visuelles des conducteurs dans une situation de tourne-à-gauche en carrefour à feu, en se basant sur les prédictions comportementales du schéma de conduite présenté en figure 15 et implanté dans notre modèle de simulation sous la forme de requêtes perceptives.

Les fixations oculaires ont donc été étudiées sur trois zones importantes dans ce type de carrefour à feu : la « Zone du feu » lui-même (dont le conducteur doit connaître la couleur pour savoir s'il peut ou non le franchir), la « Zone 1 » représentant la zone perceptuelle dans laquelle se situent les véhicules circulant à contresens (que le conducteur doit observer pour savoir s'il peut ou non engager son TàG), et la « Zone 2 » correspondant à la zone perceptuelle placée sur le passage piéton traversant les voies de sortie du tourne-à-gauche (figure 56).

Chacune de ces zones a été codée dans l'enregistrement du rendu visuel de l'environnement. Image par image, ces zones ont été positionnées au bon endroit pour permettre le calcul du nombre de fixations et leur durée à chaque instant de la situation de tourne-à-gauche. Par exemple, la zone du feu est codée sur l'écran depuis le premier instant où celui-ci est visible sur l'écran central du simulateur, jusqu'à sa disparition, car le véhicule l'a dépassé. La Zone 2 devient visible pour le conducteur une fois que le passage piéton sur sa voie a été atteint et que le véhicule blanc garé à sa gauche ne la cache plus.

Au vu des scénarii qui précèdent, et en complément des hypothèses générales que nous avons formulées en début de section, nous posons ici comme hypothèses opérationnelles que :

- Les conducteurs devraient consulter en priorité les feux tricolores durant la phase d'approche du carrefour, cela afin d'en identifier la couleur (tout en observant potentiellement

en alternance la « Zone 1 » pour détecter par anticipation la présence de véhicules circulant à contresens).

- Une fois la couleur « verte » du feu détectée et/ou le feu franchi, les conducteurs devraient focaliser en priorité leur regard sur la « Zone 1 », pour vérifier la possibilité d’engager leur TàG (tout en observant potentiellement en alternance la « Zone 2 » afin de visualiser la trajectoire du TàG et planifier cette manœuvre de conduite).
- Enfin, une fois l’action de TàG engagée, les conducteurs devraient essentiellement regarder la « Zone 2 » pour contrôler leur trajectoire et détecter les risques d’obstacles en sortie du carrefour.

5.2.5 Présentation des résultats

Le premier résultat que nous présenterons ici concerne le nombre de fixations. Grâce aux mesures d’oculométrie et à leur traitement, nous obtenons pour chaque sujet un nombre de fixations (tableau 3) dans chaque zone, pour toute la durée de l’expérimentation (trois passages au même tourne-à-gauche).

	Zone Feu	Zone 1	Zone 2	Zone Feu	Zone 1	Zone 2
Sujet_9582	9	15	19	0,26	0,39	0,22
Sujet_1140	12	25	20	0,46	0,35	0,34
Sujet_130	17	30	25	0,39	0,27	0,3
Sujet_1960	4	20	24	0,17	0,29	0,28
Sujet_2612	3	17	17	0,13	0,24	0,22
Sujet_2758	2	11	11	0,31	0,42	0,26
Sujet_29	7	15	19	0,32	0,37	0,31
Sujet_3034	12	22	15	0,31	0,35	0,42
Sujet_345	11	20	13	0,25	0,47	0,19
Sujet_3557	6	15	25	0,40	0,27	0,23
Sujet_3853	3	10	19	0,11	0,34	0,34
Sujet_4162	11	5	12	0,45	0,33	0,29
Sujet_5298	4	19	16	0,21	0,36	0,24
Sujet_5920	11	36	23	0,19	0,29	0,25
Sujert_6675	1	16	8	0,15	0,40	0,31
Sujet_6918	13	17	13	0,25	0,39	0,29
Sujet_8535	9	23	25	0,31	0,38	0,31
Sujet_8928	1	6	21	0,30	0,44	0,25
Sujet_9050	2	15	24	0,21	0,28	0,29
Sujet_9096	4	7	4	0,19	0,43	0,51
Sujet_9106	5	23	14	0,58	0,33	0,42
Sujet_9119	-	13	16	-	0,32	0,43
All Recordings	147	380	383	0,31	0,34	0,29

TABLEAU 3 – Nombre et temps moyen de fixations par zone pour chaque sujet

5.2. Expérimentation 1 : Analyse de stratégies visuelles pour l'exploration perceptive

Il apparaît très clairement après le visionnage de chaque situation de TàG que tous les conducteurs déploient un même schéma perceptif pour s'informer de la situation courante (exemple par code QR 12) :

1. Observation de la couleur des feux, en alternance avec des consultations de Zone 1 (en nombre variable avant l'arrivée au feu)
2. Observation de la Zone 1, en alternance avec des consultations de Zone 2 (idem, une fois le feu presque dépassé)
3. Observation de la Zone 2 (une fois l'action de TàG engagée)



CodeQR 12: <http://www.youtube.com/watch?v=Bp1Md6U5Me8>

Cela tend à confirmer nos hypothèses de départ, car toutes les situations de tourne-à-gauche ont été examinées en détail afin d'extraire la chronologie des fixations portées sur les trois zones, et tous les sujets ont dirigé leur attention visuelle en direction de ces mêmes zones (les feux, la voie opposée et le passage piéton en sortie de TàG. cf.figure 56) selon le même ordre (Feu, Zone 1 puis Zone 2)

Mais l'identification de patterns d'exploration visuelle récurrents chez les conducteurs en se basant sur les fixations n'est pas la seule analyse possible. Pour l'étude des fixations, nous pouvons aussi remarquer que, dans la plupart des cas, d'autres fixations sont portées sur d'autres zones de l'environnement (i.e. le rétroviseur extérieur gauche, la voie située sur la droite du carrefour, etc.) à des moments différents en fonction du conducteur, cela malgré une redondance des regards sur les zones citées en amont (Feu - Zone 1 / Zone 1 - Zone 2 / Zone 2).

Nous pouvons aussi étudier, grâce aux données collectées, le nombre de « consultations » dans les zones principalement fixées. Une consultation est définie comme un « agrégat de fixations » concernant une même zone. Par la suite nous pourrions étudier la temporalité de ces consultations pour extraire des schémas perceptifs plus précis.

Ces données nous permettent donc de connaître le nombre total et la durée moyenne des consultations dans chaque zone d'observation. Ces résultats sont présentés dans le tableau 4. La chronologie des consultations est la même que la chronologie des fixations. En revanche, il est plus simple de l'observer sur le logiciel Tobii Studio. Au final, nous pouvons conclure ici que tous les conducteurs consultent bien les zones perceptives que nous avons définies, et que ces consultations respectent un ordre précis, comme nous l'avions formulé dans nos hypothèses de départ. Ainsi, nous pouvons dire que tous les conducteurs consultent d'abord le feu avant de le dépasser, puis qu'ils consultent la Zone 1, et enfin la Zone 2 avant d'engager le TàG.

	Zone Feu	Zone 1	Zone 2	Temps Zone Feu	Temps Zone 1	Temps Zone 2
Sujet_9582	8	13	6	0,3	0,46	1,01
Sujet_1140	11	21	8	0,5	0,43	0,97
Sujet_130	13	25	8	0,52	0,34	1,04
Sujet_1960	4	14	11	0,17	0,44	0,68
Sujet_2612	3	15	10	0,13	0,29	0,47
Sujet_2758	2	9	6	0,31	0,54	0,58
Sujet_29	7	14	10	0,32	0,4	0,63
Sujet_3034	9	20	6	0,45	0,4	1,17
Sujet_345	8	14	6	0,37	0,72	0,53
Sujet_3557	5	11	7	0,49	0,42	0,93
Sujet_3853	2	9	5	0,24	0,42	1,55
Sujet_4162	6	5	6	0,86	0,33	0,64
Sujet_5298	4	17	9	0,21	0,43	0,47
Sujet_5920	10	28	12	0,21	0,4	0,52
Sujert_6675	1	9	4	0,15	0,74	0,68
Sujet_6918	11	16	4	0,3	0,41	1,06
Sujet_8535	8	19	8	0,35	0,47	1,13
Sujet_8928	1	6	6	0,3	0,44	0,98
Sujet_9050	2	10	8	0,21	0,47	0,98
Sujet_9096	4	6	3	0,19	0,51	0,69
Sujet_9106	4	16	5	0,73	0,51	1,28
Sujet_9119	-	10	4	-	0,43	1,88
All Recordings	123	307	152	0,38	0,44	0,85

TABLEAU 4 – Nombre de consultations et durée moyenne de consultation sur chaque zone

Nous remarquons que le nombre total de consultations n'est pas beaucoup plus petit que le nombre total de fixations. En revanche, nous pouvons remarquer que la durée moyenne des consultations est plus longue que celui des fixations, surtout pour la Zone 2. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'une fois l'action de tourner à gauche décidée et engagée, le conducteur regarde presque exclusivement la Zone 2, sans autre fixation. Cela engendre des consultations longues dans la Zone 2 et augmente donc la durée moyenne de consultation. Pour pouvoir utiliser ces résultats, nous avons effectué un test de modèle linéaire général (ANOVA) sur mesures répétées. Celui-ci est possible sur nos deux ensembles de données (durée de fixation par zones et durée de consultation par zones), car les deux tests de sphéricité (Mauchly)⁶ ne définissent pas une différence des variances entre paires significatives. Nous obtenons par l'ANOVA les résultats suivants :

- Pour la comparaison des fixations : $F(2, 19) = 3,976; p < 0,05$

⁶La sphéricité est une hypothèse de l'analyse de variance à mesures répétées. La violation de sphéricité se produit lorsque les variances des différences entre toutes les combinaisons des groupes ne sont pas égales. Le test de sphéricité de Mauchly est un test qui permet d'évaluer si l'hypothèse de sphéricité a été violée

5.2. Expérimentation 1 : Analyse de stratégies visuelles pour l'exploration perceptive

- Pour la comparaison des consultations : $F(2, 19) = 27,907; p < 0,01$

Les tableaux 5 et 6 nous présentent respectivement les comparaisons par paires des moyennes de durée de fixation et les moyennes de durée de consultation.

(I) Fixation		Différence des moyennes (I-J)	Erreur standard	Sig	Intervalle de confiance de la différence à 95%	
					Borne inf	Limite sup
1	2	-0,069	0,03	0,104	-0,148	0,01
	3	-0,015	0,028	1	-0,089	0,058
2	1	0,069	0,03	0,104	-0,01	0,148
	3	0,053	0,02	0,051	0	0,107
3	1	0,015	0,028	1	-0,058	0,089
	2	-0,053	0,02	0,051	-0,107	0

Basée sur les moyennes marginales estimées

Ajustement des comparaisons multiples : Bonferroni

TABLEAU 5 – Comparaison par paires des moyennes de durée de fixation

(I) Fixation		Différence des moyennes (I-J)	Erreur standard	Sig	Intervalle de confiance de la différence à 95%	
					Borne inf	Limite sup
1	2	-0,108	0,052	0,15	-0,242	0,027
	3	-,509*	0,066	0	-0,682	-0,335
2	1	0,108	0,052	0,15	-0,027	0,242
	3	-,401*	0,072	0	-0,589	-0,213
3	1	,509*	0,066	0	0,335	0,682
	2	,401*	0,072	0	0,213	0,589

Basée sur les moyennes marginales estimées

*La différence des moyennes est significative au niveau 0,05

Ajustement des comparaisons multiples : Bonferroni

TABLEAU 6 – Comparaison par paires des moyennes de durée de consultation

Nous remarquons que la différence entre les moyennes de durée de fixation est significative, mais nous ne pouvons pas savoir où se situent ces différences, les comparaisons par paires ne les mettant pas en évidence. En revanche, les comparaisons par paires des moyennes de durée de consultation par zone sont beaucoup plus précises. Elles permettent de dire que la différence de durée moyenne de consultation entre la Zone feu et la Zone 2 et entre la Zone 1 et la Zone 2 sont significatives.

Ainsi, nous pouvons utiliser les valeurs moyennes des durées de consultation sur chaque zone afin de calibrer notre modèle dans notre plage de durée déterminée pour les fixations. Grâce aux

résultats, nous pouvons désormais configurer notre module de perception pour que, dans une situation similaire, l'attention visuelle portée sur le feu soit d'une durée de 380 ms et de 440 ms pour la consultation de la Zone 1.

Cette analyse porte sur tous les passages au même tourne-à-gauche dans trois cas de trafic différents, car l'analyse séparée de chaque situation n'offre pas suffisamment de données pour une comparaison statistique. De plus, les stratégies visuelles extraites des situations de TàG ne diffèrent pas significativement entre les situations : quel que soit le trafic venant de la voie d'en face, les conducteurs regardent principalement le feu, la Zone 1 et la Zone 2.

Enfin, la précision de l'oculomètre n'est pas suffisante pour permettre la vérification systématique des fixations portées sur une zone : un décalage de quelques degrés vers le bas et la zone du feu n'est plus fixée. Pour pallier ce problème, nous avons créé des zones légèrement plus larges que les objets définissant les zones pour accueillir les fixations souffrant d'un léger décalage, mais cela ne garantit pas d'obtenir tous les regards portés sur la zone, nous le voyons pour le Sujet_9119 : selon l'oculomètre, il n'a pas regardé le feu avant d'entamer son tourne-à-gauche, hypothèse peu probable au vu des données collectées auprès des autres sujets. Ce résultat est par conséquent probablement dû à une erreur de mesure.

5.2.6 Discussion

Les résultats obtenus par cette expérimentation nous permettent en premier lieu de valider le fait que la plupart des conducteurs humains déploient un pattern visuel comparable et conforme à l'utilisation du schéma de TàG présenté en figure 15, lors de leur activité de tourne-à-gauche. En effet, tous nos sujets ont observé les zones perceptives que nous avons déterminées en amont. Ceci valide bien le fait que l'humain utilise ses connaissances afin de répondre aux besoins en informations créés par une activité, connaissances structurées en schémas. Les schémas tactiques intègrent les schémas perceptifs qui dirigent l'attention visuelle afin d'obtenir les informations visuelles nécessaires à la tâche en cours. Les résultats obtenus par nos analyses étayent cette théorie en nous montrant que les conducteurs effectuent bien l'exploration cognitivo-perceptive simulée par notre modèle. Notre modèle utilise donc un concept proche de celui de l'humain et il nous permet d'affirmer que cette partie de la perception est dirigée par des connaissances que nous avons modélisées en tant que schémas perceptifs intégrés au sein des schémas tactiques.

Au-delà de cette confirmation dans notre approche du processus top-down, cette expérimentation nous a également permis d'obtenir des informations permettant de calibrer notre modèle et ainsi de modéliser plus fidèlement les stratégies visuelles des conducteurs. Tout d'abord, nous avons obtenu grâce à l'oculométrie des durées de consultation moyennes. Par exemple, le feu est observé en moyenne pendant 380 ms à chaque consultation, ce qui nous permet de calibrer en conséquence la durée de consultation moyenne de notre modèle sur le feu tricolore lors d'une tâche de franchissement d'intersection. Ces informations sur la durée de consultation sont très utiles pour améliorer le réalisme et la validité de notre modèle. Il sera nécessaire de multiplier les expérimentations avec un système oculométrique afin d'étoffer la base de données contenant les temps moyens de fixation d'un objet dans une scène pour un but donné, mais cela ouvre des perspectives méthodologiques innovantes dans l'étude du conducteur et de ses stratégies d'exploration visuelle de l'environnement routier. Ainsi, avec quelques traitements de données supplémentaires, nous pourrions, grâce aux données oculométriques synchronisées avec nos données véhicules, déterminer des zones de déclenchement des observations. En effet, il est nécessaire

pour un conducteur d'observer le feu pour déterminer s'il peut s'engager dans le carrefour. Nous pouvons donc déterminer une distance moyenne au feu à laquelle les conducteurs débutent cette observation. Cela pourra permettre d'enrichir nos schémas tactiques en y incluant des « points de démarrage d'observation de zones ». Ces points pourront être intégrés aux schémas tactiques afin de démarrer une stratégie d'exploration cognitive, car certaines zones de déplacement exigent la consultation préalable d'une zone perceptive avant de passer à la zone suivante. Il est donc potentiellement intéressant de définir un point de repère dans cette première zone pour activer le démarrage de l'observation des zones perceptives associées au schéma tactique en cours. Enfin, le pattern de balayage visuel des zones est une donnée extractible des données oculométriques, mais au vu des différences inter et intra sujets, les seules données utiles restent celles que nous avons pu prédire grâce aux schémas perceptifs.

5.3 Expérimentation 2 : Intégration cognitive, mise à jour des représentations et modélisation des effets de la distraction visuelle

5.3.1 Enjeux et objectifs

Dans notre modèle de simulation du conducteur automobile, l'élaboration et la mise à jour des représentations mentales repose sur un principe d'intégration perceptivo-cognitive de l'information, chaîne de traitement des données perceptives allant de l'œil virtuel jusqu'aux représentations cognitives élaborées dans le module tactique. Cette expérimentation vise à investiguer les processus perceptivo-cognitifs qui permettent au conducteur de se représenter mentalement la situation de conduite dans laquelle il évolue. Comme pour l'expérimentation précédente, notre réflexion partira ici des exemples de simulation numérique présentés dans le chapitre précédent (section 4.6.2) pour formuler des hypothèses que nous chercherons ensuite à vérifier en collectant des données auprès de conducteurs humains. Mais l'objectif de cette expérimentation sera aussi de s'intéresser aux effets de la « non intégration » perceptivo-cognitive d'une information sur le contenu et/ou la mise à jour des représentations mentales du conducteur et, au-delà, sur sa performance de conduite dans son ensemble.

La méthode classiquement utilisée pour étudier le processus d'intégration de l'information visuelle en conduite automobile est « l'occlusion », qui consiste à faire apparaître un écran noir ou un masque sur la scène visuelle pendant une durée plus ou moins longue. Mais cette méthode débouche sur une tâche de conduite rendue très artificielle. Afin de mieux respecter les caractéristiques de la conduite naturelle, nous avons préféré utiliser ici le paradigme de la double tâche imposant au conducteur une tâche secondaire de distraction visuelle pouvant altérer sa perception des événements routiers et la mise à jour de sa représentation mentale tactique.

La mise en place d'une double tâche sollicitant l'attention visuelle du conducteur nous permettra aussi d'étudier comment les humains gèrent cette tâche secondaire en parallèle de la conduite et partagent ainsi leurs ressources visuelles. Cela viendra compléter les données sur les stratégies visuelles que nous avons collectées durant l'expérimentation précédente.

5.3.2 Protocole expérimental

A - La tâche de conduite :

Le protocole expérimental que nous avons construit pour cette expérimentation repose sur une tâche de suivi de véhicule dans différentes conditions de conduite. Les participants doivent donc, tout au long de l'expérimentation, suivre un véhicule placé devant eux.

La tâche de suivi imposée au sujet par consigne expérimentale peut être de deux types : suivi « libre » ou suivi « contraint ». Le suivi libre laisse le participant décider de la distance de suivi à adopter pour réguler son activité et garantir sa sécurité. Le suivi contraint est beaucoup plus sollicitant pour le conducteur, car il lui est demandé de maintenir une distance de suivi de 0,6 seconde, correspondant à la fin de sa zone enveloppe rouge. Dans ces conditions extrêmes, le conducteur est sous la pression permanente d'un risque de collision. Pour permettre aux participants de respecter cette consigne, nous avons créé un système de mires visuelles sous la forme de sphères. Ces mires sont placées respectivement à 0,6 seconde en avant du véhicule-sujet (petite sphère), et sur le pare-choc arrière du véhicule suivi (grande sphère). Si le sujet est à 0,6 s (+/- 10 %), les deux mires sont vertes (et la petite sphère est incluse dans la plus grande). Dans le cas contraire (suivi trop proche ou trop éloigné), les sphères deviennent rouges. La consigne donnée au sujet est de chercher à maintenir en permanence les mires de couleur verte.

Par ailleurs, le comportement longitudinal du véhicule à suivre peut prendre deux formes : celui-ci peut soit avoir une vitesse stable (de 50, 90 ou 130 km/h), soit adopter une vitesse oscillante (de +/- 10 % autour de la vitesse de consigne).

Enfin, cette tâche de suivi est réalisée dans trois environnements routiers différents, sur autoroute, route nationale, ou en milieu urbain, imposant donc des vitesses de conduite différentes (respectivement 130, 90 et 50 km/h). Le parcours autoroutier a été créé pour cette expérimentation à partir de trois tronçons élémentaires (ligne droite, virage à gauche et virage à droite de 5 degrés de courbure) que nous avons assemblés bout à bout, puis habillés (signalisation, nature, etc.). Pour faciliter les développements, nous avons aussi créé un script permettant de générer automatiquement des tronçons autoroutiers de longueur variable, avec leur habillage (positionnement aléatoire autour de la route des différents arbres et arbustes avec une densité réglable). L'infrastructure route nationale est une double voie limitée à 90 km/h, construite de la même façon que l'environnement autoroutier. Le parcours urbain, enfin, est une zone urbaine existant dans la plateforme SiVIC, dans laquelle les conducteurs doivent se déplacer en suivant les informations de direction disponibles dans la signalisation verticale (figure 57).



FIGURE 57 – Parcours en contexte urbain

En considérant toutes ces sources de variation, nous obtenons ainsi un total de douze scénarii différents (trois environnements, deux modes de suivi, deux types de comportement du véhicule suivi). Les participants devaient réaliser chaque scénario pendant 1,5 minute environ, avant de passer au scénario suivant. Par ailleurs, ces douze scénarii ont été réalisés avec et sans double tâche visuelle. L'ensemble représente donc un total de 30 à 35 minutes de conduite (pour moitié en simple tâche et pour moitié en double tâche).

De plus, nous avons étudié des situations critiques pendant cette tâche de conduite. En effet, à la fin de dix scénarii parmi les vingt-quatre (cinq sans double tâche, et cinq avec double tâche), le véhicule suivi engageait un freinage brutal, imposant au conducteur une réaction d'urgence pour éviter la collision. Dans le cas des scénarii avec double tâche, une sollicitation visuelle intervenait entre 400 et 600 ms avant le freinage d'urgence du véhicule suivi. En prenant en compte le temps nécessaire au sujet pour pouvoir consulter l'écran et produire sa réponse à la double tâche distractive, cela signifie que dans la majorité des cas, le freinage d'urgence du véhicule suivi s'est engagé alors que l'attention visuelle du conducteur se portait sur l'écran embarqué, et non sur les feux-stops du véhicule situé devant lui.

B - La tâche de distraction visuelle (avec signal sonore initial) :

La tâche de distraction visuelle à laquelle étaient soumis les conducteurs reposait sur la présentation de trois pictogrammes (figure 58(a)) sur un écran embarqué situé à hauteur d'un autoradio. Pour garantir la saillance perceptive de cette information, l'apparition visuelle était accompagnée d'un « bip » sonore. Quelques secondes plus tard (temps de latence aléatoire compris entre 3 et 4 secondes), l'un des trois pictogrammes apparaissait en dessous de l'ensemble initial (figure 58(b)). Le conducteur devait alors appuyer sur un contrôleur à trois boutons pour signifier quel pictogramme était répliqué (A, B ou C). Cette double tâche était répétée en continu

tout au long de la tâche de conduite, avec des intervalles d'une douzaine de secondes (entre dix et quinze) entre chaque sollicitation.

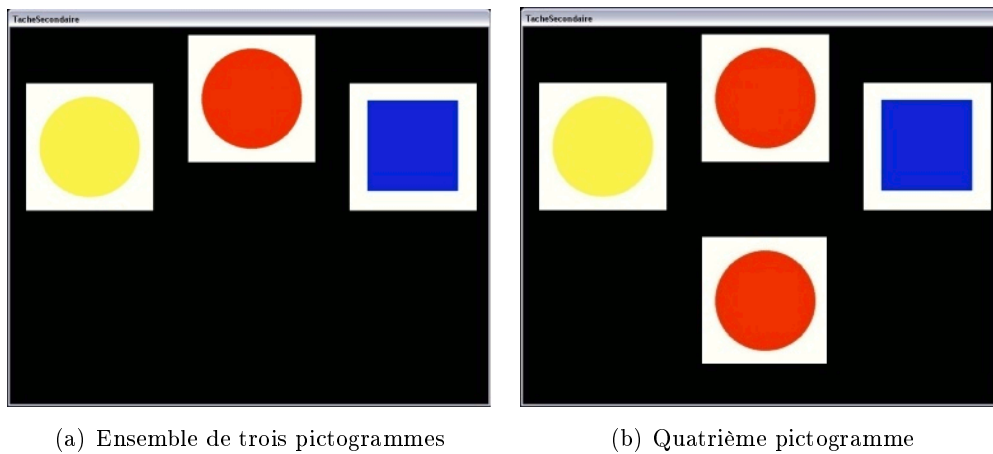


FIGURE 58 – Double tâche visuelle

5.3.3 Population

Cette expérimentation a été réalisée auprès d'un groupe de 20 conducteurs, 10 femmes et 10 hommes, âgés de 23 à 56 ans (âge moyen de 35 ans), et possédant une bonne expérience de conduite (permis de conduire acquis depuis plus de cinq ans et parcourant un minimum de cinq mille kilomètres par an).

5.3.4 Hypothèses et résultats attendus

Au vu des caractéristiques de fonctionnement de notre module de perception, reposant sur (1) un œil virtuel permettant de faire remonter l'information (intégration perceptive) présente dans la zone fovéale du champ visuel, et (2) d'un processus d'intégration cognitive permettant de mettre à jour les représentations mentales tactiques, l'hypothèse générale que nous formulerons ici est relativement triviale : si le conducteur ne porte pas son attention visuelle sur la route, alors l'information ne sera pas perçue par le récepteur sensoriel et encore moins intégrée dans la représentation tactique.

Compte tenu du caractère évident de cette hypothèse, l'enjeu ne sera pas pour nous de la valider, mais plutôt de chercher à la reproduire. A cet égard, l'objectif de cette expérimentation est plus ambitieux. Il s'agit de mieux comprendre l'origine de certaines erreurs de conduite et de pouvoir les simuler au moyen de notre modèle informatique. En effet, de nombreux travaux ont montré les effets négatifs de la distraction visuelle au volant (e.g. [Horberry et al., 2006], [Lee et al., 2007]) et qu'elle pouvait être une cause d'accident. Il apparaît clairement qu'une distraction visuelle impactera la conduite automobile puisque le conducteur ne regarde alors plus la route, et qu'il peut donc omettre une information capitale (comme le changement d'état des feux de stop du véhicule qu'il est en train de suivre, dans le cadre de notre protocole).

Dans ce contexte, notre objectif sera de collecter des données expérimentales auprès de conducteurs humains afin de mesurer les conséquences de la distraction visuelle en conduite

et de pouvoir en simuler les effets, en termes d'altération des processus d'intégration perceptivo-cognitive de l'information, d'inadéquation du contenu des représentations mentales ou de dégradation de la performance de conduite, et ceci en situation normale et en situation critique.

Enfin, l'enjeu sera aussi d'étudier comment les conducteurs gèrent leurs ressources visuelles et partagent leur attention perceptive entre la tâche de conduite et une tâche secondaire. Les données collectées devraient ainsi nous permettre d'identifier des patterns visuels de consultation d'information dans l'habitacle susceptibles de venir enrichir l'analyse des stratégies d'exploration visuelle de l'environnement telles que nous les avons étudiées durant l'expérimentation précédente.

5.3.5 Présentation des résultats

La principale hypothèse que nous avons posée initialement postulait un impact négatif de la distraction visuelle, à la fois sur la perception des événements et sur la performance de conduite. C'est précisément sur ce dernier niveau que se focalisent les résultats que nous présenterons dans cette section. Nous nous intéresserons tout d'abord aux effets de la distraction en situation de conduite « normale », puis nous traiterons ensuite les situations d'urgence (freinage brusque du véhicule suivi). Les différences significatives qui sont présentées ici sont basées sur le test-T de student.

En situation de conduite normale (aucun freinage brusque du véhicule suivi), les différences significatives observées durant cette expérimentation portent sur deux aspects particuliers de la performance de conduite :

- Une réduction significative de la distance intervéhiculaire pendant la tâche de suivi libre : pour tous les environnements (autoroute, nationale et ville), nous observons en effet une diminution du TIV entre le véhicule du sujet et le véhicule le précédant lorsque le conducteur est soumis à une double tâche visuelle. La moyenne des TIV de suivi sans double tâche est de 3 secondes, et seulement de 2,65 secondes en case double tâche ($p < 0,01$).
- Une diminution de la performance de maintien de distance pour les tâches de suivi contraint : sans double tâche les conducteurs conservent en moyenne 57 % du temps la mire de suivi de couleur verte. En double tâche, cette performance chute à 44 % ($p < 0,01$). Nous pouvons aussi remarquer qu'en moyenne, les conducteurs en double tâche adoptent plus souvent un TIV inférieur à 0,6 s (17 % du temps), alors que cela ne représente que 10 % du temps de conduite en simple tâche ($p < 0,05$).

En situation de conduite critique (freinage brusque du véhicule suivi), deux différences notables ont été observées chez nos conducteurs :

- Le temps de réaction des conducteurs pour agir sur le frein augmente significativement en situation de double tâche : tous contextes confondus, pendant la tâche de suivi contraint, le temps de réaction moyen des conducteurs est de 0,89 s. sans double tâche, et de 1,1 s. en double tâche visuelle (T student, $p < 0,01$).
- Le risque d'accident augmente sensiblement en cas de double tâche. Le tableau 7 présente les pourcentages d'accidents observés, en fonction des contextes routiers, des tâches demandées et de la double tâche ajoutée.

<i>Contexte</i>	<i>Tâche</i>	<i>Sans double tâche visuelle</i>	<i>Avec double tâche visuelle</i>
Autoroute	Suivi libre, vitesse stable	55%	50%
	Suivi libre, vitesse instable	35%	50%
	Suivi contraint, vitesse stable	65%	70%
	Suivi contraint, vitesse instable	70%	70%
Périurbain	Suivi libre, vitesse instable	60%	60%
	Suivi contraint, vitesse instable	55%	80%
Urbain	Suivi libre, vitesse stable	20%	30%
	Suivi libre, vitesse instable	30%	30%
	Suivi contraint, vitesse stable	30%	30%
	Suivi contraint, vitesse instable	25%	90%

TABLEAU 7 – Pourcentage d'accidents en fonction des contexte, tâche et double tâche visuelle

Nous pouvons souligner ici que le « suivi contraint en zone urbaine, avec une vitesse instable du véhicule précédent » est un scénario extrêmement accidentogène en cas de double tâche visuelle (90 % d'accident), alors qu'il est par contraste plutôt bien géré par nos conducteurs en simple tâche (25 % d'accident seulement). Cela fait de cette situation expérimentale un scénario particulièrement intéressant si l'on souhaite pouvoir évaluer l'impact de différentes solutions d'affichages embarqués, ou de différentes modalités de diffusion d'une information.

5.3.6 Discussion et modélisation des effets de la distraction visuelle sur la représentation mentale

Les résultats que nous avons présentés montrent clairement une altération de la performance de conduite en cas de distraction visuelle. Cela affecte le maintien de la distance de suivi en situation de conduite normale et augmente le risque d'accident en situation critique.

Au vu des résultats obtenus, nous pouvons tout d'abord conclure que le fait de ne pas avoir son attention visuelle consacrée à la route empêche l'intégration perceptive puis cognitive de l'information situationnelle, ce qui pourra perturber tout autant des performances de conduite routinières et automatiques (comme le maintien d'une distance de suivi), que des performances plus décisionnelles (comme le fait d'engager un freinage d'urgence).

Mais ces résultats sont aussi intéressants du point de vue du « vécu » des participants, notamment concernant les situations critiques : tous les sujets ont eu une réaction de surprise au moins une fois lors de l'expérimentation, en repositionnant le regard en direction de la route, alors qu'ils étaient en train de traiter la réponse à la double tâche. Cet effet de surprise résulte de la soudaine prise de conscience d'un décalage important entre, d'un côté, la réalité objective et, de l'autre côté, la situation de conduite telle qu'ils se la représentaient mentalement tandis qu'ils consultaient l'écran embarqué. Nous pouvons en conclure que leur représentation ne contenait pas l'information du freinage du véhicule suivi et qu'ils n'avaient pas anticipé ce changement d'état avant d'avoir perçu cette information.

A - Analyse et modélisation des stratégies de gestion et d'allocation des ressources visuelles en situation de double tâche :

Au-delà de l'investigation du processus d'intégration perceptivo-cognitive de l'information,

5.3. Expérimentation 2 : Intégration cognitive et effets de la distraction visuelle

cette expérimentation visait aussi à collecter des données sur les stratégies visuelles déployées par les conducteurs pour réaliser la double tâche et partager leurs ressources visuelles entre la route et un écran embarqué. Comme décrit précédemment, la double tâche visuelle se décomposait en trois phases : (1) trois pictogrammes étaient présentés au sujet sur un écran externe avec un « bip » d'alerte, (2) quelques secondes plus tard une réplique de l'un des pictogrammes était ajoutée au premier ensemble, (3) le conducteur devait alors répondre dans les trois secondes en appuyant sur un boîtier à trois boutons.

Les résultats obtenus ont permis d'identifier deux grandes stratégies d'allocation de ressources visuelles par nos conducteurs, face à la double tâche proposée. Ces deux stratégies sont représentées schématiquement dans la figure 59.

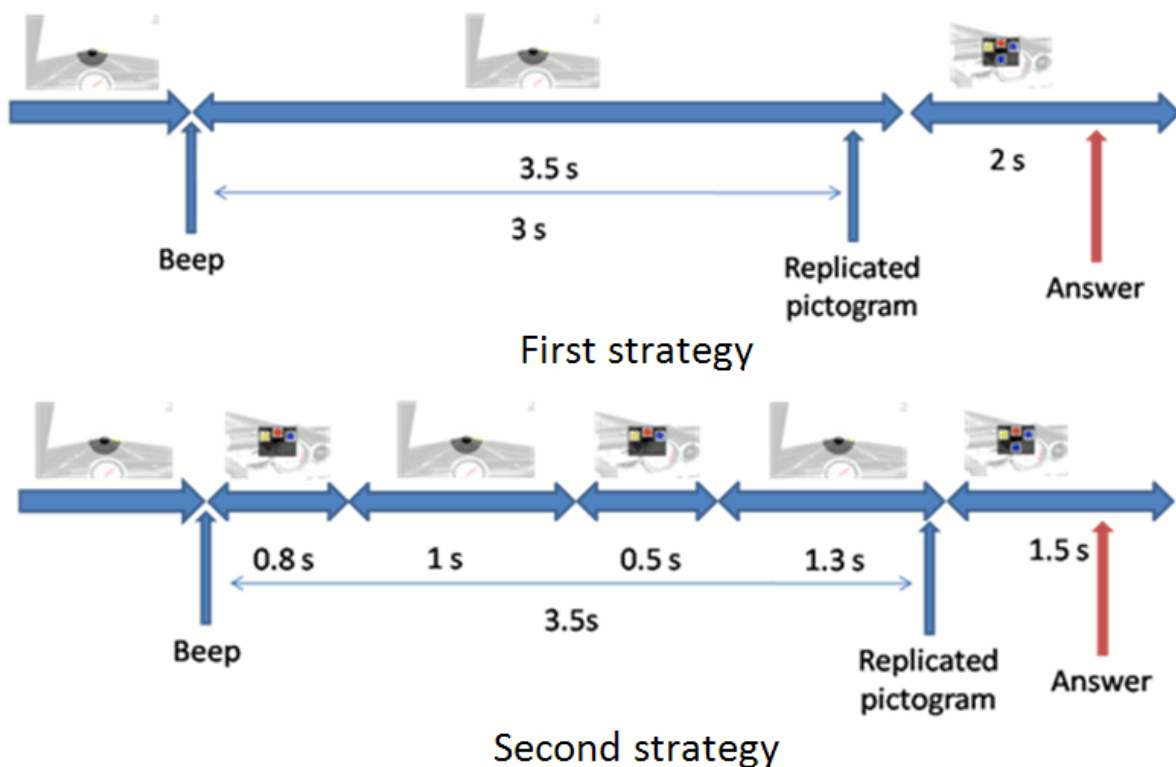


FIGURE 59 – Stratégies d'allocation des ressources visuelles par les conducteurs

Dans le cadre de la première stratégie, représentant 58 % des cas observés, les sujets attendent entre 3 et 4 secondes lorsque le « bip » est émis, pour ensuite (i) regarder les trois pictogrammes, (ii) observer la réplique proposée et (iii) produire leur réponse. Dans ce cas, le conducteur n'a besoin de consulter l'écran externe qu'une seule fois, mais pendant un temps relativement long (durée de fixation de 2 s en moyenne) (codeQR 13, droite). Par ailleurs, cette stratégie peut échouer. En effet, si le sujet observe l'écran avant que la réplique ne soit affichée, il doit alors réallouer son attention visuelle à la route avant de pouvoir ensuite revenir consulter l'écran. Il est à noter que cette stratégie semble perturbée lorsque la tâche de conduite devient trop complexe (i.e. conduite en zone urbaine et en suivi contraint). Dans ce cas, la première consultation est souvent trop précoce et le nombre de consultations pour attendre la réplique augmente alors considérablement. Ce résultat pourrait s'interpréter par une stratégie qui consisterait à allouer de

l'attention cognitive à la vision périphérique durant la phase d'attente, afin de détecter « du coin de l'œil » le moment où la réplique apparaît, stratégie qui serait altérée en cas de tâche de conduite trop sollicitante cognitivement pour pouvoir consacrer des ressources à la vision périphérique. Une autre interprétation possible serait de considérer que le conducteur utilise une « horloge » interne pour gérer son temps d'attente, horloge dont le fonctionnement serait perturbé en cas de conduite très sollicitante cognitivement. De nouvelles expérimentations seraient nécessaires pour examiner ces différentes interprétations possibles.

Pour la seconde stratégie, représentant 31 % des cas observés, les conducteurs regardent l'écran externe au moment du « bip » sonore (fixation de 0,8 s en moyenne) afin d'observer les trois pictogrammes « question », puis ils effectuent des aller-retours réguliers entre la route et l'écran externe, et cela jusqu'à ce que le pictogramme « réplique » soit présenté (fixation de 0,5 s en moyenne). Enfin, lorsque celui-ci apparaît, ils consultent l'écran plus longtemps (fixation de 1,5 s en moyenne) pour prendre leur décision et produire leur « réponse » via le boîtier (codeQR 13, gauche). A la différence de la stratégie précédente qui vise à réduire au maximum le nombre de consultations (au point de ne quitter la route des yeux qu'une seule fois mais au prix d'une longue fixation de 2 s pour voir la « question » et produire la « réponse »), cette stratégie vise au contraire à permettre un traitement plus progressif de l'information (la « question », puis la « réponse », modulo des consultations intermédiaires pour détecter rapidement l'apparition de la réplique). Au final, le temps cumulé des fixations sur l'écran pour gérer la double tâche (regard hors-route) est plus important que dans le cadre de la première stratégie, mais la durée de la consultation « réponse » est beaucoup plus courte (1,5 s en moyenne). Ainsi, pour cette stratégie, ce n'est pas le nombre de consultations qui est optimisé, mais la durée de la consultation finale, toujours inférieure à 2 s (temps à partir duquel il devient particulièrement dangereux de conduire sans avoir regardé la route).



CodeQR 13: (1) <http://www.youtube.com/watch?v=ZP3ZDck-Tlo>
 (2) <http://www.youtube.com/watch?v=i1qeiADqF3c>

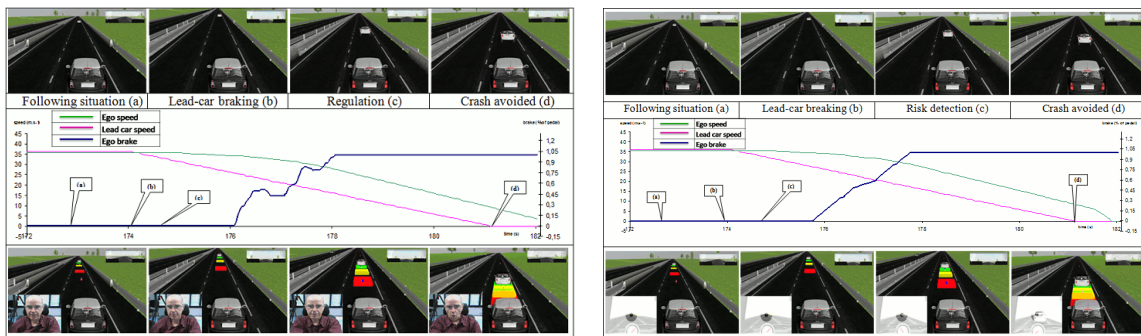
Au vu de ces résultats, il semble bien que nous ayons à faire ici à deux patterns de gestion et d'allocation des ressources visuelles différents, chaque stratégie ayant ses avantages et ses inconvénients, et chacune présentant des risques de distraction différents (temps cumulé de regard « hors-route » plus élevé d'un côté, versus durée potentiellement critique de la consultation finale, de l'autre côté)

Grâce à cette analyse des stratégies visuelles déployées pour consulter un écran dans l'habitacle, nous avons pu concevoir et intégrer dans notre modèle de simulation cognitive une fonction d'allocation des ressources visuelles en double tâche qui permet à notre modèle d'accorder son attention visuelle à une tâche secondaire selon l'un ou l'autre des deux patterns. Grâce à cela, nous pouvons chercher à simuler les effets potentiels de la distraction visuelle au niveau des représentations mentales et/ou des erreurs de conduite associées à la distraction visuelle durant la conduite.

B - Exemples de simulation numérique des erreurs de conduite induites par une double tâche de distraction visuelle :

A partir des données expérimentales que nous avons collectées, nous avons simulé des situations pour lesquelles le conducteur observe la route au moment où le véhicule qui le précède freine brusquement, et des situations dans le cadre desquelles cet événement se produit alors que le conducteur est visuellement distrait. Les figures suivantes illustrent ces deux configurations situationnelles, en présentant d'un côté une situation observée auprès d'un conducteur réel (vues « a ») et de l'autre côté, une simulation réalisée avec notre modèle (vues « b »).

Dans le premier exemple (figure 60), le conducteur (sous-figure 60(a)), comme le modèle (sous-figure 60(b)), observe la route en permanence. Lorsque le véhicule suivi freine brusquement, il détecte rapidement le changement d'état et engage immédiatement un freinage d'urgence. La collision est alors évitée.



(a) Un sujet lors de l'arrêt d'urgence, sans détournement du regard

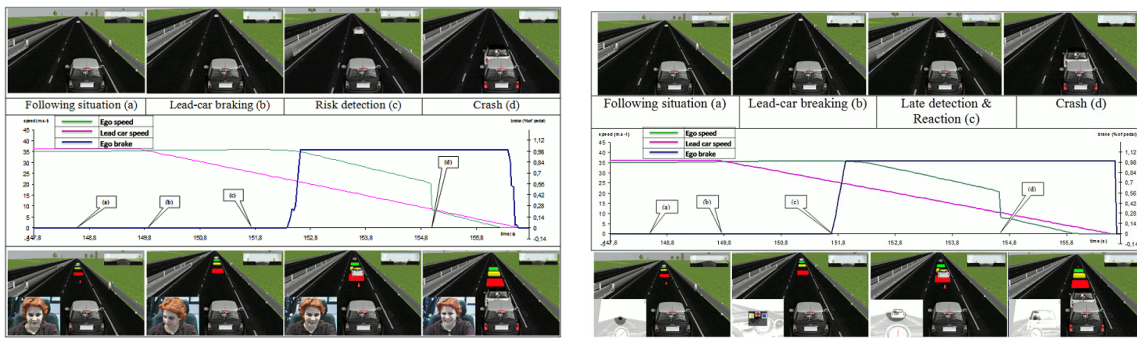
(b) Simulation de la situation, sans détournement du regard

FIGURE 60 – Arrêt d'urgence sans détournement du regard

Dans le second exemple (figure 61) la conductrice (sous-figure 61(a)), comme le modèle (sous-figure 61(b)) est en train d'observer l'écran embarqué au moment où le véhicule suivi freine. Elle ne détecte par conséquent pas tout de suite ce changement d'état. Lorsqu'elle accorde de nouveau son attention à la scène routière, il est trop tard pour éviter l'accident. Elle engage un freinage d'urgence, mais cela ne lui permet pas d'arrêter son véhicule avant la collision.

Grâce à la simulation numérique de la cognition que permet notre modèle, il devient ainsi possible de reproduire les effets de la distraction au niveau de la performance de conduite, mais également de visualiser l'activité mentale d'un conducteur en cas de distraction visuelle. C'est ce qu'illustre la figure 62.

Comme nous pouvons le voir à la phase 4, la position du véhicule blanc n'est pas la même dans la réalité et dans la représentation mentale de la conductrice (cf. zoom présenté en figure 63). Ce n'est qu'au moment où celle-ci porte de nouveau son regard sur la route qu'elle peut percevoir la position de ce véhicule et prendre alors conscience du décalage entre le contenu de sa représentation mentale interne et la réalité situationnelle externe. Après intégration cognitive, elle met alors à jour sa représentation : le véhicule blanc fait alors un « saut », de sa position estimée (i.e. extrapolée mentalement pendant la double tâche à partir des informations dont disposait la



(a) Un sujet lors de l'arrêt d'urgence, avec détournement du regard (b) Simulation de la situation, avec détournement du regard

FIGURE 61 – Arrêt d'urgence avec détournement du regard

conductrice au moment où elle a détourné les yeux) à sa position réelle, telle qu'elle est perçue au moment où celle-ci porte de nouveau son attention sur la route.

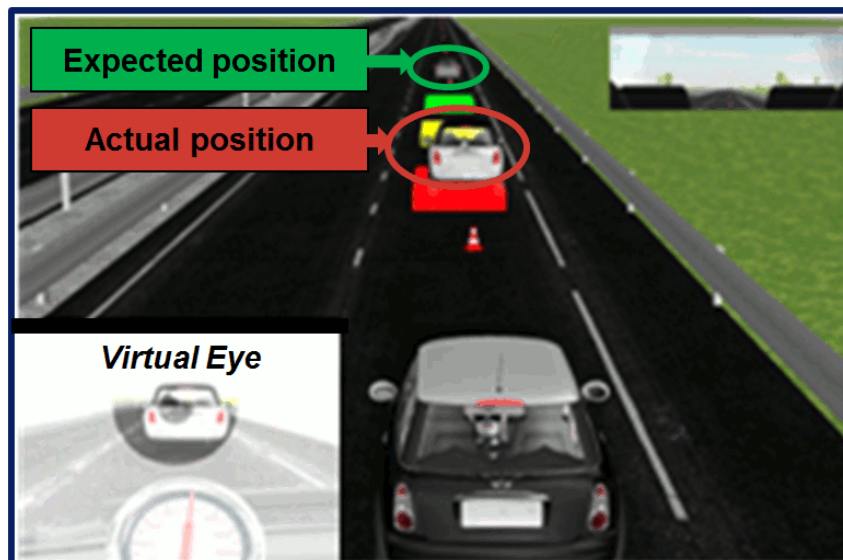


FIGURE 63 – Différence entre la position dans la représentation mentale et dans la réalité

5.3. Expérimentation 2 : Intégration cognitive et effets de la distraction visuelle



FIGURE 62 – Visualisation de la non-intégration cognitive d'une information visuelle grâce à la simulation numérique

5.4 Expérimentation 3 : Simulation numérique du processus de prise de décision

5.4.1 Enjeux et objectifs

L'objectif de cette dernière expérimentation est d'étudier le processus de prise de décision chez les conducteurs automobiles. Selon la théorie postulée par COSMODRIVE⁷ (discutée en section 3.2.4), la prise de décision repose sur un processus de déploiement cognitif de la représentation mentale de la situation courante permettant au conducteur de se projeter mentalement dans l'avenir (élaboration de représentations anticipées) et d'examiner ainsi les risques de conflits susceptibles de se produire en fonction de différentes alternatives comportementales. En s'appuyant sur une matrice de conflits inter-zones enveloppes, il peut comparer ces actions alternatives et choisir celle qui lui semblera constituer le meilleur « compromis cognitif » [Amalberti, 1996] face aux caractéristiques de la situation et aux contraintes tactiques (garantir la sécurité) ou stratégiques (gagner du temps, par exemple) qu'il souhaite satisfaire à cet instant.

L'objectif de cette expérimentation sera de vérifier cette théorie d'une prise de décision fondée sur un processus d'anticipation par déploiement cognitif. Pour formuler nos hypothèses de recherche, nous partirons directement des résultats de simulations numériques que nous avons présentées dans le chapitre précédent (section 4.6.1). Dans ces démonstrations, nous avons en effet présenté différentes simulations d'une manœuvre de tourne-à-gauche dans un carrefour à feux. Chaque simulation correspondait à un déploiement cognitif particulier permettant de visualiser des conflits de zones enveloppes entre le véhicule-sujet et un véhicule circulant à contresens, conflits susceptibles ou non de se produire en fonction des comportements de conduite « exécutés mentalement » par le modèle.

Ces résultats constituent le support de la prise de décision, puisqu'ils peuvent permettre au modèle de comparer des actions à mettre en œuvre, en fonction de leurs conséquences et de leurs risques respectifs. Si notre modèle actuel ne permet pas encore de simuler complètement l'ensemble de ce processus décisionnel fondé sur l'anticipation (en raison de limites techniques soulignées en 4.3.3 nécessitant d'optimiser l'implémentation des zones enveloppes sur SiVIC), nous avons néanmoins vu que le processus de déploiement assisté manuellement produisait des résultats identiques à ce que produirait automatiquement un processus de décision complètement implémenté informatiquement (cf.4.6.1). Il est donc possible, en assistant notre modèle, de générer des prédictions comportementales à partir de la simulation numérique. Cette expérimentation part de ces simulations antérieures que nous allons prolonger ici pour construire nos hypothèses, avec l'objectif de comparer les prédictions du modèle avec les décisions et les performances de conducteurs humains.

A cet égard, cette expérimentation nous permettra d'évaluer la portée de notre modèle et de montrer l'intérêt de la simulation numérique pour investiguer la cognition humaine, ce qui constitue l'objectif épistémologique général de cette thèse tel qu'il a été discuté dans le premier chapitre de ce mémoire.

⁷Cognitive Simulation MOdel of the DRIVER

5.4.2 Protocole expérimental

A - La tâche de conduite :

Cette expérimentation va s'intéresser à la prise de décision en situation de Tourne-à-Gauche (TàG) dans un carrefour à feux situé en ville, avec trafic en sens inverse intégrant un créneau d'insertion entre un véhicule « rouge » et un véhicule « noir ». Ce créneau d'insertion est défini par le Temps Inter-Véhiculaire (TIV) entre le véhicule rouge et le véhicule noir qui le suit.

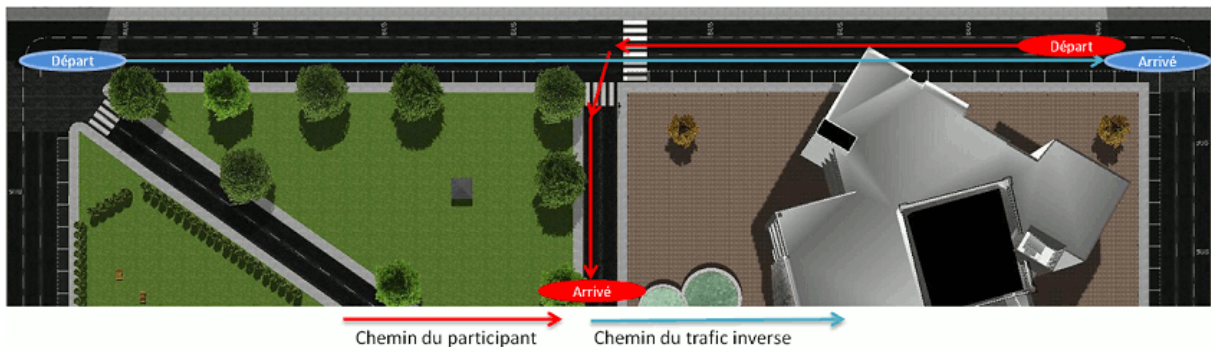


FIGURE 64 – Parcours Tourne à gauche

Durant cette expérimentation, chaque participant devait réaliser 22 TàG dans un même carrefour à trois entrées (figure 64), avec différents créneaux d'insertion possibles, compris entre 0.6 et 6 secondes de TIV (via neuf valeurs de TIV intermédiaires). Nous avons défini ces deux extrêmes comme borne minimale et maximale pour réaliser un TàG. En effet, un TIV de 0.6 s ne permettra pas de traverser la voie opposée sans risque majeur de collision, et un TIV de 6 secondes devrait être accepté par l'ensemble des conducteurs, car 84 mètres séparent alors les deux véhicules, distance amplement suffisante pour réaliser la manœuvre de tourne-à-gauche en toute sécurité. Comme nous le verrons par la suite (lors de la formulation de nos hypothèses opérationnelles), ces valeurs limites de TIV, comme les valeurs intermédiaires, ont été définies à partir de la théorie des zones enveloppes de COSMODRIVE appliquée au cas particulier du franchissement de ce carrefour.

B - Visualisation de la situation par les sujets :

La figure 65 permet de visualiser les deux écrans du simulateur de conduite utilisés durant cette expérimentation. Lors de l'arrivée au niveau de l'intersection, l'écran central permet au conducteur de voir la scène routière avant et l'écran de gauche lui permet d'observer la rue perpendiculaire, dans laquelle il devra s'engager à l'issue du TàG.

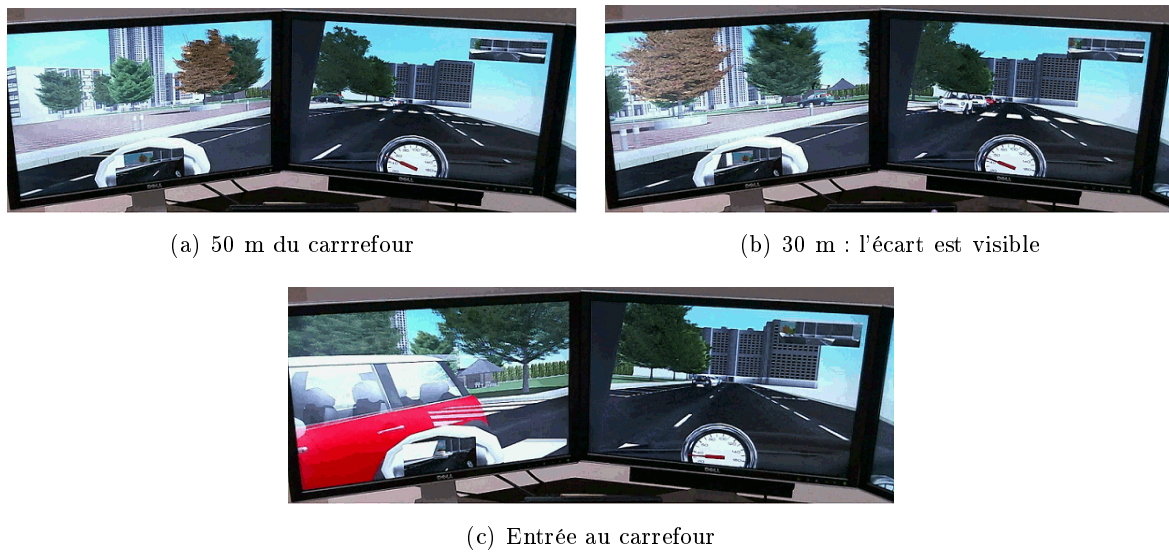


FIGURE 65 – Visualisation de l'arrivée au carrefour

La figure 66 présente pour sa part la visualisation qu'un conducteur a des écarts inter-véhiculaires sur l'écran central, au moment où il est en position d'engager sa manœuvre de TàG. La figure 66(a) présente cette visualisation pour un TIV de 1,2 s, 66(b) pour un TIV de 2,3 s, 66(c) pour un TIV de 3,0 s et 66(d) pour un TIV de 5,0 s.

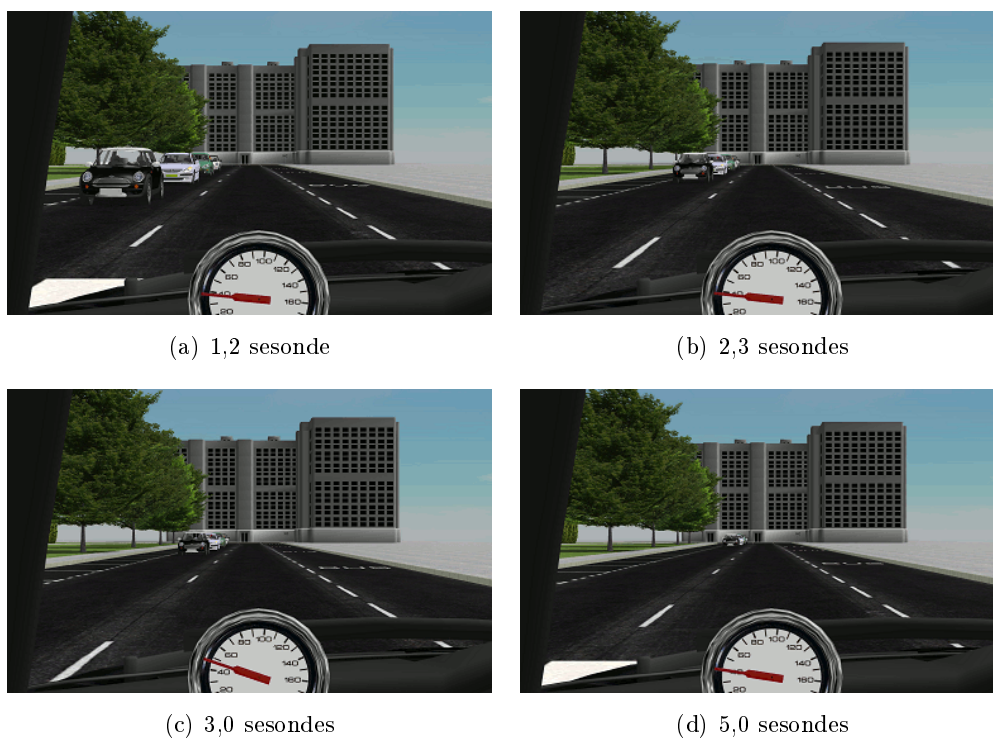


FIGURE 66 – Visualisation des TIV

Afin d'étudier différentes manœuvres possibles pour réaliser le tourne-à-gauche, deux types de scénarii de démarrage des véhicules circulant à contresens ont été conçus. Dans le premier cas, ces véhicules démarrent en même temps que le participant. Dans le second cas, ils démarrent

5.4. Expérimentation 3 : Simulation numérique du processus de prise de décision

seulement au moment où le participant a déjà parcouru 50 mètres. Cela permet de contraindre le sujet à opter pour des stratégies d'approche différentes du tourne-à-gauche. Chaque conducteur doit réaliser chaque scénario avec les onze TIV possibles (compris entre 0,6 et 6 s), ce qui fait un total de 22 situations de TàG / sujet examinées durant l'expérimentation.

C - Ordre de passation des scénarii :

Pour vérifier que l'ordre de réalisation des TàG n'avait pas d'influence sur les décisions de passage des conducteurs, nous avons scindé les sujets en deux groupes, chaque groupe passant les scénarii dans un ordre différent. Le tableau 8 décrit l'ordre de passation des scénarii pour chaque groupe (le chiffre désigne le temps de TIV en dixièmes de seconde, « stop » signifie que les véhicules du trafic démarrent avec une latence par rapport au participant).

N°	Groupe A	Groupe B	N°	Groupe A	Groupe B
1	36	40 stop	12	23	30
2	30 stop	33	13	50	06 stop
3	40 stop	30 stop	14	33 stop	36 stop
4	40	26 stop	15	6	50
5	26	12 stop	16	30	18
6	18 stop	36	17	60 stop	6
7	60	40	18	12	60 stop
8	12 stop	50 stop	19	18	26
9	23 stop	23	20	50 stop	33 stop
10	33	23 stop	21	26 stop	12
11	06 stop	60	22	36 stop	18 stop

TABLEAU 8 – Ordre de proposition des TIV

D - Données comportementales collectées sur le simulateur :

L'objectif de cette expérimentation est d'étudier la prise de décision des conducteurs en fonction du TIV entre le véhicule « rouge » et le véhicule « noir ». Pour cela, nous avons enregistré sur le simulateur (1) les paramètres du véhicule du participant, (2) ceux de la voiture « rouge » (derrière laquelle le sujet doit faire son TàG, s'il décide de s'engager) et de la voiture « noire » (qui suit le véhicule rouge, avec un TIV différent pour chaque scénario).

Les paramètres communs à tous les véhicules sont les suivants : un numéro d'identification spécifique, le braquage, la norme d'accélération, la position (x,y,z), la vitesse (x,y,z) et le vecteur d'accélération (x,y,z). Le véhicule du sujet possède en plus les valeurs de braquage, d'accélération et de freinage. Enfin, chaque ligne enregistrée possède un « time code » unique, un « nom de bloc » permettant de définir la situation en cours, et le « n° du sujet » en train de réaliser l'expérimentation.

E - Données provenant d'évaluations subjectives des participants :

Au-delà des comportements de conduite, nous avons aussi collecté des évaluations subjectives auprès des conducteurs. Ces évaluations étaient collectées après chaque situation de TàG. Ces jugements portaient sur (1) la criticité de la manœuvre de TàG, (2) le réalisme de la décision prise (être ou non passé) par rapport à la décision qu'aurait prise le sujet sur route réelle, et (3) un jugement sur le comportement des autres conducteurs dans une situation identique. Pour collecter

ces évaluations subjectives, nous avons développé un logiciel de présentation des questions et de collecte automatique des réponses. Ce logiciel permettait de visualiser simultanément sur un écran la « Question » posée et la « Réponse » à produire par le participant, au moyen d'une réglette non graduée sur laquelle on peut positionner un curseur entre deux réponses extrêmes (permettant ainsi de récupérer une valeur numérique comprise entre 0 % et 100 %). Les questions, assorties des réponses extrêmes possibles, étaient formulées de la façon suivante :

- **Question 1** : « Comment jugez-vous la criticité du TàG dans cette situation ? ». Réponses extrêmes : « Pas du tout critique » (0 %) - « Extrêmement critique » (100 %). Si le sujet avait décidé de ne pas engager de TàG, il devait estimer la criticité du TàG « dans l'hypothèse où il aurait effectivement engagé cette manœuvre ».
- **Question 2** : « Sur route réelle, seriez-vous passé ? ». Réponses extrêmes : « Absolument pas » (0 %) - « Oui, Certainement » (100 %)
- **Question 3** : « Sur route réelle, pensez-vous que certains conducteurs seraient passés ? ». Réponses extrêmes : « Personne » (0 %) - « Tout le monde » (100 %)

F - Phase d'apprentissage :

Avant l'expérimentation, une phase d'apprentissage a été mise en place, permettant au sujet de se familiariser avec le véhicule et de passer N fois le carrefour, sans trafic opposé, pour lui permettre de bien maîtriser la manœuvre de Tourne-à-gauche, à différentes vitesses, et selon différentes stratégies de franchissement (passer sans s'arrêter ou en s'arrêtant puis en redémarrant, effectuer un virage plus ou moins serré, etc.).

L'expérimentateur était là pour vérifier que plusieurs vitesses avaient bien été testées, et que les différentes stratégies avaient bien été expérimentées. A l'issue de cette phase d'apprentissage libre, trois situations d'essais avec trafic opposé étaient réalisées par le participant, afin qu'il puisse prendre ses repères en matière de perception des créneaux d'insertion.

5.4.3 Population

Les sujets ayant participé à cette expérimentation sont les mêmes que pour la première expérimentation que nous avons présentée. Il s'agit d'une population de 23 conducteurs expérimentés (conduisant en moyenne 10 174 km par an), âgés de 21 à 30 ans (moyenne d'âge de 25,09 ; écart-type de 2,57), intégrant 12 femmes et 11 hommes.

5.4.4 Elaboration des hypothèses

Comme nous l'avons souligné en introduction, l'objectif de cette expérimentation est d'utiliser la simulation numérique pour évaluer la théorie d'un processus décisionnel basé sur le déploiement cognitif, l'analyse des conflits de zones enveloppes (décrit en section 3.4.2), et la matrice de risques présentée en figure 70

A - Formulation des hypothèses générales :

Selon cette théorie, nous pouvons poser comme **hypothèse générale** que les conducteurs, s'ils ont bien perçu la situation et bien anticipé mentalement les événements, devraient plutôt engager un TàG en l'absence de conflit potentiel et, à l'inverse, qu'ils ne devraient plutôt pas engager cette manœuvre en cas de conflit mentalement anticipé.

Au-delà de cette première dichotomie, il est néanmoins possible de faire des **hypothèses plus précises**, en se basant sur les différents types de conflits recensés dans la matrice.

Ainsi, on peut admettre qu'un certain nombre de participants décidera de réaliser le TàG malgré un conflit inter-véhiculaire (qu'il s'agisse d'une prise de risque délibérée ou d'une mauvaise estimation de la criticité de la manœuvre, avant de l'engager). Mais dans ce cas, nous pouvons néanmoins faire l'hypothèse que le nombre de TàG sera inversement proportionnel aux valeurs de criticité indiquées dans la matrice. En d'autres termes, plus le TàG impliquera une prise de risque élevée, et plus le nombre de participants décidant de ne pas s'engager dans cette manœuvre devrait être élevé.

Cette dernière hypothèse en appelle deux autres qui lui sont complémentaires, concernant les jugements de criticité :

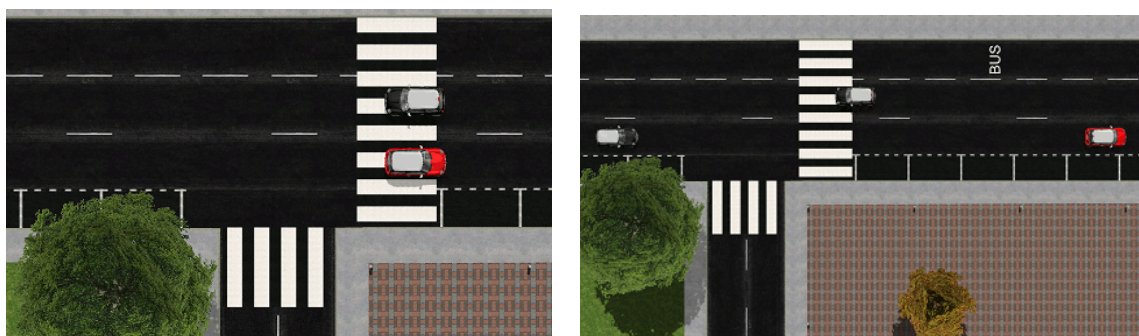
1. Les manœuvres de TàG « avec conflit » devraient être subjectivement évaluées par les sujets comme plus critiques que les TàG « sans conflit ».
2. Le jugement de criticité devrait être d'autant plus élevé que le conflit présente un niveau de risque élevé dans la matrice.

B - Construction des hypothèses opérationnelles :

Afin de définir des hypothèses opérationnelles basées sur les prédictions du modèle et pouvant donner lieu à des mesures comparatives avec les performances des humains, il est nécessaire de calculer les temps pour que le véhicule du conducteur (humain ou modèle) rencontre les zones enveloppes du véhicule circulant à contresens (ou avec ce véhicule lui-même).

Ces temps sont relatifs au positionnement des zones enveloppes, que nous avons définies comme étant des enveloppes autour du véhicule s'étirant plus ou moins loin en avant du véhicule, en fonction de la vitesse d'exécution de la manœuvre et de la distance à parcourir pour traverser le carrefour.

A l'arrivée à l'intersection, nous considérons que le conducteur engagera sa manœuvre de TàG lorsque le véhicule « Rouge » (ouvrant le créneau d'insertion inter-véhiculaire) arrivera à sa hauteur et sortira de l'intersection (cf. fig 67(a)). Le conducteur doit aussi réaliser sa manœuvre avant que le véhicule « Noir » (fermant le créneau) n'arrive à sa hauteur (cf. fig 67(b)). Pour faciliter notre discours, nous appellerons désormais le véhicule ouvrant le créneau « véhicule rouge » et le véhicule le fermant « véhicule noir ».



(a) Début de la manœuvre

(b) Exemple d'arrivée du véhicule noir

FIGURE 67 – Arrivée du sujet au carrefour

Si l'on se place dans les scénarii que nous avons implantés, pour lesquels la vitesse des véhicules circulant à contresens est de 50 km/h, nous pouvons définir les cas où le conducteur va entrer dans les zones enveloppes du véhicule noir permettant au sujet de passer.

La figure 68 nous présente les quatre cas possibles : 68(a) le conducteur passe sans rencontrer de conflit, 68(b) le sujet rencontre la zone verte du véhicule noir, 68(c) le sujet rencontre sa zone orange, 68(d) le sujet rencontre sa zone rouge.

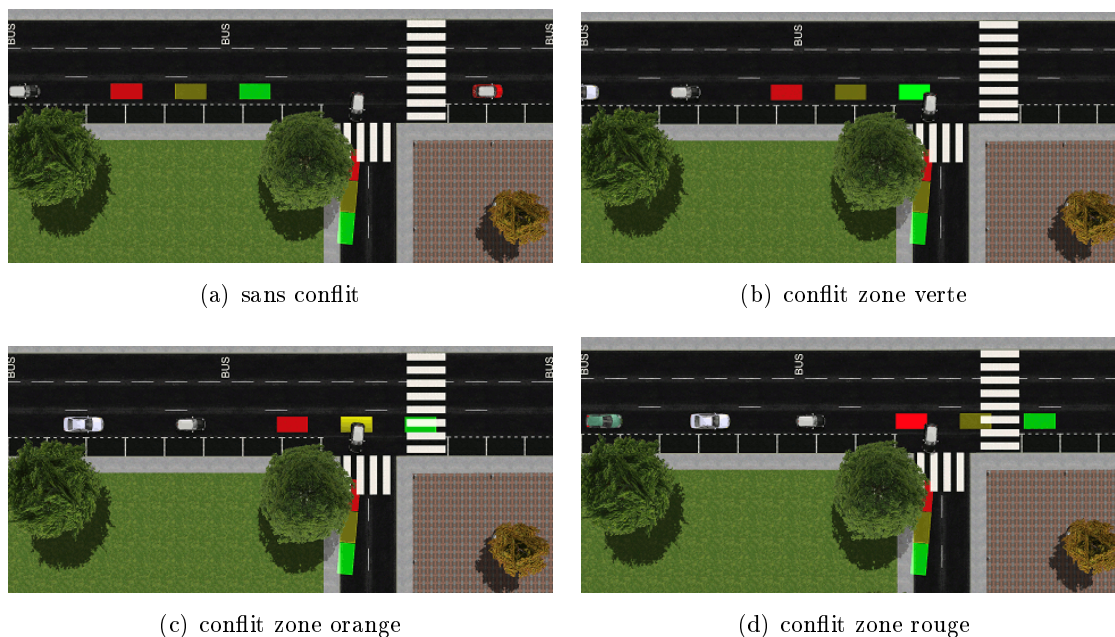


FIGURE 68 – Rencontre entre les zones enveloppes du véhicule du trafic inverse et le véhicule du sujet

Les zones enveloppes verte, orange et rouge s'étirent respectivement jusqu'à 1,8 ; 1,2 et 0,6 seconde, comme nous l'avons défini à la section 3.4. Par ailleurs, afin de déterminer les vitesses minimales et maximales de réalisation d'un TàG dans le carrefour utilisées pour l'expérimentation, nous avons demandé (lors d'une pré-expérimentation) à cinq conducteurs de réaliser cette manœuvre en allant successivement « le plus vite possible », puis « à la vitesse minimale » et enfin « à vitesse moyenne ». Grâce à cela, nous avons déterminé que la vitesse minimale de réalisation du TàG est en moyenne de 15 km/h (une vitesse légèrement au dessus de la vitesse de course de fond), la vitesse maximale est en moyenne de 40 km/h, et la vitesse moyenne est en moyenne de 25 km/h. De plus, nous faisons ici l'hypothèse que le conducteur débutera son TàG alors que la voiture rouge arrivera à sa hauteur, puis qu'il traversera ensuite la voie opposée avant de quitter le carrefour, selon différentes trajectoires plus ou moins longues. Avec une largeur de voie L égale à 3,5 m (mesurée sur le simulateur), nous avons déterminé, grâce à la figure 69, que pour traverser ce carrefour, la distance à parcourir est nécessairement supérieure à 7,42 m ($D_m = \sqrt{9/2}L$) et inférieure à 10,5 m ($D_M = 3L$), avec une moyenne de 8,96 m.

Les distances calculées constituent des bornes inférieure et supérieure des distances à parcourir par les futurs sujets lors de la manœuvre de TàG par inégalité triangulaire. Ainsi, avec les valeurs

5.4. Expérimentation 3 : Simulation numérique du processus de prise de décision

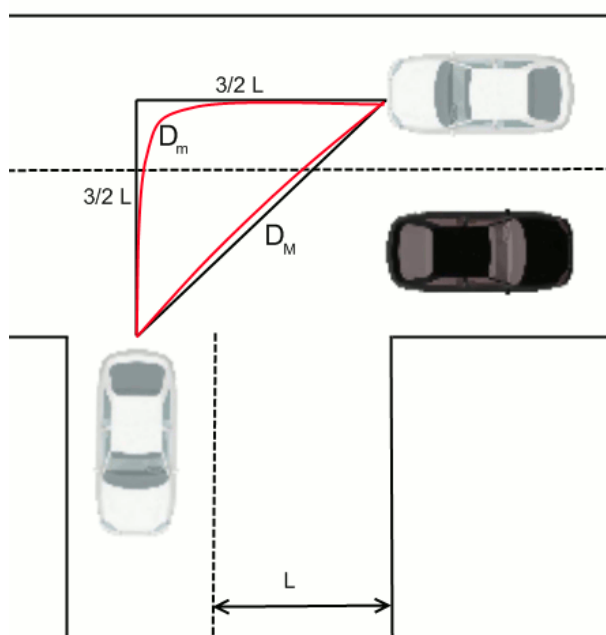


FIGURE 69 – Distances théoriques minimales et maximales à parcourir pendant le TàG

de vitesses et les bornes de distances à parcourir, nous pouvons calculer les différentes valeurs de « Temps nécessaire pour réaliser le TàG » dans notre carrefour. Ces valeurs sont présentées dans le tableau 9.

	D_{\min}	D_{Moy}	D_{MAX}
$V_{\min} = 15\text{km/h}$	1,78 s	2,15	2,52 s
$V_1 = 20\text{km/h}$	1,33 s	1,61	1,89 s
$V_{\text{Moy}} = 25\text{km/h}$	1,06 s	1,30	1,51 s
$V_2 = 30\text{km/h}$	0,89 s	1,06	1,26 s
$V_{\text{MAX}} = 40\text{km/h}$	0,67 s	0,81	0,94 s

TABEAU 9 – Temps nécessaires au passage d'un carrefour

Grâce à cela, nous pouvons postuler qu'un conducteur devrait mettre au minimum 0,70 s, au maximum 2,40 s et en moyenne 1,30 s pour effectuer intégralement sa manœuvre de TàG (car les trajectoires à angle droit présentées dans la figure 69 ne seront pas utilisables par un véhicule).

En considérant le temps maximal pour réaliser le TàG, nous pouvons déduire que le participant entrera en conflit avec la zone verte du « véhicule noir » si le TIV (entre les véhicules « rouge » et « noir ») est inférieur à 4,20 s ($2,40 + 1,80 = 4,20$ s). Pour le temps de réalisation minimal du TàG, le participant se trouvera dans la même situation si le TIV est inférieur à 2,50 s. Ainsi, nous pouvons déterminer un tableau associant les temps minimaux et maximaux de réalisation du TàG avec les TIV (entre les véhicules « rouge » et « noir »), permettant ainsi de définir quelle zone enveloppe du « véhicule noir » le participant va traverser.

C'est à partir de cette analyse et de la théorie des zones enveloppes que nous avons défini les valeurs des TIV inter-véhicules « rouge » et « noir » à utiliser dans nos différents scénari

expérimentaux. Un TIV de 0,6 s ne pourra pas être réalisé sans provoquer un accident, quelles que soit la trajectoire et la vitesse du participant. A l'autre extrémité (basée sur les valeurs de vitesse minimale collectée durant notre pré-expérimentation), aucun conflit de zones enveloppes ne devrait se produire pour un TIV supérieur ou égal à 5 secondes (par sécurité, un scénario avec un TIV de 6 s a néanmoins été aussi utilisé). Les valeurs de TIV intermédiaires (respectivement de 1.2, 1.8, 2.3, 2.6, 3.0, 3.3, 3.6 et 4.0 secondes) généreront quant à elles des conflits plus ou moins critiques, selon la vitesse et la trajectoire du participant.

TIV	conflit de ZE avec T_{\min}	conflit de ZE avec T_{Moy}	conflit de ZE avec T_{MAX}
0,6	Accident	Accident	Accident
1,2	Rouge-Rouge	Accident	Accident
1,8	Rouge-Orange	Rouge-Rouge	Accident
2,3	Rouge-Verte	Rouge-Orange	Accident
2,6	Rouge-Aucun	Rouge-Verte	Rouge-Rouge
3,0	Rouge-Aucun	Rouge-Verte	Rouge-Orange
3,3	Aucun	Aucun	Rouge-Orange
3,6	Aucun	Aucun	Rouge-Verte
4,0	Aucun	Aucun	Rouge-Verte
5,0	Aucun	Aucun	Aucun
6,0	Aucun	Aucun	Aucun

TABLEAU 10 – Prévission de la dernière zone enveloppe rencontrée par le conducteur

Au regard de la matrice des risques associés aux conflits de zones enveloppes, reprise à la figure 70, nous pouvons dire (1) que si le participant entre dans la zone rouge du « véhicule noir », alors le risque de collision devrait être jugé par le sujet comme considérable (il ne devrait donc jamais engager de TàG), (2) que s'il traverse la zone orange, alors le risque sera très important (et le TàG comme extrêmement critique), (3) et que s'il rencontre la zone verte, le risque sera perçu comme plus modéré, mais la TàG présentera malgré tout un risque non négligeable.

		Autre usager		
		Verte	Orange	Rouge
Véhicule sujet	Verte	Risque important	Risque notable	Risque modéré
	Orange	Risque notable	Risque très important	Risque très important
	Rouge	Risque modéré	Risque très important	Risque considérable

FIGURE 70 – Matrice des risques relatifs aux conflits de zones enveloppes

C - Formulation des hypothèses opérationnelles :

Le tableau 10 et la matrice des risques associés aux conflits de zones enveloppes nous permettent ainsi de formuler les cinq hypothèses opérationnelles suivantes :

5.4. Expérimentation 3 : Simulation numérique du processus de prise de décision

1. Aucun conducteur (sauf erreur d'analyse) ne devrait traverser le carrefour si le TIV est de 0,6 s (car cela entraînera toujours un accident).
2. Très peu de conducteurs devraient engager délibérément un TàG pour les TIV de 1,2 et 1,8 s (forte probabilité de conflits « Rouge-Rouge » et d'Accident), et ces manœuvres devraient être évaluées par les participants comme extrêmement critiques.
3. Les valeurs de TIV comprises entre 2,3 et 3 secondes peuvent permettre de réaliser le TàG (modulo un risque élevé de conflits « Rouge-Vert » ou « Rouge-Orange »), mais cette manœuvre devrait alors être jugée comme très critique et ne devrait en pratique s'observer que chez des participants ayant un style de conduite particulièrement « sportif », voire « agressif ».
4. Un nombre important de conducteurs devrait décider d'engager leur TàG pour des TIV compris entre 3,3 et 4 secondes (car excepté pour T_{MAX} , il n'y a aucun conflit de zones enveloppes), et ils devraient juger cette manœuvre peu critique.
5. Tous les conducteurs devraient traverser le carrefour dans les situations où le TIV sera de 5 et 6 secondes, et ils devraient juger dans ce cas la manœuvre de TàG non critique.

5.4.5 Présentation des résultats

Vingt-trois conducteurs ont participé à cette expérimentation, représentant un total de 506 situations de TàG. Dix situations ont été perdues (bogue de la plateforme de simulation dans trois cas, erreur des participants dans sept cas). Nos analyses porteront donc sur 496 situations, intégrant 259 manœuvres de TàG.

Parmi les données collectées, nous allons analyser ici le nombre de TàG engagés pour chaque créneau de TIV, en essayant de vérifier les différentes hypothèses opérationnelles que nous avons formulées précédemment.

Dans un second temps, nous nous intéresserons aux données subjectives, et notamment aux jugements de criticité concernant le TàG, que nous avons aussi intégrés dans ces hypothèses opérationnelles.

Enfin, nous nous lancerons dans des analyses plus approfondies en fonction des différentes stratégies de TàG adoptées par les participants.

A - Analyse préalable concernant l'effet d'ordre :

Avant de débiter ces analyses, il convient de vérifier que l'ordre de réalisation des TàG n'impactait pas les décisions des sujets. Pour cela, nous avons d'abord défini le pourcentage de TàG effectif des participants en fonction de chaque TIV, dans chacun des deux groupes (chaque groupe ayant passé les scénarii de l'expérimentation dans un ordre différent ; cf.5.4.2). Puis nous avons effectué un test non paramétrique sur deux échantillons liés avec le test de Wilcoxon, pour voir si les deux groupes de moyennes étaient significativement différents. Nous obtenons par ce test les résultats $W_s^*(11) = -0,764$, $p = 0,445$. Il est donc possible de dire que la différence des moyennes entre les deux groupes n'est pas significative, et que nous pouvons par conséquent regrouper toutes nos données pour continuer nos analyses statistiques.

B - Pourcentage de TàG en fonction du TIV :

Nous débuterons nos analyses par l'examen des pourcentages de TàG engagés en fonction du TIV entre le véhicule « rouge » et le véhicule « noir ». Ces pourcentages sont présentés dans le graphique suivant (figure 71) :

TIV	% pas- sage
0,6	0
1,2	4,44
1,8	15,56
2,3	31,11
2,6	41,3
3	54,76
3,3	77,78
3,6	75,56
4	80,43
5	93,48
6	97,83

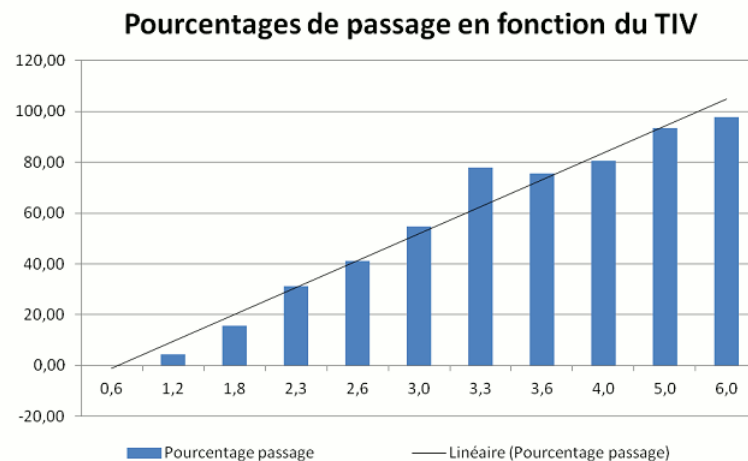


FIGURE 71 – Pourcentages de TàG effectifs en fonction du TIV

Sur le graphique, nous remarquons que plus le TIV augmente, plus le pourcentage de TàG engagés par nos participants est élevé. Pour analyser plus en profondeur ces données, une régression linéaire a été effectuée. Le test de régression linéaire sur le pourcentage de TàG en fonction des TIV nous définit $F(1, 9) = 93,341$, $p < 0,001$ et Détermination (R^2) ajusté = 0,902, ce qui signifie que la courbe des moyennes est très proche d'une fonction linéaire. Il y a donc un lien statistique entre le TIV proposé et l'engagement de la manœuvre de TàG par les participants. Nous pouvons aussi constater qu'il n'y a aucun passage avec un TIV de 0,6 s. Nous pouvons aussi remarquer que la plupart des participants ont engagé leur TàG pour le TIV de 6 secondes (un seul passage manque ici, qui est un très cas particulier, car le sujet ne passant pas le premier TIV de 6 secondes a accepté les deux TIV de 4 et 5 secondes et le second TIV de 6 secondes). Ces résultats confirment par conséquent deux de nos hypothèses opérationnelles (la première et la dernière).

Par ailleurs, nous remarquons aussi une « marche » dans les valeurs de pourcentage de TàG entre les TIV de 3 et 3,3 secondes. Nous pouvons remarquer que cette soudaine augmentation du nombre de TàG engagés par les sujets correspond aux valeurs de TIV pour lesquelles, dans notre tableau 10 utilisé pour construire nos hypothèses, la colonne « ZE rencontrée avec T_{Moy} » indique qu'il n'y a plus de conflit entre le véhicule du participant et la zone verte du véhicule noir.

De même, une seconde « marche » apparaît dans le graphique concernant le pourcentage de décision de TàG entre 4 et 5 secondes, correspondant ici aux situations (cf. colonne « ZE rencontrée avec T_{MAX} » du tableau 10) pour lesquelles les participants les plus lents pour réaliser leur TàG ne rencontrent plus de conflit avec la zone verte du véhicule noir.

Au final, le pourcentage de TàG dépasse les 75 % à partir d'un TIV de 3,3 secondes, 93 % à 5,0 secondes, et 97,8 % à 6 secondes de TIV. Cela signifie que trois personnes sur quatre prennent

5.4. Expérimentation 3 : Simulation numérique du processus de prise de décision

la décision d'engager la manœuvre de TàG lorsque le TIV dépasse les 3 secondes (à 50 km/h, 3 s = 41,6 m). Ces résultats confirment donc bien nos prédictions concernant le nombre de TàG, formulées dans nos hypothèses opérationnelles 2, 3 et 4.

C - Evaluations subjectives de la criticité des manœuvres de TàG :

Si l'on considère les jugements de criticité concernant la manœuvre de TàG (0 correspondant à une situation jugée pas du tout critique et 100 à une situation jugée extrêmement critique), nous obtenons les moyennes suivantes (fig.72).

TIV	moyenne criticité
0,6	96,13
1,2	87,58
1,8	83,84
2,3	74,02
2,6	64,89
3	60,98
3,3	48,29
3,6	43,49
4	36,24
5	20
6	10,63

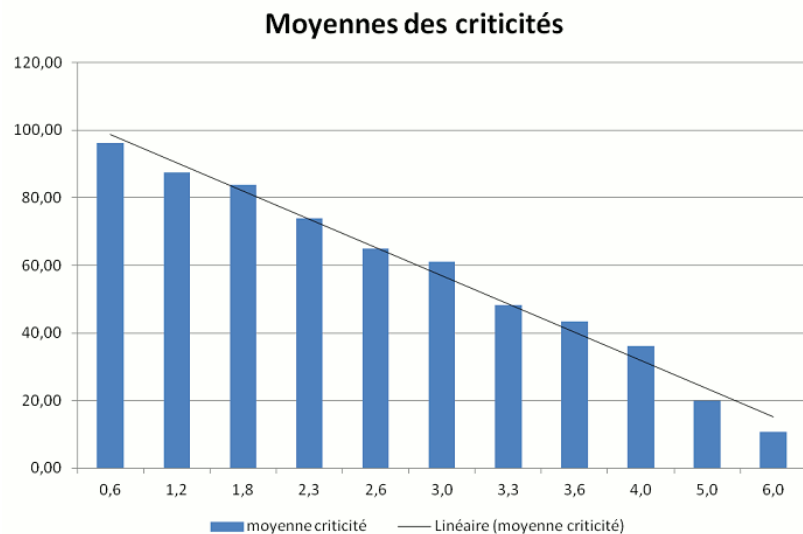


FIGURE 72 – Moyennes des criticités associées à un TIV

Nous pouvons remarquer que plus le TIV augmente, et plus la criticité associée par les participants à la manœuvre de TàG diminue. La linéarité de la diminution de ce jugement de criticité est visible, et le tableau de corrélation de Pearson, présenté ci-dessous (tableau 11), permet d'attester que la moyenne des TàG engagés est corrélée négativement à la moyenne des jugements de criticité ($r(11) = -0,976(p < 0,01)$).

		Moyenne pas- sage	Moyenne criti- cité	Moyenne pas- sage si réel	Moyenne pas- sage autrui
Moyenne passage	Corrélation de Pearson Sig. (bilatérale) N	1 11	-,976** 0 11	,964** 0 11	,972** 0 11
Moyenne criticité	Corrélation de Pearson Sig. (bilatérale) N	-,976** 0 11	1 11	-,997** 0 11	-,999** 0 11
Moyenne passage si réel	Corrélation de Pearson Sig. (bilatérale) N	,964** 0 11	-,997** 0 11	1 11	,998** 0 11
Moyenne passage autrui	Corrélation de Pearson Sig. (bilatérale) N	,972** 0 11	-,999** 0 11	,998** 0 11	1 11

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

TABLEAU 11 – Corrélation de Pearson

Il y a donc un lien étroit entre les jugements de criticité des sujets et le nombre de TàG effectivement engagés : plus la manœuvre de TàG est jugée critique, et plus le nombre de participants décidant de ne pas l'engager augmente. Ce résultat confirme nos hypothèses opérationnelles initiales.

La confirmation de nos hypothèses est également renforcée à un niveau d'analyse plus fine. Ainsi, le graphique permet de constater des « sauts » plus importants entre certains intervalles de TIV. C'est notamment le cas entre 1,8 s et 2,3 s, entre 2,3 s et 2,6 s, entre 3 s et 3,3 s, et enfin entre 4 s et 5 s. Si nous considérons le tableau 10 à partir duquel nous avons élaboré nos hypothèses, nous pouvons remarquer que :

1. Le premier saut correspond au passage d'un conflit de zones enveloppes de type « Rouge-Orange » (« véhicule-sujet » versus « véhicule noir ») à « Rouge-Vert » pour T_{\min} , ou au passage d'un conflit de type « Rouge-Rouge » à « Rouge-Orange » pour T_{Moy}
2. Le second saut correspond au passage d'un conflit « Rouge-Vert » à l'absence de conflit pour T_{\min} , ou au passage d'un conflit « Rouge-Orange » à « Rouge-Vert » pour T_{Moy}
3. Le troisième saut correspond à un passage d'un conflit « Rouge-Vert » à aucun conflit pour T_{Moy}
4. Le quatrième saut correspond aux situations pour lesquelles plus aucun conflit de zones n'est rencontré par les conducteurs durant le TàG, quel que soit le temps de passage nécessaire au sujet pour réaliser son TàG (et donc indépendamment de la vitesse et de la trajectoire adoptée)

D - Evaluation de la faisabilité du TàG sur route réelle :

Dans cette section, nous allons considérer les réponses des participants concernant les deux questions d'évaluation subjective et dont l'objectif était de nous renseigner sur la vraisemblance de la décision de nos participants sur simulateur par rapport à leur pratique réelle de conduite (Question : « Sur route réelle, seriez-vous passés ? ») et sur la possibilité qu'une manœuvre de ce type soit engagée par les autres conducteurs, sur route ouverte (Question : « Sur route réelle, pensez-vous que certains conducteurs seraient passés ? »).

La figure 73 montre que la moyenne des passages potentiels si la situation se présentait sur la route réelle, augmente avec l'augmentation du TIV. Le tableau des corrélations de Pearson (tableau 11) nous indique également une forte corrélation de ce jugement $r(11) = 0,964(p < 0,01)$ avec le pourcentage de passage effectif. Cela signifie qu'il y a bien une corrélation entre la décision de faire le TàG sur simulateur et la décision d'engager cette manœuvre dans le réel.

Ce résultat est important, car il permet de considérer que le processus de décision, tel que nous l'avons observé sur simulateur et tel que nous l'avons modélisé au préalable à travers notre modèle de simulation numérique est réaliste, du point de vue des participants, par rapport à leurs propres décisions en conditions réelles de conduite.

TIV	moyenne passage si réel
0,6	0,8
1,2	5,8
1,8	7,98
2,3	17,24
2,6	30,78
3	32,9
3,3	46,11
3,6	50,18
4	57,52
5	81,07
6	88,57

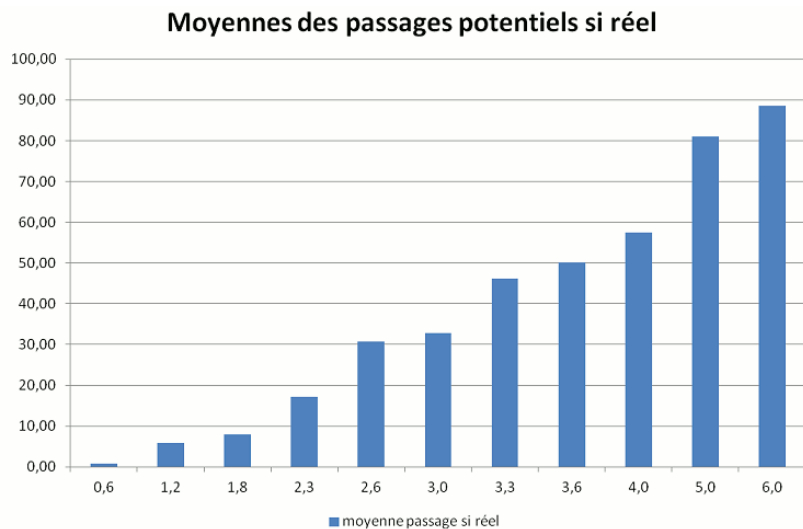


FIGURE 73 – Moyennes des passages potentiels si situation réelle

Enfin, le dernier graphique (fig.74) présente les moyennes des résultats à la dernière question, permettant au sujet d'exprimer son point de vue quant aux comportements des autres conducteurs pour une situation comparable. Là encore, le tableau 11 indique une corrélation négative entre l'estimation du nombre de TàG engagé par autrui et la criticité de cette manœuvre, mais également une corrélation entre les décisions des participants d'engager cette manœuvre et celles des autres conducteurs.

TIV	Moyenne passage d'autrui
0,6	2,31
1,2	7,64
1,8	12,56
2,3	21,58
2,6	35,33
3	38,31
3,3	47,69
3,6	55,18
4	62,3
5	80,09
6	89,22

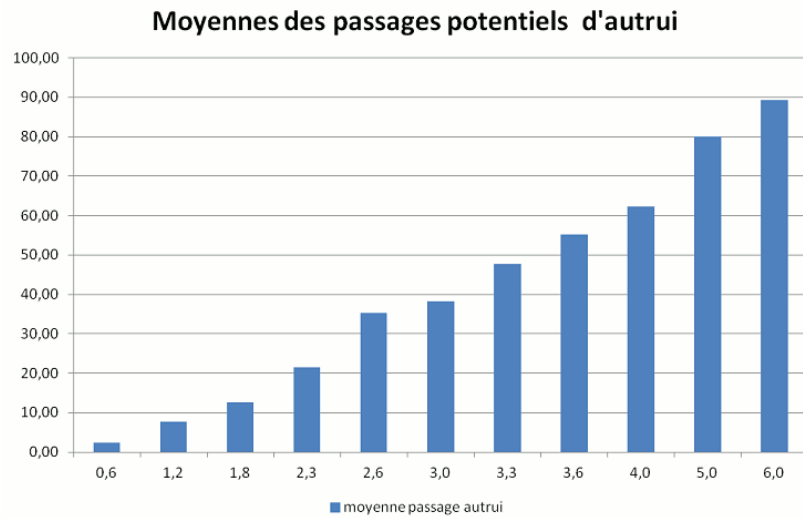


FIGURE 74 – Moyennes des passages potentiels d'autrui si situation réelle

E - Analyse des passages effectifs au tourne-à-gauche :

Nous allons nous focaliser à présent sur les situations où le participant a effectivement décidé d'engager un TàG (soit 259 cas sur les 496 situations collectées). Pour ces analyses, nous sommes tout d'abord attachés à observer la distance minimale entre le véhicule du sujet et le véhicule noir, au moment où le véhicule du participant traversait la voie du véhicule noir. Nous supposons que la distance entre le véhicule du sujet et le véhicule noir va augmenter avec le TIV.

Nous remarquerons sur la figure 75 qu'aucune valeur n'est présente pour le TIV 0,6 s. Cela s'explique par le fait qu'aucun participant n'a engagé de TàG pour un TIV aussi faible. Une régression linéaire nous donne un résultat $F(1, 9) = 991, 938(p < 0, 01)$ et $R^2 = 0, 991$, ce qui signifie que la différence entre les moyennes est significative et donc que nous pouvons continuer notre investigation.

TIV	Moyenne dist. min. véhi. noir (en m)
1,2	6,18
1,8	9,92
2,3	14,43
2,6	17,32
3	20,31
3,3	21,59
3,6	25,67
4	30,65
5	41,24
6	49,96

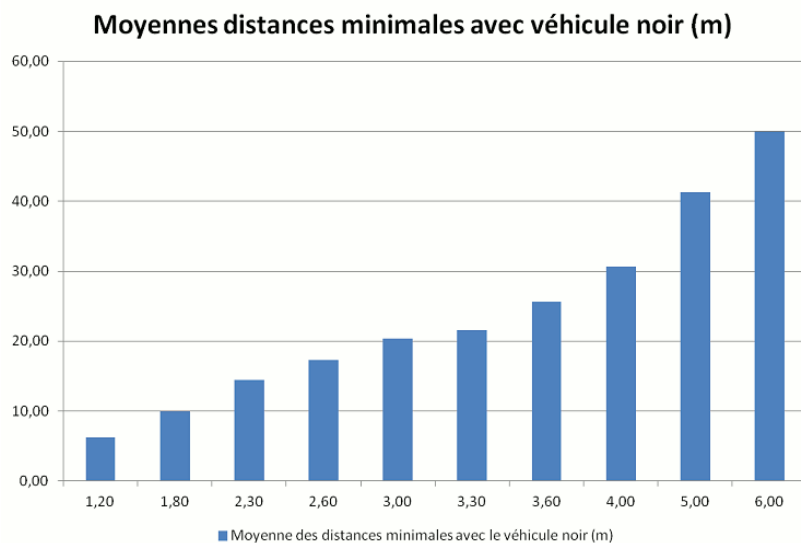


FIGURE 75 – Moyennes des distances minimales avec le véhicule noir

5.4. Expérimentation 3 : Simulation numérique du processus de prise de décision

Nous avons ensuite calculé l'équivalence de la distance moyenne ci-dessus en TIV, pour connaître le temps séparant le véhicule du sujet avec le véhicule noir (tab. 12).

TIV	Moyenne dist. Min. avec véhicule noir (en m)	équivalent TIV avec Véhicule noir (en s)
1,2	6,18	0,45
1,8	9,92	0,71
2,3	14,43	1,04
2,6	17,32	1,25
3	20,31	1,46
3,3	21,59	1,55
3,6	25,67	1,85
4	30,65	2,21
5	41,24	2,97
6	49,96	3,6

TABLEAU 12 – Equivalence des distances en TIV à 50 km/h

La zone verte (zone de confort) est positionnée entre 1,2 et 1,8 s en avant du véhicule, la zone orange (zone de menace) est positionnée entre 0,6 et 1,2 seconde, et la zone rouge (zone de danger) est positionnée entre 0 (sous le véhicule) et 0,6 seconde. Comme nous l'avons vu, ces zones sont projetées mentalement par le conducteur autour de son propre véhicule, mais il les projette aussi sur les autres véhicules avec lesquels il est en interaction. Si une zone enveloppe du « véhicule-sujet » rencontre la zone enveloppe d'un autre véhicule, cela signifie un conflit plus ou moins important que nous avons défini grâce à la matrice de conflits (cf.fig.70).

Grâce aux résultats du tableau 12, nous pouvons déterminer dans quelle zone enveloppe du « véhicule noir » se trouve le « véhicule-sujet » au moment où ces deux véhicules sont les plus proches⁸ et mettre en parallèle ce paramètre avec le pourcentage de TàG effectif.

Le traitement des données expérimentales concernant les performances de conduite de nos sujets nous a permis d'obtenir ces valeurs de conflit, que nous pouvons alors comparer avec le tableau 10, initialement utilisé pour générer nos hypothèses. Si l'on met en parallèle ce tableau 10 (pour une vitesse moyenne) avec le tableau 13, nous obtenons ainsi le tableau suivant (tab.14) :

Dans ce tableau, nous pouvons remarquer que pour les TIV 1,2 et 1,8 s (où le nombre de TàG effectivement engagés a été très faible) la zone enveloppe du véhicule noir traversée par le véhicule-sujet est identique à celle que nous avons prévue pour les sujets réalisant le TàG « avec la vitesse maximale » (i.e. T_{\min}). Pour les TIV compris entre 2,3 s et 3 s, la zone enveloppe traversée est identique à celle prévue pour les sujets réalisant le TàG avec une « vitesse moyenne »

⁸Dans les situations où le véhicule-sujet a réalisé son TàG, le moment où les deux véhicules sont les plus proches est toujours celui où le véhicule-sujet s'apprête à sortir du carrefour et où sa trajectoire est perpendiculaire à celle du véhicule noir. La dimension des trois zones enveloppes étant stable et identique au niveau latéral, cela signifiera que pour toutes les situations considérées ici, les conflits impliquent systématiquement la zone « rouge » du véhicule sujet

TIV	Conflit de ZE engendré (Sujet-Véhicule noir)	Pourcentage passage
1,2	Rouge-Rouge	4,44
1,8	Rouge-Orange	15,56
2,3	Rouge-Orange	31,11
2,6	Rouge-Verte	41,3
3	Rouge-Verte	54,76
3,3	Rouge-Verte	77,78
3,6	Aucun	75,56
4	Aucun	80,43
5	Aucun	93,48
6	Aucun	97,83

TABLEAU 13 – Comparaison de la zone enveloppe traversée par le véhicule-sujet et du pourcentage de passage effectif

TIV	Conflit de ZE prévue T_{\min}	Conflit de ZE prévue T_{Moy}	Conflit de ZE prévue T_{MAX}	Conflit de ZE effectif
0,6	Accident	Accident	Accident	—
1,2	Rouge-Rouge	Accident	Accident	Rouge-Rouge
1,8	Rouge-Orange	Rouge-Rouge	Accident	Rouge-Orange
2,3	Rouge-Verte	Rouge-Orange	Accident	Rouge-Orange
2,6	Aucun	Rouge-Verte	Rouge-Rouge	Rouge-Verte
3,0	Aucun	Rouge-Verte	Rouge-Orange	Rouge-Verte
3,3	Aucun	Aucun	Rouge-Orange	Rouge-Verte
3,6	Aucun	Aucun	Rouge-Verte	
4,0	Aucun	Aucun	Rouge-Verte	
5,0	Aucun	Aucun	Aucun	
6,0	Aucun	Aucun	Aucun	

TABLEAU 14 – Comparaison entre la prévision de conflits et les conflits effectivement rencontrés lors du TàG

(i.e. T_{Moy}). Enfin, pour le TIV de 3,3 s, la zone enveloppe traversée correspond à une valeur de vitesse de TàG comprise entre notre T_{Moy} et notre T_{MAX} .

5.4.6 Discussion

Cette dernière expérimentation, dont les hypothèses opérationnelles ont été directement formulées grâce à la simulation numérique de la cognition du conducteur automobile, nous a permis de confirmer en partie la théorie des zones enveloppes pour modéliser et simuler la prise de décision d'un conducteur devant s'engager dans une manœuvre de TàG en carrefour urbain.

Grâce aux résultats obtenus, nous avons pu faire la comparaison entre les conflits de zones enveloppes définis par la figure 70 et le pourcentage de sujets ayant effectivement engagé une manœuvre de TàG dans le carrefour. Les traitements statistiques que nous avons réalisés sur ces données expérimentales ont clairement montré que plus les conflits de zones enveloppes étaient

5.4. Expérimentation 3 : Simulation numérique du processus de prise de décision

critiques, et moins les participants se décidaient à engager une telle manœuvre. Par ailleurs, il apparaît aussi que si un TàG est engagé malgré un conflit avec les zones enveloppes d'un autre véhicule, cette manœuvre sera jugée d'autant plus critique que le conflit est proximal.

Au-delà de ces analyses, ces résultats ont aussi permis de valider l'ensemble des hypothèses opérationnelles que nous avons formulées grâce à notre modèle de simulation numérique du conducteur, développé informatiquement à partir du modèle théorique **COSMODRIVE**. En conséquence, nous pouvons admettre que ces résultats nous permettent de valider, du moins pour les décisions de TàG investiguées dans le cadre des situations de conduite considérées, à la fois la théorie générale de **COSMODRIVE**, postulant une prise de décision du conducteur basée sur un déploiement cognitif et sur l'analyse de conflits inter zones enveloppes, et l'implémentation que nous en avons faite à travers notre modèle de simulation numérique (modulo une assistance manuelle encore nécessaire, pour la version actuelle).

Enfin, les données collectées durant cette expérimentation n'ont été que partiellement exploitées. Elles pourront par exemple être utilisées pour l'analyse des stratégies d'approche et de réalisation des manœuvres de TàG, via la recherche de patterns de freinage lors de l'arrivée au TàG et de patterns d'accélération pour redémarrer, mais aussi pour l'analyse des vitesses et des trajectoires adoptées pour réaliser la manœuvre de TàG en fonction du **TIV** et des risques pris. Nous avons enregistré la dynamique du véhicule, et nous avons aussi utilisé un oculomètre afin de compléter notre base de données relative à l'attention visuelle. Ces données pourront être utilisées par la suite pour améliorer les stratégies d'exploration visuelle du modèle lors du passage d'un tourne-à-gauche. En effet, grâce à notre synchronisation des données, nous pourrons analyser conjointement les données du véhicule et les données oculométriques, et améliorer ainsi la localisation et le déroulement des balayages visuels de notre modèle.

Conclusion

Tout au long de cet ouvrage, nous avons décrit notre démarche de conception et de développement d'un modèle de simulation cognitive du conducteur automobile, que nous avons ensuite implémenté informatiquement sur une plateforme de simulation numérique afin de pouvoir investiguer la cognition humaine en situation dynamique.

Après avoir insisté sur certaines caractéristiques essentielles de l'activité de conduite automobile dans le chapitre 1, nous avons défini les enjeux épistémologiques de la thèse en matière de modélisation de l'activité mentale du conducteur et de simulation des processus cognitifs humains. Le chapitre 2 nous a permis de présenter et de discuter différents modèles du conducteur disponibles dans la littérature, dont nous avons alors souligné certaines limites, avant de présenter de façon détaillée le modèle COSMODRIVE⁹ sur lequel repose notre démarche de modélisation. Dans le chapitre 3, nous avons adopté un point de vue plus computationnel de la cognition humaine, afin de proposer des « spécifications cognitives » pour la simulation numérique de la conduite et du conducteur. Le chapitre 4 nous a permis de décrire, quant à lui, les développements informatiques que nous avons réalisés pour implémenter le modèle COSMODRIVE sur la plateforme de simulation virtuelle SiVIC¹⁰. Sur la base des premiers résultats de simulations numériques auxquels ce travail de thèse a permis d'aboutir, nous avons alors, dans le chapitre 5, abordé la question de la mise en œuvre et de l'utilisation de la simulation informatique comme un outil d'investigation scientifique de la cognition humaine en situation dynamique. Les résultats collectés dans le cadre de trois expérimentations, dont les hypothèses ont été en partie formulées grâce à la simulation numérique, nous ont ainsi permis de montrer l'apport de cette démarche pour la prédiction et l'explicitation des performances humaines et, au-delà, de démontrer le bien-fondé du recours à la simulation numérique pour étudier la cognition naturelle.

A cet égard, notre démarche de simulation informatique du conducteur automobile ouvre des perspectives novatrices pour l'investigation de l'activité mentale du conducteur car, grâce à l'implémentation du modèle COSMODRIVE, il devient désormais possible d'observer des simulations de phénomènes internes qui ne sont pas directement observables avec l'approche expérimentale classiquement utilisée en science. Par la simulation informatique, il devient possible « d'incarner numériquement » des théories cognitives et de les « opérationnaliser » pour formuler des hypothèses de recherche sous la forme de prédictions de performances que l'on pourra évaluer empiriquement auprès de conducteurs humains. La simulation numérique peut alors devenir une méthode d'investigation scientifique à part entière pour la recherche en sciences de la cognition, permettant d'évaluer et de valider des théories cognitives, à côté de la démarche expérimentale.

D'une façon très concrète, le modèle informatique du conducteur automobile que nous avons développé durant cette thèse et implanté sur une plateforme de simulation est capable de percevoir la scène routière au moyen d'un « œil virtuel » et de se représenter la situation de conduite afin de progresser dynamiquement dans un environnement routier tridimensionnel tout en interagissant avec d'autres véhicules. Du point de vue cognitif, la simulation numérique a été

⁹Cognitive Simulation Model of the DRIVER

¹⁰Simulateur Vehicule-Infrastructure-Capteur

utilisée pour modéliser dynamiquement le « cycle » de prise et de traitement de l'information perceptive déployé par le conducteur humain, en articulation avec ses représentations mentales tactiques, correspondant à sa « conscience de la situation » ([Endsley, 1995], [Bailly, 2004]). Nous avons ainsi pu simuler les stratégies d'exploration cognitivo-perceptive de l'environnement et les processus d'intégration perceptivo-cognitive de l'information extraite dans la scène routière, permettant ainsi au modèle d'élaborer et de mettre à jour régulièrement ses représentations mentales, implémentées sous la forme de « schémas de conduite » instanciés au réel. À partir de ses représentations mentales visuo-spatiales, correspondant à la situation de conduite telle qu'elle a été perçue et comprise par le modèle, celui-ci va pouvoir se projeter dans l'avenir afin d'anticiper des événements et/ou des évolutions de la situation courante en fonction de comportements de conduite alternatifs susceptibles d'être mis en œuvre à un moment donné. Ce processus d'anticipation, reposant sur un « déploiement cognitif » fondé sur la théorie des zones enveloppes et sur une analyse matricielle des risques de conflits de trajectoires inter-véhiculaires, sert de support au processus de prise de décision dans l'approche COSMODRIVE ([Bellet et al., 2009]). Grâce à la modélisation que nous avons pu réaliser de cet ensemble complexe de processus perceptifs et cognitifs, il nous a été possible de générer des simulations numériques permettant de prédire certaines décisions humaines et de mieux comprendre les performances de conducteurs engagés dans une tâche complexe de Tourne-à-Gauche en intersection urbaine.

Les résultats que nous avons obtenus à ce niveau nous paraissent novateurs en comparaison des modèles de simulation cognitive du conducteur disponibles dans la littérature, et notamment par rapport aux modèles les plus avancés dans leur implémentation informatique, comme IDM¹¹ de [Salvucci, 2006], basé sur l'architecture cognitive ACT-R¹², ou DRIVER de [Wierda et al., 1992], basé sur SOAR¹³ : ces modèles ne permettent pas d'appréhender la nature visuo-spatiale des représentations mentales, celles-ci étant modélisées sous la forme de règles propositionnelles qui nous paraissent peu appropriées pour rendre compte de la cognition d'un conducteur automobile. Dans notre modèle, la simulation informatique permet non seulement de construire de telles représentations que le modèle utilise pour prendre ses décisions et planifier ses comportements, mais il devient aussi possible de visualiser « en temps réel » ces représentations internes, afin de voir ce que le modèle a perçu puis intégré cognitivement de la situation de conduite. Il est aussi possible d'appréhender la cognition de façon dynamique en simulant les processus de traitement et de manipulation de ces représentations par le système cognitif pour explorer activement l'environnement, prendre des décisions, anticiper des changements situationnels, planifier des actions, ou réguler l'activité de conduite dans un environnement routier en perpétuelle évolution.

Les développements computationnels et l'implémentation informatique du modèle COSMODRIVE que nous avons réalisés durant cette thèse sur la plateforme virtuelle SiVIC ont permis d'opérationnaliser ce modèle afin de pouvoir utiliser la simulation numérique pour l'analyse de la conduite automobile et la modélisation de la cognition du conducteur. Il va de soi que le développement informatique du modèle est encore loin d'être achevé : de nombreux processus perceptifs et cognitifs ne sont pas encore implémentés dans la version actuelle du modèle, il est donc nécessaire de poursuivre les efforts de modélisation computationnelle et d'implémentation pour pouvoir appréhender plus complètement la cognition du conducteur automobile. Pour

¹¹Integrated Driver Model

¹²Adaptive Control of Thought-Rational

¹³State, Operator And Result

poursuivre ces développements, il faudra notamment implanter un processus d’instanciation automatique des schémas de conduite, reposant sur la détection de « points remarquables » dans l’environnement routier et sur l’utilisation de cartes auto-adaptatives permettant d’apparier un schéma avec la réalité objective. Il sera aussi nécessaire d’optimiser et de poursuivre les développements réalisés en matière d’utilisation des représentations mentales afin de permettre au modèle de réaliser de façon totalement autonome des déploiements cognitifs pour générer des représentations anticipées lui permettant de prendre des décisions complexes. La poursuite de ces efforts de développement nécessitera aussi de réaliser des expérimentations auprès de conducteurs humains : il faudra obtenir de nouvelles données pour améliorer notre module de perception et collecter des mesures oculométriques concernant les stratégies visuelles déployées durant l’activité de conduite. Il conviendra enfin de complexifier le module d’exécution d’actions, encore rudimentaire à ce jour, en analysant les données que nous avons déjà collectées, ou en réalisant de nouvelles expérimentations sur notre simulateur SiVIC, afin d’identifier des patterns d’utilisation des commandes pour le contrôle latéral et longitudinal du véhicule.

Au-delà de ses retombées théoriques, épistémologiques et méthodologiques en sciences de la cognition, notre modèle de simulation cognitive du conducteur pourrait aussi servir dans l’avenir des enjeux plus appliqués en matière de conception de systèmes d’aide à la conduite. Une première voie de recherche, à laquelle a déjà contribué notre travail dans le cadre du projet Européen ISI-PADAS¹⁴ [Bellet et al., 2012], est l’utilisation de la simulation numérique du conducteur pour concevoir virtuellement des assistances à la conduite. Dans ce contexte, la simulation informatique de l’opérateur humain peut être utilisée durant les premières étapes de conception ergonomique pour évaluer virtuellement les effets ou les apports de futurs systèmes avant de disposer de maquettes ou de prototypes (souvent très coûteux à développer) permettant de réaliser des tests avec de vrais opérateurs humains. Cette démarche de « Conception Centrée sur l’Humain » est particulièrement utile quant on veut concevoir des systèmes d’automatisation partielle ou totale de l’activité ([Boy, 2011], p.4). Mais pour être réellement utile à ce niveau, la simulation numérique doit permettre d’appréhender l’humain et son activité dans leur complexité naturelle, et en interaction dynamique avec une situation, ce que permet précisément notre modèle COSMODRIVE implanté sur SiVIC.

La seconde perspective d’application future de nos travaux pour la conception de systèmes d’aide à la conduite serait d’utiliser les schémas de conduite de COSMODRIVE pour concevoir des systèmes de perception intelligents de l’environnement routier. Cette piste a déjà été explorée par [Mayenobe, 2004], mais l’avantage de notre modèle est d’être désormais implanté sur la plateforme SiVIC, qui est précisément un outil de conception d’algorithmes et de prototypage virtuel de technologies de perception embarquées, facilitant ainsi le transfert vers le véhicule réel. Dans ce contexte, les schémas pourraient non seulement être utilisés pour explorer intelligemment l’environnement routier, mais ils pourraient aussi offrir un cadre d’intégration de l’information perçue dans une représentation tactique, permettant alors à un système d’assistance d’interpréter l’activité du conducteur et d’inférer ses intentions ([Bellet and Tattegrain-Veste, 2003]). L’un des enjeux majeurs est de concevoir des systèmes de copilotage coopératifs, capables de partager une même représentation de la situation que le conducteur humain pour pouvoir interagir avec

¹⁴Integrated SIMulation - Partially Autonomous Driver Assistance Systems. <http://www.isi-padas.eu/>

lui d'une façon appropriée aux conditions de conduite. De telles capacités cognitives des systèmes d'assistance leur permettraient aussi de diagnostiquer des erreurs de conduite et de pouvoir ainsi pallier certaines défaillances humaines [Bellet et al., 2010a].

Ainsi, tout en s'inscrivant pleinement et intégralement dans l'approche de la « Cognitique » [Claverie, 2005] comme nous l'avons souligné dans l'introduction générale de ce mémoire, cette thèse constitue un premier pas en direction de « L'Homme Augmenté » [Claverie, 2010] dans la perspective de concevoir des assistances du futur « interfacées avec la cognition humaine », sinon directement intégrées au sein du système cognitif humain.

Liste des figures

1	Méthodes de modélisation cognitive et de validation de modèles, de [Mathern et al., 2010]	2
2	Activités cognitives mises en jeu dans la conduite ([Neboit, 1978])	11
3	Le cycle de développement d'un modèle de simulation cognitive du conducteur . .	15
4	Démarche « ascendante » de la modélisation cognitive	16
5	Exemple de découverte d'un schéma tactique de dépassement à partir de l'analyse de traces d'activité (extrait de [Mathern, 2012]	21
6	Représentation synthétique des méthodes d'analyse ascendante de l'activité de conduite pour la modélisation cognitive du conducteur développée au LESCOT ¹⁵ (extrait de [Mathern, 2012])	22
7	Démarche « descendante » de la modélisation cognitive	23
8	Modèle de conducteur issu de la théorie du contrôle. Repris de [Jürgensohn, 2007].	33
9	Modèle du conducteur basé sur l'homéostasie du risque ([Wilde, 1982b])	34
10	Modèle Hiérarchie du risque ([Van Der Molen and Bötticher, 1988])	35
11	Le modèle du conducteur IDM (extrait de [Salvucci et al., 2001])	39
12	QN-MHP ¹⁶ tiré de [Feyen and Liu, 2001] et [Liu et al., 2006]	41
13	Architecture cognitive simplifiée (tiré de [Bellet, 1998])	43
14	La boucle de régulation dynamique dans l'approche COSMODRIVE [Bellet et al., 2010b]	44
15	Un schéma de conduite de Tourne-à-gauche dans un carrefour à feux (de [Bellet, 1998])	49
16	Zones enveloppes de COSMODRIVE (inspiré de [Bellet, 1998])	51
17	les points remarquables en ligne droite (extrait de [Mayenobe, 2004])	62
18	les points remarquables au carrefour à feux (extrait de [Mayenobe, 2004])	62
19	Matrice des risques relatifs aux conflits de zones enveloppes	65
20	Cycle perceptif, tiré de [Neisser, 1976]	71
21	Champs visuels humains	73
22	Champs Visuels : Fovéa, Parafovéa et Périphérique	74
23	Le globe oculaire	75
24	Méthode des points de poursuite pure (de [Sukthankar, 1997])	84
25	Photos de rendus de la plateforme SiVIC	91
26	Connexions au serveur XMPP	94
27	Architecture d'un message XMPP	95
28	Capture d'écran de l'interface du module stratégique	96
29	Exemple d'un graphe représentant un schéma tactique de ligne droite	99
30	Exemple de points remarquables dans un environnement de croisement	101
31	Processus de sélection et d'instanciation d'un schéma tactique générique	103

¹⁵Laboratoire Ergonomie et Sciences COgnitives pour les Transports

¹⁶Queueing Network-Model Human Processor

32	Schéma tactique de tourne-à-gauche, structuré en graphe	104
33	Un schéma de conduite de Tourne-à-gauche appliqué à un carrefour à feu particulier	104
34	Comparaison entre le schéma générique et l'environnement exemple	105
35	Schéma tactique superposé à l'environnement après sélection et adaptation	106
36	Architecture du module Perception	109
37	Fonctionnement du module Perception	111
38	Création d'une carte de Saillance	118
39	Capture d'écran de la caméra simulant l'œil et ses champs visuels	121
40	Capture d'écran des caméras dans SiVIC simulant l'œil et ses champs visuels . . .	122
41	Disposition des lasers dans le disque représentant la fovéa	124
42	Capture d'écran avec les points de poursuite visibles	126
43	Premier déploiement cognitif possible en situation de tourne-à-gauche	129
44	Second déploiement cognitif possible en situation de tourne-à-gauche	130
45	Simulation de suivi en approche de carrefour à feux (verts)	132
46	Simulation de suivi en carrefour avec changement de la couleur des feux	133
47	Simulation de suivi en carrefour à feux, avec tâche secondaire de distraction visuelle et changement de la couleur des feux	134
48	Situation tourne-à-gauche sans conflit de zones enveloppes	135
49	Situation tourne-à-gauche avec conflit important de zones enveloppes	136
50	Description de la cabine de conduite du simulateur	144
51	L'oculomètre Tobii	145
53	L'oculomètre devant les écrans	145
52	Description de la configuration du simulateur	146
54	Schéma relationnel de la base de données d'enregistrement des paramètres du simulateur	148
55	Parcours en zone urbaine	152
56	Zones perceptives étudiées	153
57	Parcours en contexte urbain	161
58	Double tâche visuelle	162
59	Stratégies d'allocation des ressources visuelles par les conducteurs	165
60	Arrêt d'urgence sans détournement du regard	167
61	Arrêt d'urgence avec détournement du regard	168
63	Différence entre la position dans la représentation mentale et dans la réalité . . .	168
62	Visualisation de la non-intégration cognitive d'une information visuelle grâce à la simulation numérique	169
64	Parcours Tourne à gauche	171
65	Visualisation de l'arrivée au carrefour	172
66	Visualisation des TIV	172
67	Arrivée du sujet au carrefour	175
68	Rencontre entre les zones enveloppes du véhicule du trafic inverse et le véhicule du sujet	176
69	Distances théoriques minimales et maximales à parcourir pendant le TàG	177
70	Matrice des risques relatifs aux conflits de zones enveloppes	178
71	Pourcentages de TàG effectifs en fonction du TIV	180

72	Moyennes des criticités associées à un TIV	181
73	Moyennes des passages potentiels si situation réelle	183
74	Moyennes des passages potentiels d'autrui si situation réelle	184
75	Moyennes des distances minimales avec le véhicule noir	184
76	Photos du véhicule instrumenté MARGO ¹⁷	225
77	Photos du simulateur de conduite de Bron	226
78	Architecture ACT-R	228
79	Architecture des différentes instances SiVIC avec leurs communications	231
80	Transmission de l'information dans le modèle COSMODRIVE	233

¹⁷plateforme de Mesure et d'Analyse pour l'eRGonomie de le cOnduite

Liste des codes QR

1	Fonctionnement du module perception	110
2	Mouvement de l'œil virtuel dans SiVIC	121
3	Déploiement cognitif d'un tourne-à-gauche	129
4	Déploiement cognitif d'un tourne-à-gauche	130
5	Passage d'un carrefour à feu, sans double tâche visuelle	132
6	Passage d'un carrefour à feu, sans double tâche visuelle, avec changement de couleur de la signalisation	133
7	Passage d'un carrefour à feu, avec double tâche visuelle et changement de couleur de la signalisation	134
8	Tourne-à-gauche sans conflit de zones enveloppes	135
9	Tourne-à-gauche avec conflit important de zones enveloppes	136
10	Sortie d'un quadravision	145
11	Présentation du simulateur	146
12	Exemple de stratégie visuelle en tourne-à-gauche	155
13	Exemple de stratégies visuelles en double tâche visuelle	166

Liste des tableaux

1	Comparaison des niveaux identifiés par [Michon, 1979] et [Rasmussen, 1986]	36
2	Dataform d'une requête perceptive	113
3	Nombre et temps moyen de fixations par zone pour chaque sujet	154
4	Nombre de consultations et durée moyenne de consultation sur chaque zone	156
5	Comparaison par paires des moyennes de durée de fixation	157
6	Comparaison par paires des moyennes de durée de consultation	157
7	Pourcentage d'accidents en fonction des contexte, tâche et double tâche visuelle	164
8	Ordre de proposition des TIV	173
9	Temps nécessaires au passage d'un carrefour	177
10	Prévision de la dernière zone enveloppe rencontrée par le conducteur	178
11	Corrélation de Pearson	182
12	Equivalence des distances en TIV à 50 km/h	185
13	Comparaison de la zone enveloppe traversée par le véhicule-sujet et du pourcentage de passage effectif	186
14	Comparaison entre la prévision de conflits et les conflits effectivement rencontrés lors du TàG	186

Bibliographie

- [Aasman and Michon, 1991] Aasman, J. and Michon, J. A. (1991). *Computers in psychology : Applications in education, research, and diagnostics*, chapter Soar as an environment for driver behavior modelin, pages 219–226. Swets & Zeitlinger, Amsterdam.
- [Aasman and Michon, 1992] Aasman, J. and Michon, J. A. (1992). *Soar : A cognitive architecture in perspective*, chapter Multitasking in driving, pages 169–198. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.
- [Allen et al., 1971] Allen, T. M., Lumenfeld, H., and Alexander, G. J. (1971). Driver information needs. *Highway Research Board*, 366 :102–115.
- [Amalberti, 1996] Amalberti, R. (1996). *La conduite de systèmes à risque*.
- [Amidi, 1990] Amidi, O. (1990). Integrated mobile robot control. Technical Report CMU-RI-TR-90-17, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania 15213.
- [Anderson, 1983] Anderson, J. R. (1983). *The Architecture of Cognition*. Cambridge, MA.
- [Anderson et al., 1993] Anderson, J. R., Bellezza, F. S., Boyle, C. F., Conrad, F. G., Corbett, A. T., Fincham, J. M., Hoffman, D., Kushmerick, N., Lebiere, C., Singley, M. K., and Wu, Q. (1993). *Rules of the Mind*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- [Anderson and Lebiere, 1998] Anderson, J. R. and Lebiere, C. (1998). *The Atomic Components of Thought*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- [Atkinson and Shiffrin, 1971] Atkinson, R. C. and Shiffrin, R. M. (1971). The control of short-term memory. *Scientific American*, 225(2) :82–90.
- [Babardel, 1996] Babardel, P. (1996). *Les hommes et les technologies : approche cognitive des instruments contemporains*. Armand Colin.
- [Baddeley, 1990] Baddeley, A. (1990). *Human memory : Theory and practice*. Hove : Lawrence Erlbaum Associates.
- [Baddeley, 1992] Baddeley, A. (1992). Working memory. *Science*, 255 :556–559.
- [Bailly, 2004] Bailly, B. (2004). *Conscience de la situation des conducteurs : aspects fondamentaux, méthodes et applications pour la formation des conducteurs*. PhD thesis.
- [Baluch and Itti, 2011] Baluch, F. and Itti, L. (2011). Mechanisms of top-down attention. *Trends in Neurosciences*, 34(4) :210 – 224.
- [Banet, 2010] Banet, A. (2010). *Conscience du risque et attitudes face aux risques chez les motocyclistes*. PhD thesis, Université Lyon 2.
- [Bartlett, 1932] Bartlett, F. C. (1932). *Remembering : A Study in Experimental and Social Psychology*. Cambridge University Press, Londres.

- [Bellet, 1998] Bellet, T. (1998). *Modélisation et simulation cognitive de l'opérateur humain : une application à la conduite automobile*. PhD thesis, Université Paris 5.
- [Bellet et al., 2007] Bellet, T., Bailly, B., Mayenobe, P., and Georgeon, O. (2007). Cognitive modelling and computational simulation of drivers mental activities. *P.C. Cacciabue (Ed.), Modelling Driver Behaviour in Automotive Environment : Critical Issues in Driver Interactions with Intelligent Transport Systems, 315-343, Springer Verlag*.
- [Bellet et al., 2009] Bellet, T., Bailly-Asuni, B., Mayenobe, P., and Banet, A. (2009). A theoretical and methodological framework for studying and modelling drivers mental representations. *Safety Science, 47* :1205 – 1221.
- [Bellet and Banet, 2012] Bellet, T. and Banet, A. (2012). Towards a conceptual model of motorcyclists' risk awareness : A comparative study of riding experience effect on hazard detection and situational criticality assessment. *Accident Analysis and Prevention, 49* :154–164.
- [Bellet et al., 2010a] Bellet, T., Boverie, S., Boy, G. A., and Hoc, J.-M. (2010a). *Interaction homme-machine dans les transports - information voyageur, personnalisation et assistance*, chapter De l'interaction à la coopération homme-machine : vers le copilottage automobile, pages 151–177. Hermes Science Publications.
- [Bellet et al., 2010b] Bellet, T., Mayenobe, P., and Bornard, J.-C. (2010b). How to investigate the living cognition : An application to dynamic simulation of mental activities while driving. In Gunzelmann, D. D. S. . G., editor, *Proceedings of the 10th International Conference on Cognitive Modeling*, pages 1–6, Philadelphia.
- [Bellet et al., 2012] Bellet, T., Mayenobe, P., Bornard, J.-C., Gruyer, D., and Claverie, B. (2012). A computational model of the car driver interfaced with a simulation platform for future virtual human centred design applications : Cosmo-sivic. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 25* :1488–1504.
- [Bellet and Tattegrain-Veste, 1999] Bellet, T. and Tattegrain-Veste, H. (1999). A framework for representing driving knowledge. *International Journal of Cognitive Ergonomics, 3* (1) :37–49.
- [Bellet and Tattegrain-Veste, 2003] Bellet, T. and Tattegrain-Veste, H. (2003). *Formalismes de modélisation pour l'analyse du travail et l'ergonomie*, chapter COSMODRIVE : un modèle de simulation cognitive du conducteur automobile, pages 77–110. Presses Universitaires de France.
- [Berthelon et al., 1998] Berthelon, C., Mestre, D., Pottier, A., and Pons, R. (1998). Is visual anticipation of collision during self-motion related to perceptual style? *Acta Psychologica, 98*(1) :1–16.
- [Biederman, 1987] Biederman, I. (1987). Recognition-by-components : A theory of human image understanding. *Psychological Review, 94* :115–147.
- [Bisseret, 1970] Bisseret, A. (1970). Mémoire opérationnelle et structure du travail. *Bulletin de Psychologie, 24* :5–6.
- [Bisseret, 1995] Bisseret, A. (1995). *Représentation et décision experte. Psychologie cognitive de la décision chez les aiguilleurs du ciel*. Toulouse.

- [Blake and Sekuler, 2006] Blake, R. and Sekuler, R. (2006). *Perception*. McGraw-Hill.
- [Bootsma and Craig, 2002] Bootsma, R. J. and Craig, C. M. (2002). Global and local contributions to the optical specification of time to contact : Observer sensitivity to composite tau. *Perception*, 31 :901–924.
- [Boy, 2011] Boy, G. A. (2011). *The Handbook of Human-Machine Interaction : A Human-Centered Design Approach*. Ashgate.
- [Brouard et al., 2009] Brouard, O., Ricordel, V., and Barba, D. (2009). Cartes de saillance spatio-temporelle basées contrastes de couleur et mouvement relatif. In *Compression et représentation des signaux audiovisuels (CORESA)*.
- [Byrne and Anderson, 1998] Byrne, M. D. and Anderson, J. R. (1998). *Atomic components of thought*, chapter Perception and Action, page 167. Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- [Claverie, 2005] Claverie, B. (2005). *Cognitique : Science et pratique des relations à la machine à penser*.
- [Claverie, 2010] Claverie, B. (2010). *L’Homme Augmenté : Néotechnologies pour un dépassement du corps et de la pensée*. Cognition et Formation. Harmattan, Paris.
- [Claverie and Leger, 2009] Claverie, B. and Leger, A. (2009). Vision augmentée par hud : pour une prise en compte des contraintes psychophysiologiques. *Revue des Interactions Humaines Médiatisées*, 10 :27– 58.
- [Coudray and Besserer, 2004] Coudray, R. and Besserer, B. (2004). Global motion estimation for mpeg-encoded streams. In *Image Processing, 2004. ICIP '04. 2004 International Conference on*, volume 5, pages 3411 – 3414 Vol. 5.
- [Denis, 1979] Denis, M. (1979). *Les images mentales*.
- [Dijkstra, 1971] Dijkstra, E. (1971). A short introduction to the art of programming. Report ewd316, Technische Hogeschool Eindhoven, Eindhoven.
- [Endsley, 1991] Endsley, M. R. (1991). Situation awareness in dynamic systems. In Daniellou, Y. Q. . F., editor, *Designing for Everyone*, pages 801–803. London : Taylor and Francis.
- [Endsley, 1995] Endsley, M. R. (March 1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37 :32–64(33).
- [Feyen and Liu, 2001] Feyen, R. and Liu, Y. (2001). Modeling task performance using the queueing network model human processor (qn-mhp). In *International Conference on Cognitive Modeling*.
- [Fort et al., 2010] Fort, A., Martin, R., Jacquet-Andrieu, A., Combe-Pangaud, C., Daligault, S., Foliot, G., and Delpuech, C. (2010). Attention and processing of relevant visual information while simulated driving : a meg study. *Brain Research*, pages 117–127.
- [Gentaz and Ballaz, 2000] Gentaz, E. and Ballaz, C. (2000). La perception visuelle des orientations et « l’effet de l’oblique ». *L’année psychologique*, 100 (4) :715–744.

- [Georgeon, 2008] Georgeon, O. (2008). *Analyse de traces d'activité pour la modélisation cognitive : application à la conduite automobile*. Thèse de doctorat en informatique, Université Lyon 2.
- [Gibson, 1977] Gibson, J. J. (1977). The theory of affordances. In Shaw, R. and Bransford, J., editors, *Perceiving, Acting, and Knowing : Toward an Ecological Psychology*, pages 67–82+. Erlbaum.
- [Gibson, 1979] Gibson, J. J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Houghton Mifflin, Boston, MA.
- [Gibson and Crooks, 1938] Gibson, J. J. and Crooks, L. E. (1938). A theoretical field-analysis of automobile-driving. *The American Journal of Psychology*, 51 :453–471.
- [Gregory, 2000] Gregory, R. L. (2000). *L'œil et le cerveau : La psychologie de la vision*. Neurosciences & cognition. De Boeck Université, Bruxelles.
- [Gruyer et al., 2011] Gruyer, D., Glaser, S., Pechberti, S., Gallen, R., and Hautiere, N. (2011). Distributed simulation architecture for the design of cooperative adas. In *Future Active Safety Technology toward zero-traffic-accident*, pages 1–7.
- [Gruyer et al., 2010a] Gruyer, D., Glaser, S., Vanholme, B., Hiblot, N., and Monnier, B. (2010a). Sivic, a virtual platform for adas and padas prototyping, test and evaluation. In *FISITA World Automotive Congress*, pages 480–489, Budapest, Hungary.
- [Gruyer et al., 2010b] Gruyer, D., Hiblot, N., Souza, P. D., Sauer, H., and Monnier, B. (2010b). A new generic virtual platform for cameras modeling. In des Ingénieurs de l'Automobile, S., editor, *Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving (V.I.S.I.O.N. 2010)*, Publications SIA/Articles techniques, pages R–2010–04–35, Montigny le Bretonneux, France.
- [Gruyer et al., 2005] Gruyer, D., Rakotonirainy, A., and Vrignon, J. (2005). Advancement in advanced driving assistance systems tools : Integrating vehicle dynamics, environmental perception and drivers' behaviours to assess vigilance. In *Intelligent Vehicles and Road Infrastructure Conference*, Melbourne, Victoria.
- [Gruyer et al., 2006] Gruyer, D., Royère, C., du Lac, N., Michel, G., and Blossenville, J.-M. (2006). Sivic and rt-maps interconnected platforms for the conception and the evaluation of driving assistance systems. In *Proceedings of the ITS World Congress, London, UK*.
- [Guérin et al., 2006] Guérin, F., Daniellou, F., Duraffourg, J., and Kerguelen, A. (2006). *Comprendre le travail pour le transformer : La pratique de l'ergonomie*. Anact.
- [Hall, 1992] Hall, E. T. (1992). *The Hidden Dimension*. Peter Smith Pub Incorporated.
- [Hamama, 2010] Hamama, H. (2010). *Impact des situations d'attention partagée sur le traitement de l'information chez les conducteurs novices*. PhD thesis, Université Lumière - Lyon II.
- [Harel, 1987] Harel, D. (1987). Statecharts : A visual formalism for complex systems. *Science of Computer Programming*, 8 :231–274.

- [Harel and Politi, 1998] Harel, D. and Politi, M. (1998). *Modeling reactive systems with state-charts : the statemate approach*. Software Development. McGraw-Hill.
- [Hayhoe et al., 2002] Hayhoe, M. M., Ballard, D. H., Triesch, J., Shinoda, H., Aivar, P., and Sullivan, B. (2002). Vision in natural and virtual environments. In *Eye Tracking Research & Applications*, pages 7–13, New York, NY, USA ©2002. ACM.
- [Hoc and Amalberti, 1994] Hoc, J.-M. and Amalberti, R. (1994). Diagnostic et prise de décision dans les situations dynamiques. *Psychologie française*, 39(2) :177–192.
- [Hoc and Amalberti, 1995] Hoc, J.-M. and Amalberti, R. (1995). Diagnostic et prise de décision dans les situations dynamiques. *Psychologie Française*, 39 (2) :177–192.
- [Horberry et al., 2006] Horberry, T., Anderson, J., Regan, M. A., Triggs, T. J., and Brown, J. (2006). Driver distraction : The effects of concurrent in-vehicle tasks, road environment complexity and age on driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, 38(1) :185 – 191.
- [Ikeda et al., 1979] Ikeda, M., Uchikawa, K., and Saida, S. (1979). Static and dynamic functional visual fields. *Optica acta*, 26(8) :1103–1113.
- [Itti and Koch, 1999] Itti, L. and Koch, C. (1999). A comparison of feature combination strategies for saliency-based visual attention systems. *Journal of Electronic Imaging*, 10 :161–169.
- [Itti and Koch, 2000] Itti, L. and Koch, C. (2000). A saliency-based search mechanism for overt and covert shifts of visual attention. *Vision Research*, 40 :1489–1506.
- [Itti and Koch, 2001] Itti, L. and Koch, C. (2001). Computational modelling of visual attention. *Nature Review Neuroscience*, 2(3) :194–203.
- [Itti et al., 1998] Itti, L., Koch, C., and Niebur, E. (1998). A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 20 (11) :1254–1259.
- [Jones, 2006] Jones, T. R. (2006). Efficient generation of poisson-disk sampling patterns. *Journal of Graphics Tools*, 11 :27–36.
- [Jürgensohn, 2007] Jürgensohn, T. (2007). *Modelling driver behaviour in Automotive Environments*, chapter Control Theory Models of the Driver, pages 277–292.
- [Klam, 2003] Klam, F. (2003). *Etude de la représentation de l'espace tridimensionnel dans le cortex pariétal chez le macaque vigile : approche électrophysiologique et modélisation*. PhD thesis, Université de Paris VI.
- [Kohonen, 1990] Kohonen, T. (1990). The self-organizing map. In *Proceedings of the IEEE*, volume 78.
- [Kosslyn et al., 1971] Kosslyn, S. M., Ball, T. M., and Reiser, B. J. (1971). Visual images preserve metric spatial information : evidence from studies of image scanning. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 4(1) :47–60.

- [Kosslyn and Koenig, 1995] Kosslyn, S. M. and Koenig, O. (1995). *Wet Mind : The New Cognitive Neuroscience*. Simon & Schuster.
- [Latash et al., 2002] Latash, M. L., Grélot, L., Delamarche, P., and Delamarche, A. (2002). La vision. In Boeck, D., editor, *Bases neurophysiologiques du mouvement*, chapter 22, pages 211–218. De Boeck Université.
- [Lee, 1980] Lee, D. N. (1980). 16 visuo-motor coordination in space-time. In Stelmach, G. E. and Requin, J., editors, *Tutorials in Motor Behavior*, volume 1 of *Advances in Psychology*, pages 281 – 295. North-Holland.
- [Lee et al., 2007] Lee, S. E., Llaneras, E., Klauer, S., and Sudweeks, J. (2007). Analyses of rear-end crashes and near-crashes in the 100-car naturalistic driving study to support rear-signaling countermeasure development. Dot hs 810 846, Virginia Tech Transportation Institute Blacksburg, Virginia. Sponsored by National Highway Traffic Safety Administration, Washington D.C.
- [Leibowitz and Owens, 1977] Leibowitz, H. and Owens, D. A. (1977). Nighttime driving accidents and selective visual degradation. *Science*, 197 :422–423.
- [Leontiev, 1984] Leontiev, A. N. (1984). *Activité, conscience, personnalité*. Editions du Progrès.
- [Leplat, 1985a] Leplat, J. (1985a). *Erreur humaine, fiabilité humaine dans le travail*. Collection U. Série Psychologie. A. Colin.
- [Leplat, 1985b] Leplat, J. (1985b). Les représentations fonctionnelles dans le travail. *Psychologie Française*, 30 (3/4) :269–275.
- [Levison, 1993] Levison, W. H. (1993). Simulation model for driver’s use of in-vehicle information systems. *Transport Research Record*, 1403 :7–13.
- [Lin, 93] Lin, M. C. (93). *Efficient collision detection for animation and robotics*. PhD thesis, University of California, Berkeley, Berkeley, CA.
- [Lin and Manocha, 2004] Lin, M. C. and Manocha, D. (2004). *Handbook of Discrete and Computational Geometry, Second Edition*, chapter Collision and Proximity Queries, pages 787–807. CRC Press.
- [Liu et al., 2006] Liu, Y., Feyen, R., and Tsimhoni, O. (2006). Queueing network-model human processor (qn-mhp) : A computational architecture for multitask performance in human-machine systems. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 13(1) :37–70.
- [Malaterre, 1988] Malaterre, G. (1988). *Les activités sous contrainte de temps : le cas des manœuvres d’urgence en conduite automobile*. PhD thesis, Université René Descartes, Paris.
- [Marr et al., 1982] Marr, D., Ullman, S., and Poggio, T. (1982). *Vision : A Computational Investigation Into the Human Representation and Processing of Visual Information*. MIT Press.
- [Mathern, 2012] Mathern, B. (2012). *Découverte interactive de connaissances à partir de traces d’activité : Synthèse d’automates pour l’analyse et la modélisation de l’activité de conduite automobile*. PhD thesis, Université Claude Bernard LYON 1.

- [Mathern et al., 2010] Mathern, B., Bellet, T., and Mille, A. (2010). An iterative approach to develop a cognitive model of the driver for human centred design of its. In *Proceedings of European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*.
- [Mayenobe, 2004] Mayenobe, P. (2004). *Perception de l'environnement pour une gestion contextualisée de la coopération Homme-Machine*. PhD thesis, Université Blaise Pascal.
- [McCool and Fiume, 1992] McCool, M. and Fiume, E. (1992). Hierarchical poisson disk sampling distributions. In Society, C. H.-C. C., editor, *Graphics Interface*, pages 94–105, CANADA.
- [McKnight and Adams, 1970] McKnight, A. and Adams, B. (1970). *Driver Education Task Analysis. Volume I : Task Descriptions. Final Report*. Human Resources Research Organization International, Alexandria.
- [Michael, 2007] Michael, G. A. (2007). *Neuroscience cognitive de l'attention visuelle*, chapter Capture attentionnelle en vision : la pertinence, la saillance et la balance cortico-sous-corticale, pages 165–201. Broché, Marseille.
- [Michon, 1979] Michon, J. A. (1979). Dealing with danger. Technical report, Traffic Research Centre, University of Groningen.
- [Michon, 1985] Michon, J. A. (1985). *Human behavior and traffic safety*, chapter A critical view of driver behavior models : what do we know, what should we do ?, pages 485–520. New York : Plenum Press.
- [Minsky, 1975] Minsky, M. (1975). *The Psychology of Computer Vision*, chapter A Framework for Representing Knowledge, pages 211–277. Mc Graw-Hill, New-York.
- [Minsky, 1988] Minsky, M. (1988). *La Société de l'esprit*. Paris.
- [Munduteguy and Darses, 2007] Munduteguy, C. and Darses, F. (2007). Perception et anticipation du comportement d'autrui en situation simulée de conduite automobile. In *Le Travail humain*, volume 70, pages 1–32. Presses universitaires de France, Paris, FRANCE.
- [Näätänen and Summala, 1976] Näätänen, R. and Summala, H. (1976). *Road-user behavior and traffic accidents*. North-Holland Pub. Co.
- [Neboit, 1978] Neboit, M. (1978). Simulation et apprentissage de la conduite. In *Le Travail Humain*, volume 41, pages 239–249. Presses Universitaires de France.
- [Neboit, 1980] Neboit, M. (1980). *L'exploration visuelle dans l'apprentissage de tâches complexes : l'exemple de la conduite automobile*. PhD thesis, Ecole pratique des Hautes Etudes.
- [Neisser, 1967] Neisser, U. (1967). *Cognitive psychology*. Appleton-Century-Crofts (New York), New York.
- [Neisser, 1976] Neisser, U. (1976). *Cognition and reality : principles and implications of cognitive psychology*. W. H. Freeman.
- [Newell, 1990] Newell, A. (1990). *Unified theories of cognition*. Harvard University Press, Cambridge, MA, USA.

- [Ochanine, 1977] Ochanine, D. A. (1977). Concept of operative image in engineering and general psychology. In B. F. Lomov, V. F. R. and Venda, V. F., editors, *Engineering Psychology*, Moscow. Science Publisher.
- [Otha, 1993] Otha, H. (1993). *Vision in Vehicles IV*, chapter Individual differences in driving distance headway, pages 91–100. NORTH-HOLLAND.
- [Pailhous, 1969] Pailhous, J. (1969). Représentation de l'espace urbain et cheminements. *Le Travail Humain*, 32 :239–270.
- [Piaget and Inhelder, 1975] Piaget, J. and Inhelder, B. (1975). *La psychologie de l'enfant*. Presses Universitaires de France.
- [Plavsic et al., 2010] Plavsic, M., Bengler, K., and Bubb, H. (2010). *Advances in Ergonomics Modeling and Usability*, chapter Analysis of glance movements in critical intersection scenarios, pages 153–162. CRC Press.
- [Pollard et al., 2011] Pollard, E., Gruyer, D., Tarel, J.-P., Ieng, S.-S., and Cord, A. (2011). Lane marking extraction with combination strategy and comparative evaluation on synthetic and camera images. In *Proceedings of IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC'11)*, pages 1741–1746, Washington DC, USA.
- [Popper, 1979] Popper, K. R. (1979). *La logique de la découverte scientifique*. Payot.
- [Ranchet, 2011] Ranchet, M. (2011). *Effet de la maladie de Parkinson sur la conduite automobile. Implication des fonctions exécutives*. PhD thesis, Université Lumière Lyon 2.
- [Rasmussen, 1986] Rasmussen, J. (1986). *Information Processing and Human-Machine Interaction : An Approach to Cognitive Engineering*. Number 12 in System Science and Engineering. North-Holland, New York, NY, USA.
- [Rayner, 1984] Rayner, K. (1984). *Attention and Performance X : Control of Language Processes*, chapter Visual selection in reading picture perception and visual search : a tutorial review, pages 67–96. L. Erlbaum Associates.
- [Rayner, 1998] Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing : 20 years of research. *Psychological bulletin*, 124(3) :372–422.
- [Regan et al., 2009] Regan, M. A., Lee, J. D., and Young, K. L. (2009). What drives distraction? distraction as a breakdown of multilevel control. In Michel A. Regan, John D. Lee, K. L. Y., editor, *Driver distraction : Theory, effects and mitigation*, pages 42–56. CRC Press.
- [Reid et al., 1981] Reid, L. D., Solowka, E. N., and Billing, A. M. (1981). A systematic study of driver steering behaviour. *Ergonomics*, 24(6) :447–462.
- [Richard, 1990] Richard, J.-F. (1990). *Les activités mentales : comprendre raisonner, trouver des solutions*. Armand Colin.
- [Rogé and Pébayle, 2009] Rogé, J. and Pébayle, T. (2009). Deterioration of the useful visual field with ageing during simulated driving in traffic and its possible consequences for road safety. *Safety Science*, 47 :1271–1276.

- [Saad et al., 1992] Saad, F., Delhomme, P., Elslande, P. V., Gauje, T., Nachtergaele, C., and Picard-Dore, J. (1992). Analyse des comportements en situation réelle de conduite : le franchissement d'intersections. Technical Report 158, INRETS.
- [Salvucci, 2006] Salvucci, D. D. (2006). Modeling driver behavior in a cognitive architecture. *Human Factors*, 48 :362–380.
- [Salvucci et al., 2001] Salvucci, D. D., Boer, E. R., and Liu, A. (2001). Toward an integrated model of driver behavior in a cognitive architecture. *Transportation Research Record*, 1779 :9–16.
- [Sanders, 1993] Sanders, A. F. (1993). *Perception and Cognition : Advances in Eye Movement Research*, chapter Processing information in the functional visual field, pages 3–22. North-Holland, Amsterdam.
- [Savelsbergh et al., 1991] Savelsbergh, G. J. P., Whiting, H. T. A., and Bootsma, R. J. (1991). Grasping tau. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 17(2) :315–322.
- [Schank and Abelson, 1977] Schank, R. C. and Abelson, R. P. (1977). *Scripts, plans, goals, and understanding : an inquiry into human knowledge structures*. L. Erlbaum Associates.
- [Schilder, 1950] Schilder, P. (1950). *The Image and Appearance of the Human Body*. International Universities Press, New York.
- [Schilder, 1968] Schilder, P. (1968). *L'image du corps*. Gallimard.
- [Shepard and Metzler, 1971] Shepard, R. N. and Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171(3972) :701–703.
- [Shinoda et al., 2001] Shinoda, H., Hayhoe, M. M., and Shrivastava, A. (2001). What controls attention in natural environments? *Vision Research*, 41(25 - 26) :3535–3545.
- [Sperandio, 1980] Sperandio, J.-C. (1980). *La psychologie en ergonomie*. Le Psychologue. Presses universitaires de France.
- [Sperandio, 2003] Sperandio, J.-C. (2003). *Formalismes de modélisation pour l'analyse du travail et l'ergonomie*, chapter Modèles et formalismes, ou le fond et la forme, pages 27–75.
- [Spinoza, 1670] Spinoza, B. (1665-1670). *Traité de la réforme de l'entendement*. Garnier Flammarion bilingue, Paris.
- [Sukthankar, 1997] Sukthankar, R. (1997). *Situation Awareness for Tactical Driving*. PhD thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213.
- [Thinus-Blanc, 1991] Thinus-Blanc, C. (1991). Mémoires d'espaces. *Sciences et Vie*, Décembre 1991.
- [Tiberghien, 1993] Tiberghien, G. (1993). *Intelligence naturelle et intelligence artificielle*, chapter Questions de modélisation et de simulation cognitives, pages 43–69. Psychologie d'aujourd'hui. Presses universitaires de France.

- [Tobii, 2012] Tobii (2012). The tobii i-vt fixation filter. Technical report, Tobii Technology.
- [Treat, 1980] Treat, J. R. (1980). A study of precrash factors involved in traffic accidents. *HSRI Research Review*, 10(6)-11(1) :1–35.
- [Tsimhoni and Liu, 2003] Tsimhoni, O. and Liu, Y. (2003). Steering a driving simulator using the queueing network-model human processor (qn-mhp). In D. V. McGehee, J. D. Lee, . M. R., editor, *PROCEEDINGS of the Second International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*.
- [Van Der Molen and Bötticher, 1988] Van Der Molen, H. H. and Bötticher, A. M. T. (1988). A hierarchical risk model for traffic participants. *Ergonomics*, 31(4) :537–555.
- [Van-Elslande, 1992] Van-Elslande, P. (1992). Les erreurs d’interprétation en conduite automobile : mauvaise catégorisation ou activation erronée de schémas? *Intellectica*, 15(3) :125–149.
- [Vermersch, 1994] Vermersch, P. (1994). *L’entretien d’explicitation en formation initiale et en formation continue*. ESF.
- [Victor et al., 2005] Victor, T. W., Harbluk, J. L., and Engström, J. A. (2005). Sensitivity of eye-movement measures to in-vehicle task difficulty. In *Transportation research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, volume 8(2), pages 167–190.
- [Warren, 1995] Warren, W. H. J. (1995). Self-motion : Visual perception and visual control. In Rogers, W. E. . S., editor, *Handbook of perception and cognition : Perception of space and motion.*, pages 263–325. Academic Press.
- [Weill-Fassina et al., 1993] Weill-Fassina, A., Rabardel, P., and Dubois, D. (1993). *Représentations pour l’action*. Toulouse.
- [Wickens and Hollands, 2000] Wickens, C. and Hollands, J. (2000). *Engineering Psychology and Human Performance*. Prentice Hall.
- [Wiener, 1948] Wiener, N. (1948). *Cybernetics ; or control and communication in the animal and the machine*. M.I.T. Press.
- [Wierda et al., 1992] Wierda, M., Aasman, J., and te Groningen. Verkeerskundig Studiecentrum, R. (1992). *Seeing and Driving : Computation, Algorithms and Implementation*. Traffic Research Centre VSC, University of Groningen.
- [Wilde, 1982a] Wilde, G. J. S. (1982a). Critical issues in risk homeostasis theory. *Risk Analysis*, 2(4) :249–258.
- [Wilde, 1982b] Wilde, G. J. S. (1982b). The theory of risk homeostasis : implications for safety and health. *Risk Analysis*, 2(4) :209–225.
- [Wolfe et al., 1989] Wolfe, J. M., Cave, K. R., and Franzel, S. L. (1989). Guided search : An alternative to the feature integration model for visual search. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performanc*, 15 (3) :419–433.
- [Wood, 1993] Wood, S. (1993). *Planning and decision making in dynamic domains*. Ellis Horwood, London.

- [Woods, 1988] Woods, D. D. (1988). Coping with complexity : the psychology of human behaviour in complex systems. In *Tasks, errors, and mental models*, pages 128–148. Taylor & Francis, Inc., Bristol, PA, USA.
- [Yarbus, 1967] Yarbus, A. L. (1967). *Eye movements and vision*. Plenum Press.
- [Yoo et al., 2009] Yoo, H.-J., Goulette, F., Senpauroca, J., Lepere, G., and Gruyer, D. (2009). Aide à la conception par simulation de systèmes de cartographie mobile à scanner laser. In *Technique Laser pour l'Etude Environnements Naturels et Urbains*.
- [Zhang, 2011] Zhang, Y. (2011). *Visual and Cognitive distraction effects on driver behavior and a approach to distraction state classification*. PhD thesis, North Carolina State University.

Publications effectuées pendant la thèse

Revue à comité de lecture

- **Bornard J-C.**, Bellet T., Mayenobe P., Gruyer D., Claverie B. (2012). Modelling visual distraction effects on driver's perception and cognition. *Int. J. Human Factors Modelling and Simulation*, Vol. 3, No. 1.
- Bellet T., Mayenobe P., **Bornard J-C.**, Gruyer D., Claverie B. (2012). A computational model of the car driver interfaced with a simulation platform for future Virtual Human Centred Design applications : COSMO-SIVIC. *Engineering Applications of Artificial Intelligence (EAAI)*, 15 : 1488-1504.
- Bellet T., Gruyer D., **Bornard J-C.**, Claverie B. (2011). The Living Cognition Paradigm : An Application to Computational Modeling of Drivers Mental Activities. In *US-China Education Review B*, 4, p.568-578.

Chapitre d'ouvrage

- Bellet T., Mayenobe P., **Bornard J.C.**, Paris J.C., Gruyer D., Claverie B. (2011). Human driver modelling and simulation into a virtual road environment. In Cacciabue, P. C. ; Hjälmdahl, M. ; Lüdtke A. ; Riccioli, C. (Eds.). *Human Modelling in Assisted Transportation : Models, Tools and Risk Methods*, Milan, Springer, pp. 251-262.

Actes de conférences internationales

- Bellet, T., **Bornard J.C.**, Mayenobe, P., Paris J.C., Gruyer D., Claverie B. (2012). Computational simulation of visual distraction effects on car drivers' Situation Awareness. In, N. Russwinkel, U. Drewitz and H. van Rijn (eds.), *Proceedings of ICCM2012 (11th International Conference on Cognitive Modeling)*, Berlin, Technical University of Berlin, pp. 59-65.
- Bellet, T., **Bornard J.C.**, Mayenobe, P., Paris J.C., Gruyer D., Claverie B. (2012). A Virtual Human Centred Design tool based on a cognitive simulation model of the car driver. In *Proceedings of European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems - June 14-15 2012*, Valencia, Spain.
- **Bornard J-C.**, Bellet T., Mayenobe P., Gruyer D., Claverie B. (2011). A perception module for car drivers' visual strategies modeling and visual distraction effect simulation. In *Proceedings of the 1st international Symposium on Digital Human Modelling (IEA-DHM)*, pages 1-6, France.

- Bellet T., Mayenobe, P., **Bornard, J.-C.** (2010). How to Investigate the Living Cognition : An Application to Dynamic Simulation of Mental Activities while Driving. In D. D. Salvucci & G. Gunzelmann (Eds.), *Proceedings of the 10th International Conference on Cognitive Modeling*, Philadelphia, PA : Drexel University. pp. 1-6.
- Bellet T., Mayenobe P., **Bornard J.-C.**, Gruyer D., Mathern B. (2010). COSMO-SIVIC : a first step towards a virtual platform for Human Centred Design of driving assistances. In *11th IFAC,IFIP,IFORS,IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems. Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems*, 11 (1), p.210-215.

Glossaire

.NET

Nom d'un ensemble de produits et de technologies de l'entreprise Microsoft dont la plupart dépendent du framework .NET, un composant du système d'exploitation Windows constituant un équivalent de machine virtuelle.. 91, 111, 147

CUDA : Compute Unified Device Architecture

Technologie de qui permet d'utiliser un processeur graphique (GPU) pour exécuter des calculs généraux habituellement exécutés par le processeur central (CPU). 118, 221

SiVIC : Simulateur Vehicule-Infrastructure-Capteur

Plateforme développée au sein du LIVIC à l'IFSTTAR, est une plateforme de prototypage de capteurs ayant pour but de reproduire de la manière la plus fidèle la réalité d'une situation, le comportement d'un véhicule et le fonctionnement de capteurs qui peuvent y être embarqués. 4, 53, 86, 89, 143, 189, 222

CLR : Common Language Runtime

Implémentation par Microsoft du standard Common Language Infrastructure, permettant l'interopérabilité entre différent langage et la prise en compte automatique de nombreuse fonctionnalité comme le ramasse-miettes ou le système de sécurité.. 111, 221

Dll : Dynamic Link Library

Fichier exécutable qui permet à des programmes de partager du code et d'autres ressources nécessaires pour effectuer des tâches particulières.. 91, 147, 221

UDP : User Datagram Protocol

Protocole de transmission de données entre deux entités définies par adresse IP et numéro de port. Ce protocole fonctionne sans négociation : la garantie de la bonne livraison des données n'est pas assurée, ce qui permet un gain de temps important par rapport au protocole TCP. 93, 147, 223, 230

C++

Langage de programmation permettant la programmation procédurale, orientée objet et générique. 91, 96, 107, 111, 234

code QR

Type de code-barre en deux dimensions, permettant de stocker des informations, pouvant être lu par un lecteur de code-barre, un smartphone ou une webcam, permettant de déclencher facilement des actions comme naviguer vers une adresse internet. iii

débogueur

Logiciel d'aide au développement permettant d'analyser les bogues d'un programme par exécution pas-à-pas, affichage des valeurs de variables, points d'arrêt ou espions. 92, 220

environnement de développement

Regroupement d'outils dédiés au développement informatique, intégrant le plus souvent un éditeur de texte, un compilateur et un débogueur. 91, 92

framework

kit de composants logiciels génériques et structurels permettant la création d'une partie ou de la totalité d'un logiciel. 91, 111, 147, 227

HDR : high dynamic range

L'imagerie à grande gamme dynamique est un regroupement de techniques numériques qui permet de représenter de nombreux niveaux d'intensité lumineuse dans une image.. 90

OpenGL

Spécification définissant une API pour la conception d'application générants des images 3D ou 2D. Source Wikipédia. 92, 120, 122, 123

quadra-vision

dispositif pour condenser quatre images complètes en entrée en une seule images en sortie. 144, 149

SQL server

Microsoft SQL Server est un système de gestion de base de données (abrégé en SGBD ou SGBDR pour « Système de gestion de base de données relationnelles ») développé et commercialisé par la société Microsoft Définition Wikipédia . 91, 92, 138, 147, 148

SQLite

Bibliothèque en langage C qui permet d'implémenter un moteur de base de données relationnelles, sans serveur, en mode fichier, accessible par langage SQL. Pour plus d'information : <http://sqlite.org>. 227

trace d'activité

Ensemble de données interprétables par un ergonome pour comprendre le flux temporel des aspects pertinents pour un opérateur, de son interaction avec son environnement. [Geor-geon, 2008]. 20

Visual Studio

Suite logiciel de Microsoft Corporation, composé d'un ensemble d'outils permettant de générer des logiciels avec plusieurs langage possible (VB, C, C++, C#, J#). 91, 92

Acronymes

ABSTRACT

Analysis of Behavior and Situation for menTal Representation Assessment and Cognitive acTivity modeling. 20

ACT-R

Adaptive Control of Thought-Rational. 37, 39–43, 53, 190, 197, 228, 229

ADAS

Advanced Driver Assistance Systems. 90, 91

API

Application Programming Interface : interface de programmation. 92

CLR

Common Language Runtime. 111, 219

COSMODRIVE

COgnitive Simulation MOdel of the DRIVER. v, vi, 2, 4, 5, 20, 22, 23, 27, 28, 31, 34, 38, 39, 42–48, 50–53, 55, 59, 60, 63, 65, 68, 69, 80, 81, 84, 86, 89, 90, 93–95, 97, 103, 107, 108, 114, 126, 128, 139, 170, 171, 187, 189–191, 195, 197, 230, 231, 233

CPU

Central Processing Unit. 138

CUDA

Compute Unified Device Architecture. 118, 119, 219

Dll

Dynamic Link Library. 91, 111, 147, 219

ENSC

Ecole Nationale Supérieure de Cognitique. 1

EPIC

Executive-Process/Interactive Control. 229

GPU

Graphics Processing Unit. 138

IDM

Integrated Driver Model. 190

IFSTTAR

Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Amenagement et des Reseaux. v, vi, 1, 17

IMS

laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système. 1

ISI-PADAS

Integrated SIMulation - Partially Autonomous Driver Assistance Systems. <http://www.isi-padas.eu/>. 191

LBMC

Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs. 139

LEPSiS

Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations. 17, 95

LESCOT

Laboratoire Ergonomie et Sciences COgnitives pour les Transports. v, vi, 1–4, 17, 20, 22, 23, 27, 34, 195, 225

LIRIS

Laboratoire d'InfoRmatique en Images et Systèmes d'information; UMR CNRS 5205 / Université Lyon1. 20

LIVIC

Laboratoire sur les Interactions Vehicules-Infrastructure-Conducteurs. v, vi, 1, 4, 53, 89

MARGO

plateforme de Mesure et d'Analyse pour l'eRGonomie de le cOnduite. 197, 225

MDT

Mémoire De Travail. 37, 41–43, 48, 50

MLT

Mémoire à Long Terme. 42, 43, 46, 48, 52, 57, 77, 96

QN-MHP

Queueing Network-Model Human Processor. 37, 41, 42, 53, 195

SiVIC

Simulateur Vehicule-Infrastructure-Capteur. v, vi, 4, 5, 53, 86, 89–95, 97, 98, 107–109, 111, 112, 115, 117–123, 125–128, 137–140, 143, 144, 146–148, 160, 170, 189–191, 195, 196, 219, 230, 231, 233, 234

SOAR

State, Operator And Result. 37, 40–43, 53, 190

TIV

Temps Inter-Véhiculaire. 148, 163, 171–173, 177–181, 184–187

TTC

Time To Collision : Temps à la collision. 148

UDP

User Datagram Protocol. 93, 108, 119, 138, 147, 219, 230, 232

XMPP

Extensible Messaging and Presence Protocol. 93, 94, 97, 108, 111–113, 119, 223, 232

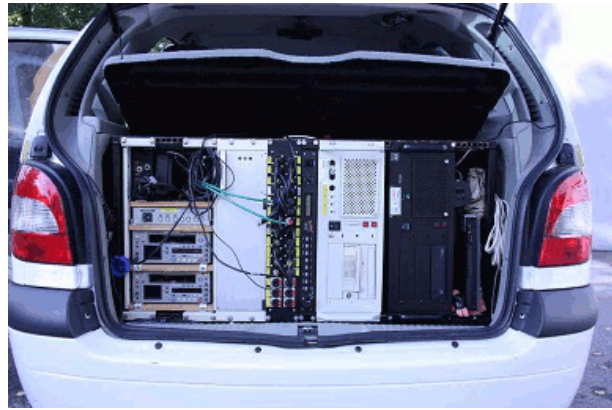
Annexes

.1 Véhicule instrumenté MARGO

Le véhicule instrumenté présent au LESCOT est un Renault Scénic, nommée MARGO (fig 76). Elle concentre toute une gamme de capteurs très différents les uns des autres permettant de mesurer les actions du conducteur (rotation du volant, pourcentage d'enfoncement du frein, etc.), de filmer différentes zones non déterminées (visage du conducteur, roue avant droite, etc.) ou encore d'enregistrer l'état de paramètres du véhicule (clignotant allumé, feux, etc.).



(a) Véhicule MARGO



(b) Coffre du véhicule

FIGURE 76 – Photos du véhicule instrumenté MARGO

Le Véhicule MARGO possède aussi des capteurs de type accéléromètre, gyromètre et GPS pour mesurer sa position, un télémètre laser (que nous voyons sur la figure 76(a), en dessous de l'insigne de la marque) pour la détection des obstacles ponctuels en avant du véhicule. Des ordinateurs présents dans le coffre, alimentés par plusieurs batteries chargées par l'alternateur, sauvegardent en temps réel et de manière synchronisée les informations transmises par les capteurs présents à bord du véhicule et les caméras vidéo.

.2 Simulateur de conduite du LEPSIS

Ce simulateur (figure 77) est basé sur l'architecture SIM², utilisant le modèle de trafic ARCHISIM, permettant la création de scénarii dans des environnements projetés sur un écran pentaptyque ($5 \times (220 \times 165 \text{ cm})$) permettant un champ visuel total de $180 \times 40^\circ$, les rétroviseurs reflétant eux aussi des écrans. Le conducteur prend place dans une cabine à base fixe faite grâce à une Peugeot 308, instrumentée avec des capteurs sur les commandes et le bus de communication de la voiture.

Les simulateurs de conduite permettent d'étudier les conducteurs dans des situations très précises, car l'expérimentateur définit avec exactitude l'environnement dans lequel le conducteur va évoluer et la composante dynamique de chaque scène. Ceci permet de reproduire une situation plusieurs fois pour plusieurs conducteurs, chose qui serait relativement difficile dans le cas d'étude de la conduite naturelle.



(a) Environnement rural



(b) Environnement urbain

FIGURE 77 – Photos du simulateur de conduite de Bron

.3 BIND

BIND¹⁸ est un **framework** de développement Matlab, qui permet de faciliter l'analyse des données expérimentales récoltées soit sur véhicules instrumentés soit sur simulateurs. Cette plateforme pour l'exploitation de données expérimentales permet de manipuler des fichiers de bases de données **SQLite**, de sauvegarder les données de façon structurée dans un format libre, de créer des conteneurs de l'intégralité des données relative à un essai expérimental, d'implémenter et d'utiliser des méthodes d'accès, de traitement et de visualisation des données de manière synchrone grâce à différentes fenêtres graphiques. Cela est rendu possible par l'utilisation du **SQLite**, de la centralisation des données expérimentales, de la structure autodescriptive de la base de données et de la création d'applications graphiques et d'analyses sous matlab permettant la visualisation et le traitement des données.

¹⁸Page du projet BIND : <http://bind-project.inrets.fr/>

.4 ACT-R

Le modèle **ACT-R** est une architecture cognitive principalement développée par John Robert Anderson, qui débute avec **ACT*** (Adaptative Control of Thought) dans [Anderson, 1983] et qui d'après [Newell, 1990] p.29 « *ACT* est, à mon opinion, la première théorie unifiée de la cognition* »¹⁹. C'est en 1993 que **ACT-R** apparaît avec [Anderson et al., 1993], où il se présente comme une théorie unifiée du comportement humain qui peut être utilisé et appliqué dans de nombreux domaines différents.

ACT-R se base sur les connaissances humaines, leur nature et leurs utilisations [Anderson and Lebiere, 1998]. Il distingue deux sortes de connaissances (figure 78) : (i) les connaissances déclaratives et (ii) les connaissances procédurales.

Les connaissances déclaratives sont des connaissances intégrées par l'humain qu'il est capable d'exprimer, des connaissances théoriques liées entre-elles pour former des propositions explicites. Ces connaissances sont des lois, des principes, des règles (e.g. le code de la route) qui ne peuvent pas avoir une emprise sur le monde réel, elles doivent être traduites en propositions pour permettre l'action.

Les connaissances procédurales, quant à elles, sont soumises à l'expérience, à la pratique (e.g. la effectuer la manœuvre de tourne-à-gauche). Elles sont intégrées par la répétition de l'action qui permettra leur apprentissage. L'explicitation de celle-ci n'est pas directement possible.

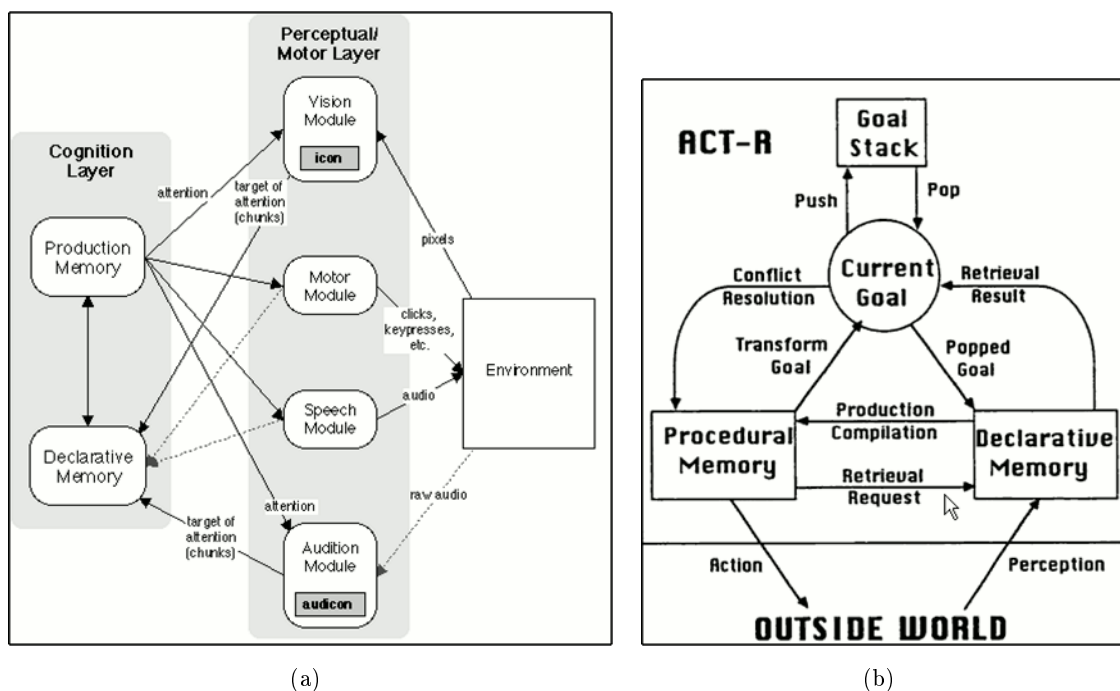


FIGURE 78 – Architecture **ACT-R**

Pour construire les connaissances déclaratives du modèle, **ACT-R** définit une unité de base de la connaissance du modèle : le *chunk*. Cette unité, hiérarchisée, est activable pendant la phase de sélection de prototypes et plus un *chunk(s)* est activé, plus ses chances d'être sélectionné sont grandes.

¹⁹ « *ACT**, in my opinion, is the first unified theory of cognition. »

ACT-R est composé de nombreux modules consacrés au traitement des différentes natures d'informations. Ces modules sont tous encapsulés et communiquent via des *buffers* qui leur sont respectivement attribués. Ces *buffers* contiennent l'information qui leur est disponible à un moment donné. Un *buffer* est l'interface par laquelle le système central interagit avec d'autres modules procéduraux dans le système. C'est grâce à lui que le système central peut faire transiter une information jusqu'à un module particulier.

Mais ACT-R dispose d'un noyau central. Un système de production va pouvoir détecter dans les *buffers* des patterns d'informations et sélectionner une règle de production. Malgré le fonctionnement asynchrone des modules, une seule règle de production peut être sélectionnée à la fois, ce qui définit un système séquentiel. Les modules ne font que proposer via les *buffers* des règles de production que le système de production va sélectionner. C'est l'un des points bloquant pour nous quant à son utilisation pour la simulation de la cognition pendant l'activité de conduite.

Le module de but est seul, il est chargé de maintenir la cohérence locale d'une résolution de problèmes. Les différents buts sont stockés dans une pile (fig. 78(b)), et le but courant est stocké dans le buffer du module.

C'est en 1998 que la couche sensori-motrice est définie avec plusieurs modules, avec l'intégration de EPIC²⁰ dans ACT-R [Byrne and Anderson, 1998]. Les modules intégrés sont pour la perception : le module visuel et le module auditif, pour l'action : le module manuel et le module vocal.

Le module visuel capte l'information visuelle d'une situation et focalise l'attention visuelle. Il possède deux buffers, l'un pour la localisation spatiale des objets et l'autre pour leur signification, un point important qui retient notre attention, car le premier buffer contient des informations qui ne demande que peu de ressources cognitives afin d'être intégrées, l'autre contient des informations demandant une intégration plus complexe. Le module auditif fonctionne de façon similaire au module visuel. Le module action permet au système de production d'effectuer des actions dans le monde, comme manœuvrer effectivement un véhicule [Salvucci et al., 2001].

Le modèle ACT-R possède aussi un point qui nous paraît incompatible avec la simulation cognitive du conducteur automobile : l'impossibilité de construire des mémoires temporaires basées sur un système visuo-spatiale. En effet, la description logique d'un environnement est pertinent pour, par exemple, la prise de décision grâce à un système de règle. Mais une fois que l'environnement est modifiée, si ce n'est que par déplacement du modèle dans son environnement, la reconstruction de la description est très difficile.

²⁰Executive-Process/Interactive Control

.5 Inter-connexion des représentations visuo-spatiales dans SiVIC

Pour la création des représentations mentales, il était possible de (i) intégrer les représentations mentales à la simulation principale de l'environnement ou (ii) créer des instances séparées de SiVIC avec des protocoles de communication permettant la synchronisation partielle avec l'environnement simulé. Nous avons choisi de multiplier les machines et les instances de SiVIC pour augmenter notre capacité de calcul et diminuer la charge sur un seul ordinateur afin de favoriser les développements futurs du modèle.

Pour utiliser la plateforme de simulation selon différentes modalités, il est nécessaire de l'installer sur plusieurs machines, reliées en réseaux, et, ainsi, de les faire communiquer entre elles pour se transmettre différentes informations. Chacune de ces instances de SiVIC possède donc les caractéristiques lui permettant de prétendre à un titre particulier. Par exemple, nous avons commencé par construire l'environnement SiVIC simulant l'environnement réel. Cette instance possède les caractéristiques de « l'instance principale » car sans elle, la simulation ne peut pas exister, faute d'environnement. Ensuite, nous nous sommes dirigés vers une nouvelle instance de SiVIC pour construire la représentation perceptive courante, collectant les informations provenant de la perception. Cette instance prend le titre de « représentation mentale perceptive » car les informations la composant proviennent du module perception de « l'instance principale ». Mais une instance peut par exemple prendre le statut de « représentation mentale perceptive courante » et le statut de « représentation mentale opérationnelle courante », tant que les caractéristiques composant les deux statuts ne sont pas antinomiques. Par exemple, une instance SiVIC ne peut pas être à la fois « représentation tactique courante » et « représentation tactique anticipée ». En revanche, elle peut passer de l'un à l'autre en cas de dérive temporelle de sa situation puis de retour au temps réel.

Le modèle COSMODRIVE intégralement développé sur la plateforme SiVIC nécessitera de nombreuses machines pour permettre la création de toutes les représentations. La figure 79 nous permet de voir la disposition des différentes machines nécessaires à la création des instances simulant les représentations mentales utiles à la modélisation cognitive du conducteur. Comme nous le voyons, le serveur Openfire permettant la communication XMPP centralise les émissions et réceptions de messages. Chaque instance peut ainsi transmettre des informations en direction d'une de ses consoeurs. De plus, la communication haute fréquence et unidirectionnelle par protocole UDP²¹ n'est active qu'entre les représentations mentales perceptives et opérationnelles et l'environnement simulé. Cela permet la synchronisation de certains objets mobiles de la scène routière, intégrés aux représentations.

Il est possible aussi, informatiquement, de faire coexister des informations n'ayant pas le même statut cognitif, comme des zones enveloppes et des informations perceptives. Cette différenciation informatique permet de créer une seule représentation informatique pour deux représentations mentales du modèle cognitif. La visualisation de la représentation rassemble les objets des deux représentations, et les caractéristiques informatiques permettent de les dissocier, mais une seule machine et instance de SiVIC les rassemble. En revanche, le statut bien particulier de

²¹User Datagram Protocol

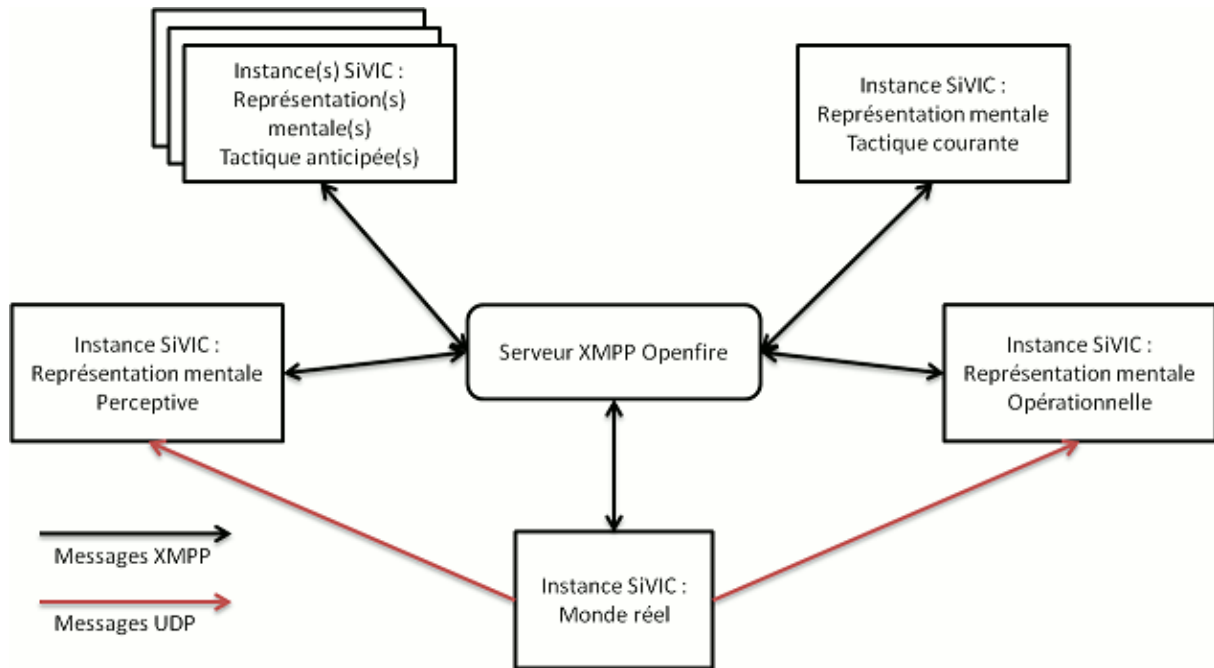


FIGURE 79 – Architecture des différentes instances SiVIC avec leurs communications

la simulation de l'environnement réel demande, pour une meilleure compréhension et de bonnes performances, d'être l'unique simulation intégrée à une instance SiVIC particulière.

Pour les premiers pas de COSMODRIVE sur la plateforme SiVIC, nous avons utilisé deux machines, une pour la simulation de l'environnement et une pour la création d'une représentation mentale regroupant principalement les caractéristiques de la représentation tactique courante, ainsi que les informations perceptives et celles relatives à la représentation mentale opérationnelle comme les zones enveloppes et les points de poursuites. Nous avons agrémenté la représentation mentale tactique pour permettre au modèle de se déplacer dans le monde, et avoir une visualisation d'une représentation fonctionnant en parallèle de l'environnement simulé. Il faut aussi avouer que, pour la simulation cognitive, nous ne possédions que deux machines permettant l'utilisation de la plateforme.

Les représentations mentales sont les sources d'informations pour les processus de décision, anticipation, planification, reconnaissance, etc. Chaque information perçue et extraite de l'environnement va apparaître dans les représentations pour ensuite pouvoir être utilisée par la cognition. La place de l'information dans les représentations est donc primordiale.

.5.1 L'intégration de l'information

Tout d'abord, l'information doit transiter depuis sa source jusqu'aux différentes représentations l'accueillant. Elle peut provenir de l'environnement, en passant par le module perception, pour se diriger vers la représentation perceptive, puis ensuite remonter en direction de la représentation tactique courante ou de la représentation opérationnelle. Il est aussi possible qu'une information provienne du module tactique (e.g. anticipation, activation de schéma, etc.). Elle va alors être intégrée à la représentation tactique courante pour être prise en compte dans la

représentation opérationnelle si nécessaire, mais elle n'apparaîtra pas dans la représentation perceptive.

Pour faire transiter l'information entre les différentes représentations, et donc entre les différentes machines utilisées pour la simulation, nous utilisons le protocole XMPP²² avec le module communication que nous avons développé. Les messages transitant entre les différents modules de communication transportent les informations sous différentes formes. Il est possible de transmettre des ordres d'exécution afin de déclencher une action sur une plateforme où il est possible de transmettre des informations relatives aux caractéristiques d'un objet de la simulation. Par exemple, lorsqu'un objet a été vu pour la première fois, le module perception transmet un ordre de création à la représentation mentale perceptive, permettant de construire l'objet sur la plateforme dédiée. Ensuite, si l'objet observé fait l'objet d'une demande d'information complémentaire, le module perception transmettra par message XMPP l'information demandée sous forme de tableau comportant les différentes caractéristiques et leur valeur respective. De plus, du fait que nous utilisons plusieurs instances d'une même plateforme pour créer les différentes simulations (monde réel, représentations), il a été rendu possible de faire transiter certaines informations nécessitant une haute fréquence par le protocole UDP. Par exemple, dans le cas où le module perception regarde un véhicule en mouvement, la représentation perceptive intègre le véhicule avec construction de l'objet sur la plateforme simulant la représentation, création de l'objet graphique, positionnement et affichage. Toutefois, pendant que le regard est placé sur le véhicule, la synchronisation de la position passe par le protocole UDP, pour obtenir la fluidité de l'affichage des positions successives dans la représentation perceptive. Lorsque le regard se détache du véhicule, la synchronisation est conservée quelques secondes, puis coupée pour que la représentation puisse prendre le relais et extrapoler une position relative du véhicule. Au bout d'un certain temps, le véhicule ne sera donc plus positionné au même endroit que dans la réalité : soit le véhicule a changé de comportement dans le monde et le module perception de l'a pas vu, soit la dérive temporelle sans information crée une différence significative sur la position.

Mais l'intégration d'informations ne se limite pas à leur transmission d'un module à une représentation, elle est aussi présente lors de leur intégration d'une représentations mentales à une autre. Par exemple, une information intégrée dans la représentation perceptive va être intégrée cognitivement jusqu'à la représentation tactique pour être utilisée au sein du module associé. Cette intégration cognitive est une forme de prise de conscience de l'information de la part du conducteur, elle est donc fortement intégrée. Pour cela, nous utilisons le même protocole de communication, mais cette fois, ce sont les processus de génération de représentation et leur fonction de communication qui vont prendre en charge la transmission d'informations. Une information perçue va être intégrée en représentation perceptive. Le module perception, avec son processus de génération de représentation, va prévenir, le cas échéant, les autres modules de la présence de cette nouvelle information, en envoyant un message la contenant. Mais cette intégration cognitive peut être partielle. Par exemple, si un véhicule est perçu dans l'environnement grâce à une requête perceptive ne traitant pas de ce genre d'information (e.g. regarder le piéton présent sur le passage piéton en sortie de carrefour), l'information de la présence du véhicule va être intégrée jusqu'à la représentation tactique, mais l'information relative à la vitesse de ce mobile ne va pas être comprise dans l'ensemble des informations. Il est aussi possible dans ce cas que seule une information contenant la « présence d'un objet mobile non identifié » soit envoyée à la

²²Extensible Messaging and Presence Protocol

5. Inter-connexion des représentations visuo-spatiales dans SiVIC

représentation tactique, ce qui déclenchera certainement une requête perceptive de sa part pour préciser l'objet. Dans ce dernier cas, la représentation tactique courante intégrera en premier lieu un objet graphique non identifié (e.g. un parallépipède rectangle semi-transparent) à la place désignée par l'information (e.g. sur la voie d'en face)

Pour simuler la prise de conscience d'une information, des filtres sont intégrés sur les générateurs de représentation, permettant ainsi à un certain moment de bloquer le passage d'une information entre deux représentations. Par exemple, il est possible que la représentation opérationnelle possède des informations qui ne sont pas présentes dans la représentation tactique, comme la présence d'un obstacle 3,0 s en avant de la position du modèle. Cette information est filtrée tant que l'obstacle ne devient pas critique. Mais si un conflit avec une zone enveloppe apparaît, la prise de conscience de l'obstacle est inévitable, et l'information va être intégrée cognitivement dans le module tactique, pour être prise en compte, afin de prévoir les actions nécessaires à engager. Dans le cas d'une surcharge cognitive, il est possible de simuler grâce aux filtres l'erreur survenant suite à la non-perception, ou la non-prise en compte d'une information.

La figure 80 nous présente deux solutions possibles pour répondre à cette question, la première se base sur des filtres présents entre chaque représentations, la seconde sur un filtre centralisé.

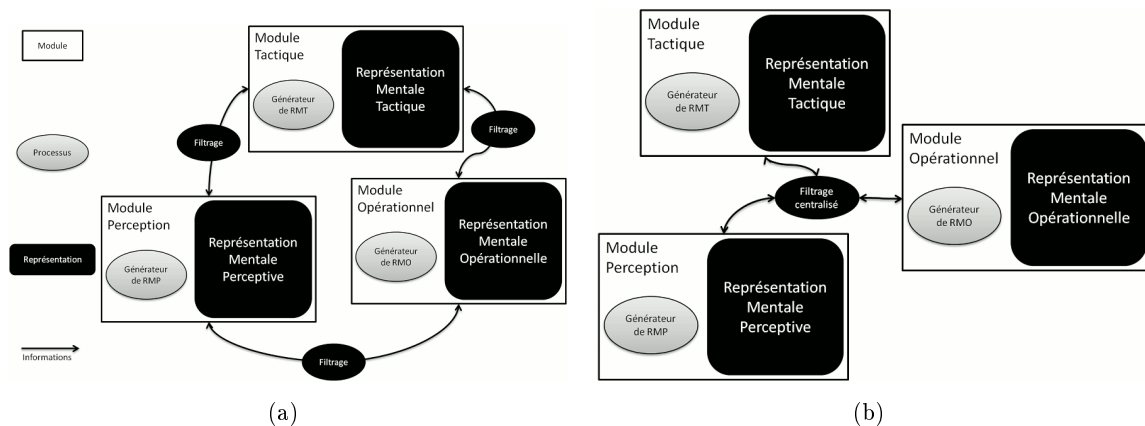


FIGURE 80 – Transmission de l'information dans le modèle COSMODRIVE

Ces deux solutions offrent chacune des avantages différents. La première, possédant un filtre à chaque transmission de l'information, permet de paramétrer différemment chaque processus de filtrage, et ainsi de bien différencier le filtrage relatif à la remontée d'informations en direction du module tactique ou du module opérationnel. La seconde solution offre un système de filtrage central, permettant de distribuer l'information en fonction de sa nature, de sa provenance et de sa destination. Par exemple, une information perceptive demandée par le module tactique peut être envoyée au module opérationnel si elle est pertinente pour lui. Dans la première solution, cette transmission d'informations demande deux envois distincts : un en direction du module tactique, l'autre vers le module opérationnel.

5.2 L'existence de l'information et son utilisation

Grâce à la plateforme SiVIC, l'existence de l'information peut prendre plusieurs formes. En effet, il est possible de faire exister une information au sens informatique du terme, il est possible de construire un objet, avec toutes ses caractéristiques, et de le faire fonctionner tout à

fait normalement (e.g. un modèle de véhicule), mais de ne pas l'afficher. Cela permet de définir l'existence de l'information dans une représentation comme étant la visibilité de cette information sur la sortie graphique de la plateforme. Ainsi, il est possible de faire intervenir des objets dans la simulation sans qu'ils soient visibles, ce qui entraîne des facilités de développement du modèle. En effet, l'informatique apporte parfois des limites que nous avons présentées à la section 4.7, mais le fait de pouvoir créer un objet avant de l'intégrer véritablement dans la représentation, ou de pouvoir créer des objets invisibles dans le monde simulé peut permettre quelques raccourcis informatiques pour contourner certains problèmes. L'utilisation des graphes est, par exemple, friande de ce type d'utilisation de l'information.

Mais l'information peut être représentée autrement que par une représentation visuo-spatiale. En effet, la plateforme **SiVIC** et notre interface d'utilisation permettent la construction de listes d'objets présents dans la simulation, ou de listes d'objets visibles, ou d'autres listes. Ceci permet de présenter et d'utiliser l'information différemment. De nombreuses solutions de présentation de l'information présente au sein d'une plateforme sont possibles, mais la présentation ne change en rien à l'information en elle-même. Celle-ci n'est pas modifiée et grâce au système d'objets et de pointeurs apportés par le langage **C++** que nous utilisons, l'information est entièrement accessible dès que l'objet est créé au sein de la plateforme. Une liste comprenant les objets visibles de la simulation utilisera donc les mêmes objets informatiques que la liste de tous les objets de la simulation. Nous pouvons donc ainsi penser à la construction de description fonctionnelle ou propositionnelle de l'environnement, comme dans les modèles du conducteur présentés en section 2.4.