



Conscience du risque et automatisisation de la conduite : de l'analyse des processus cognitifs en situation de changement de voie à la conception centrée sur l'humain d'un système d'automatisation human-like

Jonathan Deniel

► To cite this version:

Jonathan Deniel. Conscience du risque et automatisisation de la conduite : de l'analyse des processus cognitifs en situation de changement de voie à la conception centrée sur l'humain d'un système d'automatisation human-like. Automatique. Université de Bordeaux, 2019. Français. NNT : 2019BORD0445 . tel-02997729

HAL Id: tel-02997729

<https://theses.hal.science/tel-02997729>

Submitted on 10 Nov 2020

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

Spécialité

Ingénierie Cognitive

ÉCOLE DOCTORALE

DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR
ED 209

Défendue par

Jonathan DENIEL

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

Sujet de la thèse :

Conscience du risque et automatisation de la conduite :
De l'analyse des processus cognitifs en situation de changement de voie à la
conception centrée sur l'humain d'un système d'automatisation *Human-like*

Sous la direction de : **Bernard Claverie**
(Co-directeur : **Thierry Bellet**)

Soutenue le 20 Décembre 2019

Devant le jury composé de :

Pr. Véronique DESCHODT - ARSAC	Présidente	IMS - Université de Bordeaux
Pr. Guy BOY	Rapporteur	Centrale Supélec - ESTIA
Pr. Anabela SIMOES	Rapporteur	Universidade Lusófona de Lisboa
Pr. Bernard CLAVERIE	Directeur	ENSC - Institut Polytechnique de Bordeaux
Dr. Thierry BELLET	Co-Directeur	LESCOT - IFSTTAR

Résumé :

La conduite automobile est une activité aussi complexe que répandue. Parmi les manœuvres les plus courantes exécutées par les conducteurs, nous trouvons le changement de voie (CDV) avec insertion entre des véhicules du trafic. Les progrès technologiques récents ouvrent la voie à une automatisation progressive des diverses composantes de l'activité de conduite dont, entre autres, le changement de voie.

Nos objectifs dans ce travail de thèse en ingénierie cognitive étaient triples : (1) Mieux comprendre et modéliser les processus cognitifs du conducteur à l'œuvre lors de la prise de décision et de l'exécution d'un CDV en conduite manuelle (en particulier concernant l'évaluation subjective du risque), en vue d'alimenter le développement du modèle COSMODRIVE ([Bellet et al., 2003]), (2) Concevoir et évaluer un automate *Human-like* capable d'exécuter un CDV à la manière d'un conducteur humain (ce deuxième objectif permettant également de traiter de questionnements concernant l'acceptation de ce type d'automate), (3) Étudier les éventuels effets induits par l'utilisation de cette fonctionnalité d'automatisation du CDV sur les décisions et les jugements subjectifs lors de situations de CDV en conduite manuelle ultérieures.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons mis en place un protocole de recherche sur la plateforme de simulation V-HCD, divisé en trois volets expérimentaux imbriqués et impliquant les mêmes participants pour chacun d'entre eux. Dans le cadre de ce protocole, les participants ont tout d'abord été invités à prendre des décisions de CDV et à évaluer le risque situationnel lors de la réalisation de cette manœuvre en conduite manuelle. Dans un second temps, ils devaient utiliser et évaluer un automate *Human-like* en charge de réaliser la manœuvre de CDV de façon automatisée. Enfin, dans un troisième temps, il leur était demandé de conduire de nouveau manuellement et à prendre des décisions de CDV pour des situations de conduite spécifiquement paramétrées pour s'approcher de leur seuil de décision initial (estimé à partir d'une analyse en direct de leurs propres décisions prises lors de la première phase de conduite manuelle), afin d'évaluer si l'expérience d'utilisation de l'automate avait ou non affecté leur conscience du risque.

Les résultats obtenus nous ont permis d'identifier une stratégie d'insertion dans un espace du trafic lors du CDV permettant, sur la base de la théorie des zones enveloppes, d'expliquer la structuration des décisions d'exécution de la manœuvre. Concernant l'automate *Human-like*, nous avons constaté une acceptation meilleure que prévu par les participants, y compris de la part des plus réfractaires au véhicule automatisé. Nous avons aussi montré une diminution de l'estimation du risque de la situation et de la manœuvre de CDV lorsque celle-ci était exécutée par l'automate. Nous avons également validé la dimension *Human-like* de la trajectoire de CDV réalisée par l'automate. Enfin, nous avons pu mettre en évidence un effet induit par l'utilisation de l'automate lors de situations de CDV en conduite manuelle post-automatisation, se traduisant par une diminution du seuil de décision comme de l'évaluation du niveau de risque.

Ces résultats tendent à montrer que, si elle nécessite une vigilance à propos des effets potentiellement induits, la démarche de conception centrée sur l'humain de systèmes d'automatisation de la conduite *Human-like* est prometteuse en matière d'acceptation de la technologie.

Mots clés : Ingénierie Cognitive, Conception centrée sur l'Humain, Modélisation cognitive du conducteur, Conscience du risque, Changement de voie, Automatisation de la conduite, Automate Human-like, Acceptabilité, Effets induits par l'automatisation

Risk awareness and vehicle automation :

From the analysis of cognitive processes in a lane change situation to the human-centered design of a textit Human-like automation system

Abstract :

Driving activity is both widespread and very complex. Among the most frequently executed manoeuvres, we identified the lane change (LC) with insertion between traffic vehicles. Current improvements in the field of driving automation are progressively paving the way for the gradual automation of the various components of the driving activity, including, among other things, lane changes.

Our purposes, in this thesis work in cognitive engineering, were (1) a better understanding and contribution to the modeling of the driver's cognitive processes at work when making decisions and performing LC in manual driving (especially regarding the subjective risk assessment), in order to feed the development of the COSMODRIVE model ([Bellet et al., 2003]). (2) Design and evaluate a *Human-like* automation capable of executing a LC as a human driver would do. This second objective also makes it possible to address questions about the acceptance of the behaviour of this type of automation. (3) Study the possible effects induced by the use of this LC automation, on decisions and judgments regarding lane change situations in subsequent manual driving situations.

To achieve these objectives, we set up a research protocol (on the V-HCD driving simulation platform) divided into three intertwined experimental phases and involving the same participants for each of them. Participants were first invited to make decisions on LC situations and to assess the situational risk and acceptability of a hypothetical automated LC system. Then, in the second phase, they were invited to use and evaluate a *Human-like* LC automation we designed for this experiment. Finally, in the last phase, participants were instructed to drive again manually and to make LC decisions in driving situations that were specially configured to match their very own decision threshold (estimated from a direct analysis of their previous decisions during the first manual driving phase).

The results obtained led us to identify a traffic merging strategy within the LC manoeuvre allowing us, with the help of the envelope zones theory, to explain the structure of the LC decisions. Concerning the human-like LC automation, we found a better acceptance of the system by the participants than expected, even from the most reluctants to the autonomous vehicle. We also showed a decrease in the risk estimation of the situation and the manoeuvre when it was performed by the automation. We additionally validated the *Human-like* aspect of our automation's LC trajectory. Finally, we were able to highlight the occurrence of an effect induced by the use of the automation during later manual driving LC situations. This induced effect was resulting in a lowering of the decision threshold as well as the risk assessment of the LC manoeuvre to be executed. These results suggest that the human-centred approach to design driving automation systems is promising in terms of technology acceptance and adoption. However they may present some potential induced "*side*" effects that will require deeper investigation.

Keywords : Cognitive Engineering, Human-centered Design, Cognitive Modeling, Risk Awareness, Lane Change Manoeuvre, Human-like Automata, Acceptability, Induced Effects of Automation

Remerciements

Si je ne me trompais pas en imaginant que l'écriture d'une thèse était une épreuve difficile et presque initiatique, je ne mesurais pas la difficulté de la rédaction des remerciements. Non qu'il faille me creuser les méninges pour trouver qui remercier, mais au contraire que je doive employer une sorte d'ingéniosité pour tenter, avec mes modestes moyens, de parvenir en si peu de lignes à témoigner ma gratitude à sa juste hauteur, à tous ceux qui ont contribué à l'aboutissement de ce projet.

En tout premier lieu, je souhaite remercier les membres du jury : Mme la Professeur Anabela Simões et M. le Professeur Guy André Boy pour avoir donné leur accord pour être les rapporteurs pour ce travail de thèse. Je remercie également Mme. la Professeur Véronique Deschodt-Arsac, présidente du jury d'examen de cette thèse. Merci à vous d'avoir pris de votre précieux temps pour mettre mon travail à l'épreuve de votre expertise.

Je remercie M. le Professeur Bernard Claverie pour avoir accepté de diriger cette thèse. Je remercie également le Docteur Thierry Bellet pour avoir codirigé ce travail et pour son encadrement au sein du laboratoire LESCOT à l'IFSTTAR ; merci à vous pour avoir eu la patience de progressivement m'enrichir et de me transmettre le savoir faire du chercheur, pour m'avoir guidé, pour avoir repris mes faux pas et pour m'avoir incité au progrès et à l'exigence. Je tiens tout particulièrement à souligner votre bienveillance au cours de ces trois années de travail.

Merci aussi au Docteur Jean-Charles Bornard qui, bien au delà de son aide intellectuelle et scientifique, m'a montré le chemin, rassuré et poussé vers la constante amélioration. Quelques lignes de remerciements ne rendront jamais ce que tu as su m'apporter tout au long de ces années. Ce n'est pas le chercheur mais l'ami que je souhaite ici avant tout saluer.

Je remercie la direction et plus généralement toute l'équipe du laboratoire LESCOT et de l'institut IFSTTAR pour avoir créé les conditions humaines et matérielles les plus favorables à l'aboutissement de ce projet.

Je remercie spécialement Bertrand Richard pour son incroyable travail et sa rigueur dans le développement des outils qui furent nécessaires à la réalisation de mon expérimentation, ici encore c'est un véritable ami qui s'est révélé au travers de notre relation professionnelle. Merci également à Romain Derollepot, Fabien Moreau, Daniel Ndiaye et Joshua Quick pour leur assistance à la mise en place technique de l'expérimentation. C'est toujours un immense plaisir de travailler avec vous. Merci enfin à Guillaume Saint Pierre pour ses conseils avisés en matière de statistiques.

Merci aussi à Audrey, pour avoir supporté les difficiles conditions de travail que j'impose au bureau L327. Merci à tous les membres du laboratoire, Seb, Evan, Alex, Guillaume, Adolphe, Isa, Marie, Caro, Matt, Christophe, Nathalie, Myriam et tous les autres que, pour des raisons de concision, je ne pourrai pas exhaustivement citer ici ; aux chercheurs, doctorants, CDD et stagiaires pour votre accueil, vos conseils, votre bonne humeur et votre tolérance. Merci d'avoir supporté mon étrange humour autant que ma logorrhée.

Viennent à présent les remerciements plus personnels. Je souhaite une nouvelle fois ici plus personnellement, remercier M. Thierry Bellet qui, bien au delà de son statut de codirecteur et d'encadrant, a su, par un judicieux mélange d'humanité et de vivacité d'esprit, me faire grandir en tant qu'apprenti chercheur.

Merci entre autres à Julien Perez qui par son passage m'a transmis sa joie, sa motivation et son amitié.

Merci à mes parents pour leur grande patience et leur indéfectible soutien. Je sais vous avoir imposé

bien des difficultés tout au long de mon sinueux et chaotique parcours, pourtant, jamais vous n'avez perdu espoir, jamais vous n'avez cessé de m'apporter bienveillance et affection. Nul remerciement ne saura témoigner de l'immensité de la reconnaissance que j'ai envers vous.

Merci à Johanna et Lucas, je suis l'aîné et pourtant vous êtes mes modèles. Que ce soit par votre tolérance ou vos brillants esprits, vous m'inspirez. Merci aussi aux autres membres de ma famille proche et à mes grands-parents qui, malgré la distance, continuent à me soutenir et m'encourager.

Ma chère Suzanne, comment te remercier, toi qui as immédiatement su comprendre l'enjeu, toi qui as accepté la difficile épreuve sans jamais laisser filtrer une once de reproche ? Merci pour ton amour et ton abnégation, merci pour ta présence. Le chemin commence, à nous de le parcourir.

Merci Phœnix et Fantaisie, vous ne parlez pas, vous êtes insondables mais pourtant, comme par enchantement, vous avez su, à votre façon, apprendre à marcher à mes côtés.

Table des matières

Introduction générale	1
Contexte de la recherche	1
Organisation du mémoire	2
 I Contexte théorique	 5
1 La conduite automobile : modélisation cognitive	7
1.1 L'activité de conduite automobile	7
1.1.1 Contraintes et complexité de la tâche de conduite	7
1.2 Modéliser l'activité de conduite automobile et la cognition du conducteur	9
1.2.1 La conduite, une activité complexe à décrire : l'approche taxinomique	9
1.2.2 Le contrôle de la position du véhicule : les modèles de régulation	10
1.2.3 Le contrôle de l'activité : les modèles de la tâche de conduite	10
1.2.4 Les modèles de simulation numérique du conducteur	13
1.2.5 Le problème des méthodes de modélisation : à quoi doit répondre un modèle ?	15
1.3 La modélisation du conducteur au LESCOT : le modèle COSMODRIVE	16
1.3.1 L'architecture du système cognitif	16
1.3.2 Architecture modulaire du modèle COSMODRIVE	18
1.3.3 Les représentations mentales, le rôle central de la conscience de la situation	19
1.3.4 Les schémas de conduite	21
1.3.5 Les Zones Enveloppes	24
 2 Le risque et son évaluation en situation de conduite automobile	 27
2.1 Généralités sur la notion de risque	27
2.1.1 Définition de la notion de risque	27
2.1.2 L'évaluation subjective du risque ou « Perception du Risque »	29
2.2 Les modèles cognitifs de l'évaluation du risque par le conducteur	33
2.2.1 Les premières conceptions de l'évaluation du risque en conduite automobile	33
2.2.2 L'étude princeps de Taylor (1964)	33
2.2.3 Le modèle du risque zéro (1974)	34
2.2.4 Le modèle d'homéostasie du risque (1982)	36
2.2.5 Le modèle d'évitement de la menace (1984)	42
2.2.6 Le modèle hiérarchique du risque (1988)	43
2.2.7 Le modèle d'allostasie du risque (2000 - 2008)	46
2.2.8 Le modèle du moniteur de risque (2007)	49
2.3 De la perception du risque à la conscience du risque dans cadre du modèle COSMO-DRIVE (2010)	50
2.3.1 Détection du risque et évaluation subjective du risque	51

Table des matières

2.3.2	De la conscience à la gestion du risque : les zones enveloppes et les matrices de conflit	53
2.3.3	Prise de décision et gestion du risque en situation de tourne à gauche	54
3	Le changement de voie en conduite automobile	59
3.1	Généralités sur la manœuvre de changement de voie	59
3.2	Revue de la littérature sur les changements de voie	60
3.2.1	Les différentes approches	61
3.2.2	Les étapes et indicateurs de changement de voie	61
3.2.3	Premier bilan des études de la manœuvre de changement de voie	69
3.3	L'étude du changement de voie dans le cadre des travaux sur COSMODRIVE	70
3.3.1	L'analyse de traces d'activités	71
3.3.2	Le schéma du changement de voie	71
3.3.3	Les simulations de changement de voie avec COSMODRIVE	73
3.3.4	Bilan des travaux sur le changement dans le cadre du modèle COSMODRIVE	74
3.4	Le changement de voie par insertion dans un espace du trafic	74
3.4.1	La situation de changement de voie	74
3.4.2	La question des décisions de changement de voie	75
3.4.3	L'évaluation du risque dans cette situation	76
3.4.4	La question du placement dans l'espace d'insertion	79
4	Automatisation du changement de voie : conception et acceptation	81
4.1	Les assistances et l'automatisation de la conduite	81
4.1.1	L'automatisation de la conduite, un défi technologique	81
4.1.2	Les niveaux d'automatisation de la conduite	84
4.1.3	Automatisation et approche centrée sur l'humain	86
4.1.4	L'acceptabilité et l'acceptation, quelques généralités	88
4.1.5	L'approche <i>Human - Like</i>	89
4.2	Conception d'un automate <i>Human-like</i> pour le changement de voie automatisé	90
4.2.1	Considérations pour l'aspect <i>Human-like</i> du système de changement de voie automatisé	90
4.2.2	Bilan des questions concernant le changement de voie automatisé	94
4.3	Mesure des effets de l'automatisation sur la conscience et la gestion du risque en conduite manuelle	95
4.3.1	Contexte et motifs de l'étude de la conduite manuelle après expérience de l'automatisation	95
4.3.2	Situations d'étude de l'après utilisation du système de CDV automatisé	96
4.3.3	Déterminer la zone de changement de décision	96

II	Problématique et méthodologie	99
5	Synthèse de la problématique et des questions de recherches	101
5.1	Synthèse du contexte et de la problématique	101
5.2	Principales questions de recherche	102
5.3	Questions et hypothèses relatives au changement de voie en conduite manuelle	102
5.4	Questions et hypothèses relatives à la conception d'un système de CDV automatisé et à son acceptation	103
5.5	Questions et hypothèses relatives à l'effet induit par l'expérience d'utilisation du système de CDV automatisé, sur la conscience et la gestion du risque en conduite manuelle . .	105
5.6	Une démarche cognitique pour le protocole expérimental	105
6	Protocole Expérimental	107
6.1	Protocole général	107
6.1.1	Procédure globale	107
6.1.2	Données à recueillir	110
6.1.3	Le simulateur de conduite	115
6.1.4	La plate-forme V-HCD : Virtual - Human Centered Design	116
6.2	Volet 1 : Méthodologie pour l'analyse de la conduite manuelle	120
6.2.1	Situation de conduite	120
6.2.2	Déroulement technique des situations de conduite manuelle	120
6.2.3	Questionnaire post-situationnel	122
6.3	Volet 2 : Méthodologie de conception, de simulation et d'évaluation d'un système de changement de voie automatisé	123
6.3.1	Conception de la fonction de CDV <i>Human-like</i>	123
6.3.2	Présentation et développement de l'automate du CDV automatique pour une implémentation sur simulateur de conduite	124
6.3.3	Implémentation sur simulateur pour permettre une expérience utilisateur immersive de la fonction de CDV automatique	127
6.3.4	Méthodologie d'évaluation de l'acceptation de l'automate par l'utilisateur . . .	128
6.4	Volet 3 : Méthodologie pour l'analyse des effets induits par l'utilisation du système de CDV automatisé	129
6.4.1	Algorithme de choix des situations de conduite post-automatisation	129
6.4.2	Situations présentées	130
6.5	Déroulement d'une passation et instructions aux participants	131
6.5.1	Consentement, informations générales et questionnaires généraux	132
6.5.2	Entraînements et consignes	132
6.5.3	Volet 1 : Conduite manuelle	133
6.5.4	Volet 2 : Utilisation du système de changement de voie automatisé	134
6.5.5	Volet 3 : Conduite manuelle après utilisation du système d'automatisation du changement de voie	134
6.5.6	Entretien de fin d'expérimentation	134

III	Résultats	137
7	Résultats	139
7.1	Description générale des données	139
7.1.1	Préambule aux analyses	139
7.1.2	Méthodes statistiques employées	139
7.1.3	Note concernant les données d'oculométrie	140
7.1.4	Participants	140
7.2	Volet 1 : Résultats concernant les changements de voie en conduite manuelle	143
7.2.1	Décisions de changement de voie	143
7.2.2	Données d'évaluations subjectives issues des questionnaires post-situationnels	151
7.2.3	Exécution de la manœuvre et insertion dans le gap	164
7.2.4	Synthèse des résultats concernant le changement de voie en conduite manuelle	168
7.3	Volet 2 : Résultats concernant l'utilisation du système de changement de voie automatisé <i>Human-like</i>	170
7.3.1	Criticité de la situation	170
7.3.2	Évaluation de la difficulté du changement de voie	172
7.3.3	Acceptation du système de CDV automatique	176
7.3.4	Maîtrise de la situation par l'automate	180
7.3.5	Confiance dans l'automate	184
7.3.6	Bilan concernant l'acceptation de l'automate de CDV, et généralisation de nos résultats	186
7.3.7	Évaluation du caractère « <i>Human-like</i> » de l'automate	190
7.4	Volet 3 : Résultats concernant les effets de l'expérience de l'utilisation du système de changement de voie automatisé	195
7.4.1	Validité des situations de conduite post-automatisation	195
7.4.2	Décisions de changement de voie	196
7.4.3	Évolution de l'évaluation subjective du risque des changements de voie	198
7.4.4	Difficulté des changements de voie	200
7.4.5	Acceptabilité d'un système automatisant le changement de voie	202
7.4.6	Temps intervéhiculaire et conflits de Zones Enveloppes	203
7.4.7	Bilan des résultats sur l'effet à posteriori de l'utilisation de l'automate de CDV	204

IV	Discussion	207
8	Discussion	209
8.1	Discussion des résultats concernant les changements de voie en conduite manuelle . . .	209
8.1.1	Décisions de changement de voie	209
8.1.2	Discussion des résultats concernant les évaluations subjectives	210
8.1.3	Discussion des résultats portant sur l'insertion dans le gap lors des changement de voie manuels	213
8.1.4	Apports de l'étude à la modélisation du changement de voie en conduite manuelle	216
8.2	Discussion des résultats concernant l'utilisation du système de changement de voie automatisé	219
8.2.1	Criticité de la situation	219
8.2.2	Difficulté de la manœuvre	220
8.2.3	Acceptation de l'automate	221
8.2.4	Maîtrise de la situation par l'automate	222
8.2.5	Confiance dans l'automate	223
8.2.6	Position d'insertion dans le gap et TIV	223
8.2.7	Position dans la voie et trajectoires	224
8.2.8	Apport de la recherche pour la conception d'un système de CDV automatisé Human-like	225
8.3	Discussion des résultats concernant les effets induits par l'expérience du système de CDV automatisé sur la conduite manuelle	227
8.3.1	Décisions de changement de voie	227
8.3.2	Évaluations subjectives de risque, de difficulté et acceptation à posteriori . . .	228
8.3.3	Apports de l'étude concernant les effets induits par l'utilisation du système de CDV automatisé	229
8.4	Apports pour le modèle COSMODRIVE	230
8.5	Discussion de la méthodologie employée et des résultats obtenus	230
	Conclusion	233
	Bibliographie	243
	Glossaire	253
	Annexes	255
A	Table des enregistrements RTMaps	257
B	Questionnaire d'acceptabilité générale	259
C	Acceptabilité générale a priori, résultats détaillés	261
D	Criticité suivant la décision de changement de voie	263

Introduction générale

Contexte et objectifs de la recherche

Ce travail de thèse en « ingénierie cognitive » porte sur l'analyse des comportements de conduite et la modélisation des processus cognitifs impliqués dans l'évaluation et la gestion des risques en situation de Changement De Voie (CDV) sur autoroute. L'objectif est aussi d'utiliser ces travaux de modélisation cognitive pour la conception centrée sur l'Humain de futures fonctions d'automatisation de la manœuvre de CDV. Ces considérations scientifiques, tout autant que les manques identifiés dans la littérature, nous ont conduit à nous focaliser sur une situation de conduite particulière : le changement de voie non obligatoire sur autoroute, avec insertion entre deux véhicules dans le trafic situés sur la voie de destination (i.e. voie de gauche). Le choix de cette manoeuvre particulière sera discuté et justifié dans le mémoire.

Cette thèse porte plus spécifiquement sur les dimensions relatives à l'évaluation subjective des risques de la situation de conduite, ainsi que sur celles du risque pris (volontairement ou par erreur) lorsque le changement de voie est engagé. Du point de vue de l'analyse de la cognition et de l'activité du conducteur, ce travail se situe dans le cadre général du programme COSMODRIVE de modélisation et de simulation de la cognition du conducteur engagé au LESCOT depuis une vingtaine d'années. Il visera donc à son enrichissement.

Toutefois, cette thèse ne vise pas seulement à l'analyse et à la modélisation des processus cognitifs de la conscience du risque. Elle vise également à soutenir une démarche de conception centrée sur l'Humain de futures fonctions de changement de voie automatisé selon une approche dite « *Human-like* ». Par *Human-like*, nous entendons ici système automatique capable de reproduire les comportements de conduite et les stratégies de gestion du risque de l'humain, avec l'objectif final de rendre les décisions et les actions de l'automate plus intelligibles et plus acceptables par l'utilisateur. En effet, la progression actuelle des technologies d'automatisation des différents aspects de la conduite automobile et leur acceptation représente un enjeu stratégique majeur pour l'industrie automobile comme pour la mobilité de demain. Parmi les fonctions d'automatisation en cours de développement, le changement de voie occupe actuellement une place privilégiée en vue d'accroître l'autonomie du véhicule automatisé (aujourd'hui encore largement limité au seul maintien dans sa voie de circulation).

Pourtant, peu de solutions sont envisagées dans une philosophie *Human-like*. Dans ce contexte d'ingénierie pour la conception de systèmes d'automatisation de la conduite, le comportement humain est habituellement considéré comme un objet d'étude pour améliorer la lecture, la sémantisation et l'anticipation du comportement des autres usagers impliqués dans les situations routières à gérer par le système développé.

Nous proposons ici d'utiliser en première approximation le modèle de simulation COSMODRIVE pour paramétrer un système d'automatisation du changement de voie et en évaluer, d'un côté, l'acceptation par les conducteurs et de l'autre, discuter, raffiner et critiquer ce paramétrage sur la base de l'analyse de données issues de changements de voies effectués manuellement. Notre démarche nous conduira donc, dans un premier temps, à étudier les changements de voie effectués manuellement puis, dans un second temps, à étudier comment les changements de voies effectués par le système d'automatisation de la manœuvre sont vécus et évalués. Dans un dernier temps, nous nous intéressons à l'effet

Introduction générale

de l'expérience vécue de l'utilisation de ce système de changement de voie automatisé sur l'évaluation et la gestion du risque de situations de changement de voie après reprise de la conduite en condition manuelle.

Pour traiter ces questions d'une manière complémentaire, nous avons conçu un protocole composé de trois phases successives interdépendantes, d'une durée totale d'environ 4h30. Dans ce protocole, les mêmes participants ont pris part aux trois phases expérimentales. Ils étaient d'abord confrontés à un certain nombre de situations de changement de voie contrôlées et répétées afin de relever leurs décisions, comportements et évaluations subjectives concernant, entre autres, le risque situationnel. Ils étaient ensuite amenés à vivre un nombre équivalent de situations de changement de voie prises en charge par le système de changement de voie *Human-like* automatisé, afin que l'on puisse recueillir et analyser leur acceptation du système ainsi que l'éventuelle évolution de leurs évaluations de risque subjectif. Dans un troisième temps, de nouvelles situations de changement de voie en conduite manuelle leur ont été présentées. Ces situations avaient pour particularité d'avoir été définies sur la base d'une analyse automatique de leurs décisions lors de la première phase expérimentale (i.e. conduite manuelle). Cette analyse visait à approximer leur seuil individuel de décision. Cette dernière phase présentait donc la particularité d'être spécifiquement adaptée à chaque conducteur afin de mesurer un potentiel effet du vécu du système de changement de voie automatisé au niveau de son *seuil* de décision particulier. Ce protocole particulier présentait donc l'avantage d'une meilleure liaison des questions de recherche autant dans notre cadre théorique que sur le plan méthodologique.

La seconde partie de ce chapitre introductif présente de manière plus détaillée la structure et l'organisation du manuscrit.

Organisation du mémoire

Ce mémoire comporte quatre parties principales. La première est destinée à bâtir le contexte théorique dans lequel nous nous inscrivons. La seconde vise à exposer les questions de recherche identifiées à l'issue de notre revue de la littérature, ainsi qu'à présenter le protocole expérimental que nous avons développé durant cette thèse pour investiguer ces mêmes questions. La troisième partie est dévolue à la présentation des résultats que nous avons obtenus, et la dernière partie est dédiée à la discussion de ces résultats.

Première partie : Contexte théorique

La première partie, dédiée au cadrage théorique et bibliographique, explore au travers des quatre chapitres qui la composent, les connaissances et le contexte théorique des principaux aspects sur lequel porte notre travail.

Le **premier chapitre** se concentre sur une présentation générale de l'activité de la conduite automobile ainsi que des méthodologies d'étude et de modélisation de la cognition du conducteur. Nous verrons au travers des différentes sections de ce chapitre, à la fois la manière dont l'activité de conduite a pu être décomposée et comment les différentes fonctions cognitives qu'elle implique ont pu être mises en évidence et articulées dans différentes démarches de modélisation. Nous consacrerons dans ce chapitre, une large partie au développement et à l'exposition du modèle cadre de notre recherche : COSMODRIVE. Ce premier chapitre posera ainsi les premières pierres de notre conception de la cognition du conducteur et les grandes lignes du modèle que nous cherchons à alimenter au travers de

ce travail de thèse.

Le **second chapitre** introduira la thématique du risque et celle de son évaluation par le conducteur humain. Comme pour le précédent, nous partirons dans un premier temps d'un bilan synthétique et historique de la notion de risque et des travaux de recherche dédiés à son évaluation subjective. Nous présenterons ensuite différents modèles de l'évaluation subjective du risque développés dans le cadre de la conduite automobile, nous ferons alors état des différentes approches et de leurs éventuelles prédictions. Nous présenterons enfin les travaux dédiés à cette question qui ont été effectués au LES-COT dans le cadre de l'approche COSMODRIVE. Ce bilan nous offrira l'occasion de montrer comment ce modèle de la cognition du conducteur permet d'inclure l'évaluation subjective du risque au travers de la notion de « conscience du risque ».

Le **troisième chapitre** sera quant à lui dédié à la manœuvre de changement de voie. Il nous permettra de préciser les connaissances relevées dans la littérature concernant cette manœuvre particulière. Au travers de ce chapitre, nous identifierons notamment quels sont les principaux indicateurs utilisés dans l'étude de cette situation de conduite, et nous montrerons également que certains aspects de cette manœuvre ont été peu étudiés. Nous exposerons enfin les premiers résultats qui ont été obtenus concernant cette manœuvre dans le cadre des travaux de recherches associés au modèle COSMODRIVE. Cet état des lieux nous permettra alors de préciser plus clairement la définition de notre situation d'étude ainsi que les contours de nos premières questions de recherche concernant le changement de voie en conduite manuelle.

Le **quatrième chapitre** clôturant cette partie théorique, sera dédié à la problématique de l'automatisation de la conduite et en particulier du changement de voie. Nous y traiterons aussi des questions d'acceptabilité (avant usage) et d'acceptation (après usage) de technologies d'automatisation de la conduite, ainsi que de la problématique de la conception d'assistances *Human-like* pour automatiser la manœuvre de CDV. Nous dresserons dans un premier temps un tableau synthétique des grandes questions concernant l'automatisation de la conduite automobile et la démarche de conception centrée sur l'humain. Nous introduirons ensuite les conceptions et recherches dédiées à l'acceptabilité et l'acceptation des assistances et technologies d'automatisation de la conduite avant d'introduire la notion d'assistance *Human-like*. Cette présentation nous amènera à poser les questionnements scientifiques de ce travail de thèse sur l'automatisation, la conception d'un système de changement de voie *Human-like* ainsi que sur l'acceptation et l'acceptabilité. Sur cette base nous produirons les spécifications pour la conception d'un système de CDV automatisé que nous soumettrons aux participants lors de notre expérimentation. Ce travail nous permettra enfin de soulever la problématique de l'effet de l'expérience d'un système de changement de voie automatisé sur la conduite manuelle ultérieure en situation de décision de changement de voie.

Au terme de cette première partie nous disposerons de tous les éléments contextuels et théoriques nécessaires à la définition de nos questions de recherche, à la formulation de nos hypothèses ainsi qu'à l'élaboration du protocole expérimental destiné à y répondre.

Seconde partie : Problématique et méthodologie

La seconde partie du manuscrit se décompose en 2 chapitres dédiés respectivement au rappel de nos questions de recherche et à la définition de notre protocole expérimental.

Le **cinquième chapitre** visera ainsi à présenter nos questions et nos hypothèses de recherche. Nous y présenterons la structuration de notre questionnement selon trois axes principaux : les ques-

Introduction générale

tionnements relatifs à la conduite manuelle, ceux relatifs à l'utilisation et à l'acceptation d'un système de changement de voie *Human-like* automatisé, et enfin ceux concernant les effets induits par l'usage d'un CDV automatique sur la conduite manuelle. Concernant la conduite manuelle, nous préciserons nos questionnements à propos de la décision, de l'évaluation subjective du risque situationnel, de la manœuvre effective de changement de voie lorsqu'elle a lieu, ainsi que de l'acceptabilité d'une éventuelle automatisation de cette manœuvre. Concernant la conduite automatisée, nous établirons les questionnements scientifiques concernant l'acceptation du système d'automatisation du CDV, de l'évolution de la conscience du risque dans ce contexte d'automatisation de la conduite et enfin des aspects *Human-like* de la manœuvre telle qu'effectuée par l'automate que nous avons conçu et testé. Enfin, concernant les effets induits par l'utilisation de ce système d'automatisation de la conduite, nous préciserons les questions concernant l'éventualité de ces effets sur la prise de décision et l'évaluation subjective du risque.

Le **sixième chapitre** présentera le protocole expérimental que nous avons élaboré pour investiguer nos questions de recherche. Nous y décrirons tout d'abord la structure de notre expérimentation, selon 3 phases complémentaires : (1) une première dédiée à l'étude du changement de voie en conduite manuelle, (2) une seconde dédiée à l'étude de l'utilisation d'un système de changement de voie automatisé, et enfin (3) une troisième dédiée à l'étude des effets induits par l'utilisation de l'automate sur les changements de voie en conduite manuelle. Outre cette description de la structure du protocole expérimental, nous présenterons dans ce chapitre la méthode de construction de nos situations de conduite expérimentales ainsi que la manière dont les différentes mesures comportementales et d'évaluations subjectives (i.e. conscience du risque, acceptabilité / acceptation, etc.) seront effectuées. Les outils techniques qui seront employés, le fonctionnement du système de changement de voie automatisé tout comme l'algorithme d'adaptation du protocole aux participants seront également décrits. Enfin une description détaillée du déroulement de la passation expérimentale sera fournie.

Troisième partie : Résultats

La troisième partie de ce manuscrit comportera un chapitre entièrement dédié à la présentation des résultats. Ce **septième chapitre** présentera les résultats expérimentaux en suivant la structuration qui a guidé l'établissement de nos questions de recherche et de notre protocole expérimental. Il traitera dans un premier temps, des données relatives aux situations de changement de voie en conduite manuelle, puis des données relatives à l'utilisation du système de changement de voie automatisé, et enfin des données relatives aux effets induits de l'utilisation de cet automate lors des situations de conduite manuelle ultérieures.

Quatrième partie : Discussion

La dernière partie comportera elle aussi un seul chapitre : le **huitième chapitre** qui sera le lieu de la discussion des résultats exposés. Chaque phase de notre recherche sera alors reprise avec les questions de recherche et les résultats qui lui sont associés. Ils seront interprétés et discutés puis mis en relation avec les autres résultats obtenus. Un temps sera également accordé à la discussion de la méthodologie employée, aux limites de l'étude et aux questions ouvertes par les résultats obtenus. Enfin, une conclusion générale sur le travail effectué conclura ce manuscrit.

Première partie

Contexte théorique

La conduite automobile, de l'analyse de l'activité à la modélisation cognitive

1.1 L'activité de conduite automobile

Interrogez un conducteur ordinaire sur ce qu'est la conduite automobile, et vous constaterez facilement à quel point cette activité lui semble si simple et intuitive qu'il lui est presque impossible de la décrire d'une manière formelle et détaillée. Cette simplicité n'est pourtant qu'une apparence, et un examen plus minutieux dévoile rapidement à quel point cette activité est riche, complexe et sollicitante pour le système cognitif de celui qui la pratique. Afin de convenablement aborder l'activité de conduite automobile, il nous faut la décrire d'une manière très générale puis dresser un bref tableau des contraintes qui en dessinent la complexité et la profondeur.

1.1.1 Contraintes et complexité de la tâche de conduite

Conduire, c'est avant tout se déplacer d'un point de départ à un point d'arrivée, au moyen d'un véhicule, en empruntant une infrastructure prévue pour les déplacements. La première spécificité de la conduite repose évidemment sur le fait que l'individu gère lui-même son déplacement, pendant toute sa durée, en exerçant le contrôle de son véhicule. L'environnement dans lequel s'effectue le déplacement est qualifié de dynamique car la présence potentielle d'autres usagers le fait évoluer même sans action du conducteur. L'exercice de contrôle du déplacement implique donc, pour le conducteur, d'assurer en permanence une prise de connaissance de son environnement et de son évolution tout en agissant pour adapter le déplacement et parvenir au but souhaité. Dans les cas les plus simples (e.g. rouler seul sur l'autoroute), le conducteur doit simplement gérer sa position et sa vitesse sur la route, cette gestion sera alors majoritairement sensori-motrice. Les spécialistes de l'étude de l'activité de conduite qualifient généralement ce type de gestion sous les termes de composante « *longitudinale* » (i.e. vitesse) et de composante « *latérale* » (i.e. position dans la voie). Cette gestion ne peut se faire, pour le conducteur, sans une prise en compte des contraintes imposées par l'infrastructure routière, mais également par le véhicule conduit (e.g. type et qualité de la route, capacités du véhicule). Outre ces deux composantes permanentes, le conducteur peut, dans le cadre de cette activité de régulation, être amené à faire face à des situations d'une plus grande complexité et donc impliquant un engagement cognitif plus important. Ainsi, comme le rapporte [Bellet, 1998] : « *le franchissement d'une intersection, lieu privilégié d'interactions entre usagers, est une activité à forte dominante cognitive : le conducteur prélève de l'information, détermine son importance, en fait une interprétation, émet un jugement sur l'issue des interactions avec les autres usagers, prend des décisions, planifie et exécute les actions qu'il estime nécessaires sur les commandes (volant, pédales, etc.) afin de modifier ou non la trajectoire et / ou la vitesse de son véhicule* » (p.87). L'existence de telles situations nous révèle plusieurs éléments

traduisant l'importante complexité de l'activité de conduite. En effet, la possibilité pour le conducteur, lors d'un même trajet, de passer d'une situation de simple régulation de la position du véhicule dans la voie sur autoroute à une situation de franchissement d'intersection en centre-ville montre que les variations auxquelles le conducteur doit s'adapter ne sont pas uniquement celles induites par le déplacement du véhicule et la dynamique de la situation mais peuvent également être une variation en terme de complexité de la tâche elle-même. Le conducteur ne doit donc pas uniquement prendre en compte la variation de complexité de l'environnement mais également la variation des ressources nécessaires à l'accomplissement de la tâche. [Bellet, 1998] rappelle ainsi qu'une contrainte importante vient façonner la complexité de la tâche de conduite : la nécessité pour le conducteur de gérer les ressources cognitives limitées dont il dispose en fonction des exigences, en particulier les contraintes temporelles, de l'environnement. Le conducteur ne disposant pas de capacités de mémoire et d'attention infinies, il sera donc contraint de sélectionner les informations à prélever dans l'environnement, les interprétations qu'il fera de la situation, les solutions possibles parmi les évolutions probables, les décisions à prendre et les actions à effectuer. Le conducteur doit donc auto-gérer son activité de déplacement suivant ses ressources.

Par ailleurs, les infrastructures routières pouvant être utilisées par un grand nombre et une grande variété d'individus, les interactions entre le conducteur et les autres usagers peuvent être fréquentes et plus ou moins lisibles. La conduite automobile étant une activité très répandue, les interactions entre conducteurs sont presque permanentes. Cette dimension d'interaction sociale constitue une autre contrainte venant s'ajouter à ce que le conducteur doit gérer lors de son activité de conduite (et ce d'autant plus que les moyens de communication à sa disposition sont relativement limités). La complexité des interactions sociales vient donc obligatoirement ajouter à la complexité de l'activité de conduite.

[Banet, 2010] indique également dans sa thèse, que la conduite est une tâche peu prescrite. En d'autres termes, la description précise et opérationnelle de ce qu'il faut faire en conduite automobile dans toutes les situations reste très sommaire. Elle indique ainsi que : « *L'existence d'une prescription des tâches que l'on trouve dans le domaine des activités professionnelles par la définition formelle des objectifs à atteindre, des moyens à mettre en oeuvre, et des contraintes à respecter, est quasiment absente dans le domaine routier. Ni la formation à la conduite, ni le code de la route (qui relève dans les faits plutôt du code pénal), ne définissent de façon opérationnelle les modalités d'ajustement aux diverses situations rencontrées par le conducteur dans le cadre de son activité (Van Elslande et Luber, 1990)* » (p. 57). Le conducteur devra donc apprendre, en grande partie par lui-même, la manière de réaliser cette activité et de contrôler son déplacement. Comme le souligne Banet, l'impossibilité pour le conducteur de faire l'expérience de toute la combinatoire des situations possibles le contraint à être flexible et à faire preuve d'une grande capacité d'adaptation dans la réalisation de la tâche.

Cette complexité de l'activité de conduite est source potentielle d'accidents. Ces accidents ont des conséquences d'autant plus graves qu'ils peuvent se produire à des vitesses élevées ou encore impliquer d'autres usagers potentiellement plus vulnérables. Ainsi nous pouvons rapporter, à titre d'information, le bilan de l'ONISR pour l'année 2018 [ONISR, 2019] qui indique un nombre total de 3503 morts sur les routes en France (dont 51% sont des conducteurs ou occupants de voiture) et 72787 blessés dont 22187 hospitalisés. Ces chiffres, bien qu'en baisse depuis les 10 dernières années, témoignent du risque important associé à l'activité de conduite. La question de la sécurité est donc une contrainte cruciale à gérer pour le conducteur. Le rapport de l'ONISR indique ainsi qu'une vitesse excessive ou inadaptée représente entre 18% et 30% des causes identifiées d'accidents mortels, l'inattention

ressort également comme un facteur important dans la survenue d'accidents mortels. Comme l'indique [Paris, 2014] : « *l'humain est encore le maillon faible de la sécurité routière puisque sa défaillance est un facteur contributif de survenue d'accidents dans 90% des accidents de la route (on trouve 95% dans (Sabey and Staughton, 1975)), mais l'estimation à 9 cas d'accidents sur 10 est aujourd'hui largement admise* » (p.8). Nous évoquerons cet aspect relatif à la gestion des risques et de l'incertitude un peu plus loin dans ce chapitre et nous nous consacrerons à la question de l'évaluation cognitive du risque de manière plus complète dans le chapitre 2 (p. 27) qui lui sera dédié.

L'activité de conduite est donc en réalité d'une grande complexité, elle nécessite une constante adaptation du conducteur à la dynamique de l'environnement de conduite. Elle implique qu'il adapte les ressources cognitives nécessaires au niveau de complexité exigé par la tâche en fonction des capacités et de l'expérience dont il dispose. Elle demande au conducteur de prélever des informations, de gérer les incertitudes, les interactions sociales, de satisfaire ses buts, de prendre des décisions, d'anticiper les évolutions possibles tout en maintenant un niveau de sécurité satisfaisant afin d'éviter les accidents. Pour réaliser tout cela, le conducteur devra majoritairement s'appuyer sur la pratique ainsi que sur une formation relativement courte.

1.2 Modéliser l'activité de conduite automobile et la cognition du conducteur

Pour satisfaire à toutes les exigences de la tâche de conduite, le système cognitif du conducteur doit effectuer un grand nombre de traitements de différentes natures et à différents niveaux. Nous présenterons dans cette section un bref aperçu des différentes approches d'étude et de modélisation de l'activité de conduite et de la cognition du conducteur avant de nous concentrer, dans la section suivante, sur le modèle COSMODRIVE développé au LESCOT. Nous ne visons pas ici à l'exhaustivité où à la précision historique mais cherchons plutôt à donner au lecteur une idée de la variété des approches, de leurs intérêts, de leur forces, de leur faiblesses et de leurs apports aux modèles actuels.

1.2.1 La conduite, une activité complexe à décrire : l'approche taxinomique

L'une des premières approches datant des années soixante a consisté en une recherche de séquençage et d'identification des composantes élémentaires de l'activité de conduite. Cette approche, très descriptive, permet de recenser ce que doit faire un conducteur dans son activité. Ainsi par exemple [Bellet, 1998](p.93) rapporte le modèle de [Mc Knight and Adams, 1970] qui établit une liste dépassant les 1700 comportements tous regroupés en tâches puis en catégories. Comme le souligne [Bornard, 2012] (p.31), la démarche taxinomique n'est pas sans défauts « *La volonté d'exhaustivité, l'hétérogénéité des tâches de conduite et leur enchaînement peuvent rapidement déboucher sur une classification redondante voire incohérente* ». [Bellet, 1998](p.94) évoque également un apport intéressant de cette approche au travers de la classification établie par [Allen et al., 1971]. Basée sur le niveau de performance, cette classification identifie trois niveaux d'importance suivant la fenêtre temporelle dans laquelle ils prennent place :

- La *macro-performance* dont la fenêtre temporelle s'étale de quelques minutes à plusieurs heures. Elle intègre une grande variété de tâches allant de la planification de l'itinéraire à l'entretien du véhicule.

- La *performance situationnelle*, dont la fenêtre temporelle est plus courte (i.e. de quelques secondes à quelques dizaines de secondes), se rapporte aux tâches à effectuer sur le moment, dans la situation actuelle.
- La *micro-performance* regroupe les tâches relatives à la gestion des dimensions latérales et longitudinales de la position du véhicule, à sa trajectoire. Elle concerne une fenêtre temporelle beaucoup plus restreinte (i.e. de quelques centaines de millisecondes à quelques secondes).

Cette démarche d'analyse et de segmentation de l'activité de conduite a eu le mérite de dévoiler la complexité et la variété des tâches que le conducteur doit effectuer. Toutefois, cette approche très descriptive a également montré ses limites à la fois en éprouvant des difficultés à organiser l'activité de conduite d'une manière parfaitement cohérente, mais également en apportant relativement peu d'information sur l'activité mentale du conducteur.

D'autres modèles, s'inscrivant dans le courant de la cybernétique, ont également tenté de rendre compte du comportement du conducteur : les modèles de régulation.

1.2.2 Le contrôle de la position du véhicule : les modèles de régulation

Suivant une approche plus mathématique, le conducteur a été modélisé dans le cadre du courant cybernétique comme un système auto-adaptatif régulant ses interactions avec l'environnement au moyen de boucles de rétroactions. Cette approche réduit généralement le conducteur à un ensemble d'équation différentielles, constituant une forme de boîte noire uniquement destinée à rendre compte de l'adaptation comportementale du conducteur, à l'image d'un contrôleur servomoteur. [Bornard, 2012] (p.32-33) rapporte ainsi une synthèse de ces modèles par [Jurgensohn, 2007] et indique que ce type de modélisation peut s'avérer utile pour rendre compte, par exemple, de la stabilité du couple conducteur-véhicule. La critique principale qu'il fait à cette typologie de modèles dans le contexte de l'étude de la cognition du conducteur repose sur le fait que cette approche ne rend compte que de la performance du système conducteur-véhicule sans véritablement informer sur les processus cognitifs, les opérations et représentations mentales du conducteur.

Cette approche de l'activité et de la cognition du conducteur, bien que pouvant être valide sous l'angle de l'ingénierie n'est donc pas à même de rendre compte de ce sur quoi se porte notre attention : la cognition du conducteur.

Dans les années 70 les préoccupations autour de la sécurité routière et de la compréhension de la survenue des accidents de la route a également donné lieu au développement de modèles du conducteur centrés sur le risque et son évaluation subjective. Cette thématique faisant partie des aspects centraux de ce travail de thèse, les modèles issus de ce champ de recherche bien particulier font l'objet d'un développement plus approfondi dans le chapitre 2 (p. 27). À la fin de cette décennie et durant la suivante se sont développés de nouveaux modèles de l'activité de conduite cherchant à mieux rendre compte de celle-ci du point de vue de la cognition du conducteur et de son niveau d'expertise.

1.2.3 Le contrôle de l'activité : les modèles de la tâche de conduite

Nous avons indiqué dans la section précédente (1.1.1, p. 7) en quoi la complexité et les exigences de la tâche de conduite peuvent être variables dans le temps et suivant les capacités du conducteur. Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'activité de conduite ou à d'autres activités humaines de grande complexité afin d'en permettre une analyse plus fine et une compréhension des mécanismes cognitifs

impliqués. Parmi eux nous retiendrons l’approche de Rasmussen, celle de Michon et enfin la conception de l’activité de conduite comme un processus de régulation dynamique. Ces conceptions ont servi de base au développement du modèle COSMODRIVE dans lequel s’inscrivent nos travaux.

1.2.3.1 L’approche de Rasmussen

Au début des années 80 Rasmussen s’intéresse à l’activité de contrôle des centrales nucléaires. Comme pour la conduite automobile, la particularité de cette activité est de devoir gérer un processus dynamique, c’est-à-dire susceptible d’évoluer spontanément sans intervention de l’opérateur. Il scinde alors l’activité de contrôle en trois niveaux de comportements : Les comportements basés sur les connaissances (i.e. Knowledge-Based behaviour (KB)); les comportements basés sur les règles (i.e. Rule-Based behaviour (RB)) et enfin les comportements basés sur les habiletés (i.e. Skill-Based behaviour (SB)) [Rasmussen, 1983].

Les comportements relevant du niveau des habiletés sont purement sensori-moteurs. Ils sont le fruit de processus fortement automatisés. Les informations traitées à ce niveau ne nécessitent pas le recours à des traitements symboliques complexes. Ils aboutissent à des comportements automatiques issus d’apprentissages moteurs. Ainsi, par exemple, le conducteur expert changera ses rapports de vitesse de manière totalement inconsciente et automatisée sur la base des informations perceptives de vitesse et de bruit du moteur.

Les comportements basés sur les règles (RB) relèvent d’un niveau de traitement supérieur au comportements SB. Ils sont le produit de l’exécution d’une règle (i.e. heuristique) apprise ou développée par le conducteur et stockée en mémoire. Ces comportements interviennent généralement dans le cadre de situations familières. Il s’agit de procédures standardisées directement utilisables dans la situation. Rasmussen indique que les règles sont de type *Si [Etat] alors [Tâche]* [Paris, 2014] (p.10).

Les comportements basés sur les connaissances (KB) sont appliqués dans les cas où la situation requiert des traitements symboliques de haut niveau et pour lesquelles les règles du niveau inférieur sont insuffisantes pour gérer la situation. Ces comportements requièrent une attention consciente de la part du conducteur. Ils sont le fruit de traitements symboliques complexes et ont un coût cognitif potentiellement important.

Rasmussen, au travers de cette conception, ne propose pas une simple catégorisation des comportements sur la base des niveaux de traitements cognitifs qu’ils engagent. Il propose par cette approche un moyen de rendre compte de l’acquisition de l’expérience par l’opérateur (i.e. le conducteur). En effet, [Bellet, 1998] (p.106-107) rapporte l’exemple du changement de rapport de vitesse par le conducteur novice en comparaison du conducteur expert. Si cette action est totalement automatisée pour ce dernier (i.e. SB), ce peut être totalement l’inverse pour le conducteur novice qui devra effectuer cette action en pleine conscience. Ainsi, un même comportement pourra relever de niveaux hiérarchiques différents suivant l’expertise du conducteur.

1.2.3.2 L’approche de Michon

Dans une démarche relativement proche, Michon propose en 1979 un modèle dédié à l’activité de conduite dans laquelle il segmente celle-ci en trois niveaux hiérarchiques sous l’inspiration des organisations militaires : le niveau stratégique, le niveau tactique et le niveau opérationnel. Décrivons rapidement à quoi ils réfèrent respectivement :

- Le niveau *stratégique* fait référence à la partie de l'activité de conduite à long terme. Il s'agit de tous les éléments de l'activité de conduite qui ont trait à la définition générale des buts du conducteur. On retrouvera ainsi la planification de l'itinéraire, les contraintes horaires, etc.
- Le niveau *tactique* fait référence à la partie de l'activité de conduite en rapport avec la situation courante. C'est-à-dire aux opérations que le conducteur va effectuer pour gérer une situation de conduite particulière (e.g. le franchissement d'une intersection)
- Le niveau *opérationnel* revoie, quant à lui, aux éléments d'exécution de l'activité de conduite, la mise en application concrète des décisions prises aux niveaux supérieurs.

Cette conception est encore très actuelle et certains modèles, comme celui de [Van Der Molen and Bötticher, 1988], qui sera détaillé dans la section 2.2.6 du chapitre 2 (p. 43), s'appuient sur ces concepts. Si, d'un certain point de vue, le modèle de Rasmussen et celui de Michon semblent proposer des niveaux hiérarchiques similaires, dans les faits, ils se complètent. Ainsi [Bellet, 1998] (p. 107) rapporte la table 1 (p. 12)(adaptée de Hale, Stoop et Hommels, 1990) qui traduit bien la complémentarité de ces deux approches (p.107).

	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	Négocier une intersection familière	Contrôle de la trajectoire

Tableau 1 – Comparaison entre les niveaux identifiés par Michon et Rasmussen (Bellet, 1998, p.107), (adaptée de Hale, Stoop et Hommels, 1990)

Ces conceptions mettent à la fois l'accent sur une segmentation possible des tâches de l'activité de conduite ainsi que sur les éventuels niveaux de traitements de l'information qu'ils impliquent. Cependant, ils ne rendent que très peu compte du détail des processus cognitifs prenant place dans l'activité ou encore de la dynamique de celles-ci. C'est pourquoi nous allons à présent brièvement présenter une approche complémentaire, celle de la régulation dynamique de l'activité.

1.2.3.3 L'approche de la régulation dynamique

L'approche de la régulation dynamique de l'activité est inspirée des modèles de régulation (1.2.2, p. 10) et cherche à rendre compte de la nécessaire perpétuelle adaptation du conducteur à l'évolution de la situation de conduite. Très simplement, nous pouvons considérer que la situation de conduite évoluant en permanence, le conducteur devra sans cesse s'enquérir auprès de l'environnement afin d'identifier les changements pertinents qui s'y opèrent et adapter la dynamique de son véhicule pour atteindre ses objectifs. Une première étape fondamentale de cette approche est donc l'étape perceptive. Ensuite, nous pouvons établir que le conducteur doit traiter ces informations perceptives, évaluer leur importance en lien avec le but qu'il s'est fixé, puis prendre un certain nombre de décisions. Cette phase du cycle de régulation est l'étape cognitive. D'une grande complexité, elle intègre entre autres,

la création d'une représentation mentale de la situation et les anticipations du conducteur, aspects que nous détaillerons plus amplement dans la suite de ce chapitre. Cette étape cognitive réalisée, les traitements qu'elle implique et les décisions auxquelles elle aboutit vont ensuite se traduire en actes de la part du conducteur. Vient donc ensuite la phase d'actions au cours de laquelle sont pratiquement mises en œuvre les décisions prises lors de la phase cognitive. Les actions sur les commandes du véhicule sont donc effectuées au moyen des actionneurs dont le conducteur dispose. La figure 1 (p. 13) traduit les principales étapes de la boucle *perception - cognition - action*.

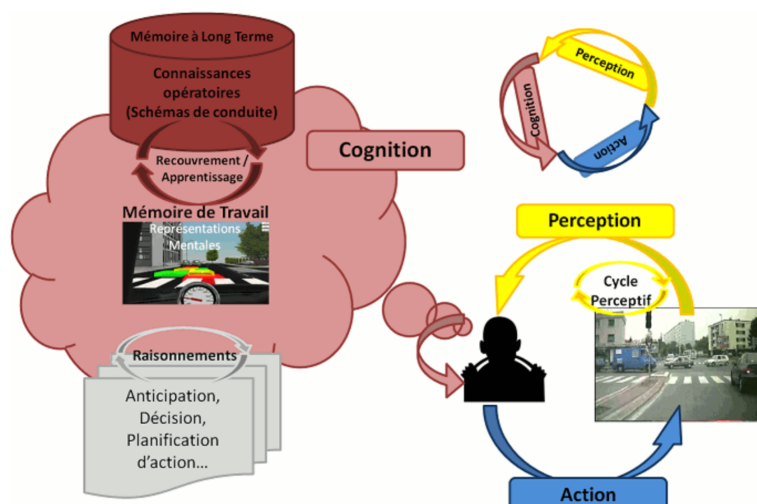


Figure 1 – Cycle perception - cognition - action issu de [Bornard, 2012] (adapté de [Bellet et al., 2010b])

Un point important sur lequel nous tenons à insister ici, réside dans le fait que malgré l'apparente linéarité des processus de régulation dynamique, en réalité il n'en est rien. Il s'agit bien ici d'un processus cyclique perpétuel, au cours duquel les actions alimentent la perception dans la mesure où elles modifient l'état du véhicule dans l'environnement. Nous verrons également, dans la section consacrée au modèle COSMODRIVE (1.3, p. 16) que chacune de ces étapes peut également faire l'objet de boucles internes et nous consacrerons une attention particulière aux éléments propres à la phase cognitive de cette boucle.

Avant de nous consacrer plus amplement à la description de ce modèle nous ne pouvons passer outre une courte présentation des démarches de modélisation du conducteur ayant pour objectif d'être implémentées informatiquement et éventuellement, de pouvoir simuler la cognition.

1.2.4 Les modèles de simulation numérique du conducteur

[Bellet, 1998] et [Bornard, 2012] font tout deux état de l'avancée des recherches dans cette perspective de simulation numérique du conducteur. Nous reprenons ici les points principaux qu'ils évoquent.

Apparus dans les années 90, ces modèles peuvent avoir deux objectifs distincts : la simulation de la performance ou la simulation de la cognition. Le premier type de modèle a pour objectif de simuler fidèlement le comportement du conducteur, sans présumer des états et processus internes qui amènent le conducteur à produire la performance de conduite. Ces modèles, typiquement behavioristes, ont donc

une approche « *boîte noire* » ayant pour simple objectif de générer en sortie des comportements fidèles à ceux du conducteur, le plus souvent dans un objectif de prédiction. Le second type de modèle vise, quant à lui, à simuler l'activité cognitive du conducteur. En d'autres termes, ces modèles cherchent à reproduire les processus et états internes du système cognitif du conducteur dans le but d'expliquer et reproduire les sorties comportementales de l'humain conducteur. [Bornard, 2012] indique ainsi : « *ils [i.e. les modèles de la cognition] décrivent le conducteur comme un système de traitement naturel de l'information, et ils s'appuient sur des architectures cognitives complexes* » (p.37). Le cadre conceptuel de la thèse nous amène d'emblée à ne pas faire état du détail des modèles de performances (quelques exemples de ceux-ci peuvent toutefois être trouvés chez [Bellet, 1998] p.110 - 113), et à nous focaliser sur les modèles de simulation de la cognition.

1.2.4.1 Le modèle DRIVER

Le Modèle DRIVER, développé au début des années 90 par [Wierda et al., 1992], se concentre sur la simulation du prélèvement et du traitement de l'information visuelle par le conducteur. Basé sur l'architecture cognitive SOAR, ce modèle disposant d'une mémoire de travail a pour objectif de permettre la création d'un modèle mental de l'environnement en simulant le traitement l'information visuelle (identification et reconnaissance) et par la suite d'effectuer des raisonnements. Ce modèle fait également appel à des connaissances sous la forme de prototypes d'infrastructures (i.e. frames) qui servent de base à la construction du modèle mental de la situation. [Bornard, 2012] indique « *qu'une fois instanciés aux caractéristiques de la situation courante, ces frames d'infrastructure constituent des prototypes de situation* » (p.38).

1.2.4.2 Le modèle IDM

Proposé par [Salvucci et al., 2001] et développé sur la base de l'architecture cognitive ACT-R, ce modèle s'inspire de l'approche de [Michon, 1985] et comprend une fonction de contrôle dont le rôle est d'assurer la prise d'information dans l'environnement et d'actionner les commandes du véhicule. Cette fonction relève donc du niveau opérationnel du modèle de Michon. Le modèle comprend également une fonction de monitoring qui intègre périodiquement les informations perceptives au modèle interne de la situation courante. Cette fonction s'apparente donc au niveau tactique du modèle de Michon. Enfin le modèle IDM comprend une fonction de prise de décision qui, comme son nom l'indique, a pour fonction de prendre des décisions concernant les manœuvres à effectuer dans la situation courante. Cette fonction relève donc également du niveau tactique dans la conception de Michon. [Bornard, 2012] (p.39) rapporte une limite importante de ce modèle dans la mesure où son implémentation repose sur l'architecture ACT-R : « *En recourant essentiellement à des 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* ».

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

Ce modèle développé par Liu ([Tsimhoni and Liu, 2003] et [Liu et al., 2006]) est doté de trois sous-réseaux capables de gérer des traitements de l'information en parallèle. Le premier sous-réseau assure les fonctions perceptives, en particulier les traitements visuels dont les aspects de reconnaissance et de localisation spatiale sont effectués en parallèle. Le second sous-réseau, dit « *cognitif* », est doté

d'une mémoire de travail basée sur la conception de [Baddeley, 1992] et d'un système de sélection et d'exécution des objectifs ainsi que d'un élément dédié à la surveillance des performances. Enfin le troisième sous-réseau est en charge de recevoir les informations en provenance de la mémoire de travail et gère la production et l'exécution des réponses motrices.

1.2.4.4 Bilan des modèles de simulation de la cognition du conducteur

Bornard recense dans son bilan des modèles de simulation de la cognition du conducteur, un certain nombre d'apports ainsi que certaines limites. Parmi les apports, nous pouvons noter que tous ces modèles proposent une mémoire de travail ainsi que l'élaboration d'une forme de représentation mentale de la situation courante (nous reviendrons sur ces aspects dans la section dédiée au modèle COSMODRIVE). Tous ces modèles proposent également des fonctions sensori-motrices plus ou moins élaborées. Concernant les limites, la plus importante concerne la nature exclusivement propositionnelle et symbolique des connaissances et des traitements destinés à constituer la représentation mentale de la situation courante. Or, pour correctement comprendre, anticiper, prendre des décisions et planifier des actions, il semble important de doter aussi le modèle du conducteur d'une capacité de représentation mentale visuo-spatiale. Le modèle COSMODRIVE que nous allons exposer dans la section suivante propose ce type d'approche en vue de combler ces lacunes.

1.2.5 Le problème des méthodes de modélisation : à quoi doit répondre un modèle ?

Les modèles et approches que nous avons présentés jusqu'ici, bien que loin de correspondre à la totalité des modèles du conducteur et de l'activité de conduite, nous ont informés à la fois sur la complexité mais aussi sur la variété des approches possibles en matière de modélisation de l'activité de conduite ou du fonctionnement du conducteur.

Nous devons à présent nous arrêter brièvement sur la fonction visée par les différents types de modèles présentés. En effet, le lecteur pourra aisément constater que parmi tous les modèles dont nous avons fait état jusqu'à présent, certains semblent avoir une vocation plus descriptive (e.g. modèles taxinomiques 1.2.1, p. 9), d'autres, plus explicative (e.g. modèles de contrôle de l'activité 1.2.3, p. 10) et enfin d'autres, plus prédictive (e.g. modèles de simulation 1.2.4, p. 13). En distinguant ainsi les objectifs des modèles, nous nous référons aux conceptions de [Sperandio, 2003]. Bien entendu, un modèle peut satisfaire à plusieurs de ces objectifs à la fois et dans le cadre de notre démarche en sciences de la cognition, comme l'indique [Mathern, 2012] (p.15) : « *dans l'idéal, un modèle est à la fois descriptif, explicatif et prédictif* ».

Chacun des modèles présentés dans les sections précédentes cherche à recouvrir au moins un de ces objectifs et nous pouvons constater qu'avec le temps, les modèles de l'activité de conduite sont progressivement passés d'une approche purement descriptive des tâches à des modélisations plus explicatives et prédictives. Ainsi, les derniers modèles dont nous avons fait état, cherchent non seulement à prévoir et simuler le comportement du conducteur, mais ils ne se contentent pas d'une réduction mathématique. Pour cela ils implémentent un certain nombre de fonctions cognitives connues dans le but de satisfaire dans le même temps à un objectif explicatif.

[Bornard, 2012] (p.25) indique qu'il peut régulièrement arriver qu'en voulant satisfaire prioritairement à un objectif, un modèle devienne inefficace ou incapable de satisfaire les autres. Ainsi, il rapporte que certains modèles explicatifs sont d'une trop grande complexité pour permettre des prévisions

précises ou encore que certains modèles prédictifs, bien que très efficaces, se montrent inutiles pour expliquer leur prédictions. Dans le but parvenir à mieux satisfaire à plusieurs de ces objectifs en même temps, Bornard indique que les possibilités calculatoires offertes par l'outil informatique peuvent être d'une grande utilité en permettant aux nouveaux modèles de produire des simulations numériques.

C'est dans cette optique qu'a été développé le modèle COSMODRIVE que nous allons exposer dans la prochaine section.

1.3 La modélisation du conducteur au LESCOT : le modèle COSMODRIVE

Le modèle COSMODRIVE, dont les premiers travaux de développement ont été initiés par [Bellet, 1998], vise à modéliser l'activité cognitive du conducteur automobile dans un objectif d'implémentation informatique. Comme nous l'avons évoqué précédemment (1.2.5, p. 15), ce modèle vise à la fois la prédiction et l'explication. Jusqu'à présent, lors de l'exposé des différents modèles de l'activité de conduite et de la cognition du conducteur, nous avons régulièrement évoqué quelques fonctions cognitives mobilisées par les conducteurs pour effectuer l'activité sans toutefois nous consacrer de manière spécifique à un exposé détaillé de ces fonctions et processus. L'ambition explicative du modèle COSMODRIVE nous amènera donc, dans un premier temps, à procéder à une revue de l'architecture cognitive qu'il vise à modéliser puis, dans un second temps, à exposer sa structure modulaire. Dans un troisième temps, nous nous arrêterons sur un élément crucial du modèle : la représentation mentale de la situation, puis nous exposerons les notions de schéma de conduite et de zones enveloppes. Nous procéderons enfin à un rappel de quelques avancées du modèle ayant été produites au cours des deux dernières décennies.

1.3.1 L'architecture du système cognitif

Comme nous l'avons évoqué au début de ce chapitre, le nombre d'opérations que doit effectuer le conducteur est important. Nous avons pu constater que l'activité de conduite est extrêmement sollicitante pour le système cognitif et avons tenté d'en évoquer certains aspects au travers de quelques modèles. Le modèle COSMODRIVE, cadre conceptuel dans lequel nous nous plaçons, s'appuie sur une architecture cognitive destinée à la fois à être simulée, mais également à rendre compte des processus internes à l'œuvre dans le système cognitif du conducteur humain.

Nous commençons ici très généralement par décrire les deux structures mnésiques indispensables au stockage des informations à traiter (et déjà présentes dans de nombreux autres modèles produits en sciences de la cognition) : la mémoire à long terme (MLT) et la mémoire de travail (MDT).

La MLT assure une fonction de stockage permanent de connaissances. Comme l'indique [Bellet, 1998](p.85) : « [La MLT] contient l'ensemble des souvenirs, savoirs et savoir-faire acquis par le sujet au cours de son existence. Bien qu'il puisse s'agir d'informations de nature très différentes (connaissances théoriques, savoirs pratiques, croyances, représentations permanentes diverses) nous utiliserons comme [Richard, 1990] le terme générique de connaissances permanentes pour qualifier les 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 ».

La MDT assure un rôle central dans le modèle COSMODRIVE. S'il est souvent fait référence à la MDT en sciences de la cognition, le terme renvoie la plupart du temps à la conception de [Baddeley, 1990]. Dans le cadre de ce modèle, [Bellet et al., 2009] précise que la MDT renvoie davantage aux conceptions de [Smirnov, 1966] ou de [Bisseret, 1970], également connues sous la terminologie de « *mémoire opérationnelle* », et dont la particularité est d'être orientée vers la réalisation de l'activité. En d'autres termes, la MDT dont nous traitons ici, est destinée à maintenir actives les informations nécessaires à la réalisation de l'activité en cours. Bien que transitoires, ces informations prenant la forme d'une représentation circonstancielle de la situation seront maintenues actives tant qu'elles présenteront une utilité pour la réalisation de l'activité. [Bellet et al., 2009] précisent ainsi : « *Selon cette perspective, la Mémoire Opérationnelle dépasse largement les capacités de stockage et de traitement de la WM (MDT) de Baddeley* » (p.1206). La figure 2 (p. 17) présente l'architecture cognitive élémentaire sur laquelle est basé COSMODRIVE

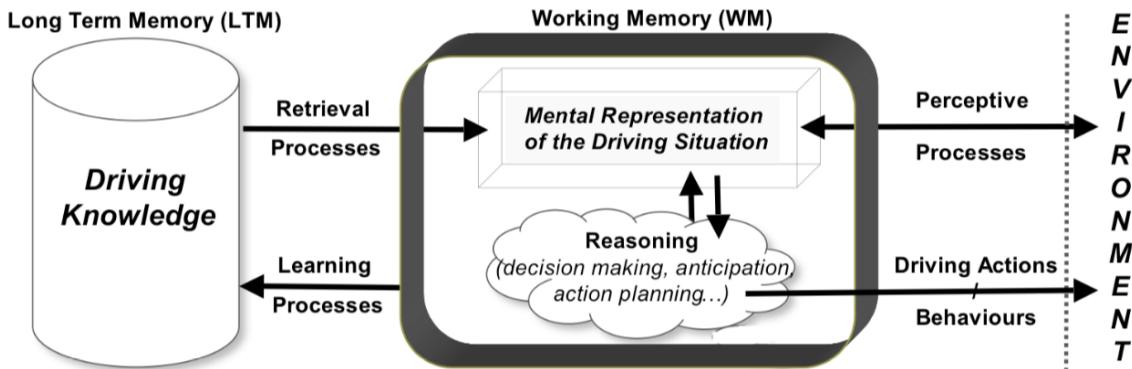


Figure 2 – architecture cognitive élémentaire de COSMODRIVE

L'illustration de cette architecture cognitive, bien qu'ici présentée en version simplifiée, indique clairement que les processus perceptifs alimentent la mémoire de travail (et donc la représentation mentale occurrente qu'elle contient) avec des informations en provenance de l'environnement extérieur. Nous constatons que, dans le même temps, des processus de recouvrements assurent également l'alimentation de la MDT avec des informations contenues dans la MLT du conducteur. La mémoire de travail contient, quant à elle, la représentation mentale courante de la situation, sur laquelle des opérations diverses (e.g. raisonnements, planification, décision, anticipations, etc.) sont effectuées. En direction opposée, depuis la MDT vers l'environnement extérieur, sont effectués les actions et comportements du conducteur. Enfin, depuis la MDT vers la MLT prennent place les processus d'acquisition et d'apprentissage (i.e. stockage à long terme).

Le contenu et les processus se déroulant en MDT sont donc centraux dans le modèle COSMODRIVE. Nous nous y consacrerons plus longuement ultérieurement dans cette section. Nous pouvons à présent aborder l'aspect modulaire de l'architecture du modèle COSMODRIVE en nous replaçant dans le contexte des modèles précédemment présentés.

1.3.2 Architecture modulaire du modèle COSMODRIVE

COSMODRIVE tire les bénéfices des précédentes démarches de modélisation de l'activité de conduite et de la cognition du conducteur. Le modèle s'inscrit ainsi dans le cadre de la boucle de régulation dynamique *perception - cognition - action* présentée en 1.2.3.3 (p. 12).

Ce modèle prévoit donc des fonctions perceptives élaborées permettant autant l'intégration d'informations perceptives depuis l'environnement (i.e. processus bottom-up) que la recherche active d'informations perceptives (i.e. processus top-down) sous la direction des connaissances et habitudes du conducteur, mais aussi pour les besoins de l'élaboration de la représentation mentale de la situation. Cette étape perceptive est donc cyclique (en référence à [Neisser, 1976]) et a fait l'objet de développements particuliers par [Bornard, 2012] dans sa thèse.

COSMODRIVE prévoit donc logiquement des fonctions relatives à la dimension cognitive de la boucle. Ces fonctions ont pour objectif principal de permettre le développement de la représentation mentale de la situation qui fera l'objet de la partie 1.3.3 (p. 19).

La composante action de la boucle de régulation est, quant à elle, prise en compte dans le modèle par le biais de fonctions d'exécutions permettant d'agir sur les commandes du véhicule et donc de réguler en continu la position dans la voie et d'exécuter les décisions prises par les fonctions cognitives.

Enfin, le modèle s'appuie aussi sur les conceptions de Michon (1.2.3.2, p. 11), Rasmussen (1.2.3.1, p. 11) et sur le modèle de Van Der Molen et Bötticher (2.2.6, p. 43). Il prévoit donc une architecture intégrant des modules correspondant aux différents niveaux identifiés dans ces modèles.

1.3.2.1 Le module stratégique

Ce module, conformément à l'intitulé qui lui a été attribué, est en charge de la planification des itinéraires et de la définition des buts généraux. [Bornard, 2012] précise que l'itinéraire peut être modifié en cours de route par le module stratégique et que celui-ci est en charge de transmettre les différents buts stratégiques à atteindre au module tactique. Il indique également qu'en l'état actuel des choses, ce module n'a fait l'objet que de développements lui donnant des fonctionnalités minimales.

1.3.2.2 Le module tactique

Le module tactique est en charge du développement des représentations mentales de la situation de conduite et des processus qui y sont associés. Il est donc en charge de la catégorisation de l'environnement routier, de la recherche des informations relatives à la situation de conduite en MLT, il est doté de processus permettant l'anticipation de l'évolution de la situation de conduite et de l'examen des alternatives possibles, ce qui lui permet de procéder à la prise de décisions, dans le but de satisfaire à la fois les objectifs fixés par le module stratégique et également de maintenir un niveau de sécurité suffisant. Le module tactique communique ensuite ses décisions au module opérationnel. Le module tactique est un module clé dans le modèle COSMODRIVE ; nous verrons par la suite (chapitre 2, p. 27) qu'il est également le siège d'un certain nombre de traitements relatifs à l'évaluation du risque situationnel.

1.3.2.3 Le module perception

Il est le siège des boucles et fonctions d'intégration et de recherches perceptives. Il a fait l'objet de développements dans le cadre de la thèse de [Bornard, 2012] où des fonctions de champ visuel,

d'exploration perceptive (i.e. processus top-down) et d'intégration d'informations perceptives (i.e. processus bottom-up) ont été décrites et implémentées. Sur ce plan, le modèle COSMODRIVE se réfère principalement au modèle cyclique de [Neisser, 1976]

1.3.2.4 Les modules opérationnel et exécution

Ces deux modules fonctionnent ensemble, ils sont en charge de l'exécution finale de l'action. Le premier traduit le schéma de conduite et les décisions en provenance du module tactique en une suite d'opérations pouvant être exécutées par le module de l'exécution. Comme l'indique [Bornard, 2012], « *le module opérationnel se focalise sur la planification fine de l'activité* ». Le module opérationnel est également en charge du maintien du véhicule dans sa voie, c'est-à-dire de la gestion et du contrôle latéral et longitudinal. Enfin, le module exécution est en charge des actions sur les commandes du véhicule.

Nous comprenons ainsi comment le modèle COSMODRIVE s'appuie à la fois sur une architecture cognitive et sur les apports des précédents modèles de l'activité de conduite. Cette description reste toutefois superficielle et il nous faut à présent nous concentrer sur les processus du module tactique et sur les représentations mentales élaborées en MDT par le conducteur au cours de son activité.

1.3.3 Les représentations mentales, le rôle central de la conscience de la situation

Comme nous l'avons indiqué précédemment, les capacités cognitives du conducteur ne sont pas infinies et, en situation de conduite, il ne dispose que d'un temps limité pour décider et agir. Ces contraintes exercent une forte pression sur le système cognitif.

Pour prendre les bonnes décisions au bon moment, le conducteur doit impérativement identifier et comprendre la situation dans laquelle il se trouve. Il doit donc se la représenter efficacement de sorte à pouvoir effectuer un certain nombre de raisonnements nécessaires à la prise des décisions qui s'imposent, en particulier concernant la gestion de la sécurité. Le conducteur va donc élaborer en mémoire de travail une *représentation mentale de la situation*. Pour cela, il doit en premier lieu sélectionner les informations pertinentes et rejeter ou minimiser les informations non pertinentes. La pertinence des informations et leur prépondérance dans la représentation mentale de la situation est en partie dépendante des buts et objectifs du conducteur et cette représentation mentale sera, de fait, déformée fonctionnellement [Ochanine, 1977]. La représentation mentale de la situation est circonstancielle. Elle évolue avec le temps et le conducteur va pouvoir s'en servir comme support pour anticiper les évolutions possibles, programmer ses actions et les informations qu'il doit prélever. La représentation mentale de la situation est donc construite en interaction avec l'environnement et orientée pour l'action et l'atteinte des buts de la tâche. La construction de la représentation mentale peut aussi être appuyée et enrichie par des connaissances antérieures que le conducteur détient. Ainsi, suivant son expérience, le conducteur pourra faire appel à des informations stockées en MLT pour alimenter la représentation mentale de ses expériences passées et ses connaissances. La représentation mentale n'est donc pas une simple copie de la situation extérieure mais un *modèle intériorisé et orienté* de celle-ci. Nous verrons dans la suite de cette section comment sont structurées ces informations stockées en mémoire à long terme et comment elles contribuent à l'élaboration de la représentation mentale de la situation.

Un dernier point d'importance concernant la représentation mentale de la situation fait écho à

la notion de finitude des ressources du conducteur que nous évoquions en début de section. Pour reprendre les mots de [Bellet et al., 2009] : « *conduire un véhicule, c'est gérer ses propres ressources pour satisfaire au mieux les exigences de la situation routière* » (p.1207). Le conducteur doit donc, dans son processus d'élaboration de la représentation mentale de la situation, prendre en compte et gérer ses propres ressources notamment attentionnelles. [Bellet et al., 2009] résument ainsi la conduite : « *conduire un véhicule, c'est bien souvent prendre des décisions et agir dans l'incertitude, en fonction de la "conscience" explicite et implicite que l'on a de la situation* » (p.1207). L'initiateur du modèle COSMODRIVE établit à cette occasion un lien entre la représentation mentale occurrente de la situation et le concept de conscience de la situation (« *Situation Awareness* », *SA*), issu du domaine de l'ergonomie.

La notion de la conscience de la situation est définie par Endsley, (auteur « *fer de lance* » de ce concept) et peut être traduite comme : « *la perception des éléments dans l'environnement dans un volume de temps et d'espace, la compréhension de leur signification et la projection de leur état dans un futur proche* » [Endsley, 1995]. Endsley inclut donc dans sa conception de la conscience de la situation, une étape de perception, une étape de compréhension et une étape d'anticipation. Ces éléments sont aussi prévus dans le cadre du modèle COSMODRIVE, toutefois [Bellet et al., 2009] précise que cette conception semble trop linéaire et qu'elle gagnerait à être conçue comme au moins circulaire. Il ajoute à cela que des courts-circuits entre les différentes étapes pourraient être d'une grande utilité. Ce qui autoriserait par exemple la possibilité de prises de décisions et d'action dans l'incertitude malgré une incomplète conscience de la situation et donc une représentation mentale lacunaire. Par ailleurs, Bellet indique qu'un certain nombre d'actions, mêmes complexes, sont effectuées par le conducteur sans qu'il en ait une conscience explicite.

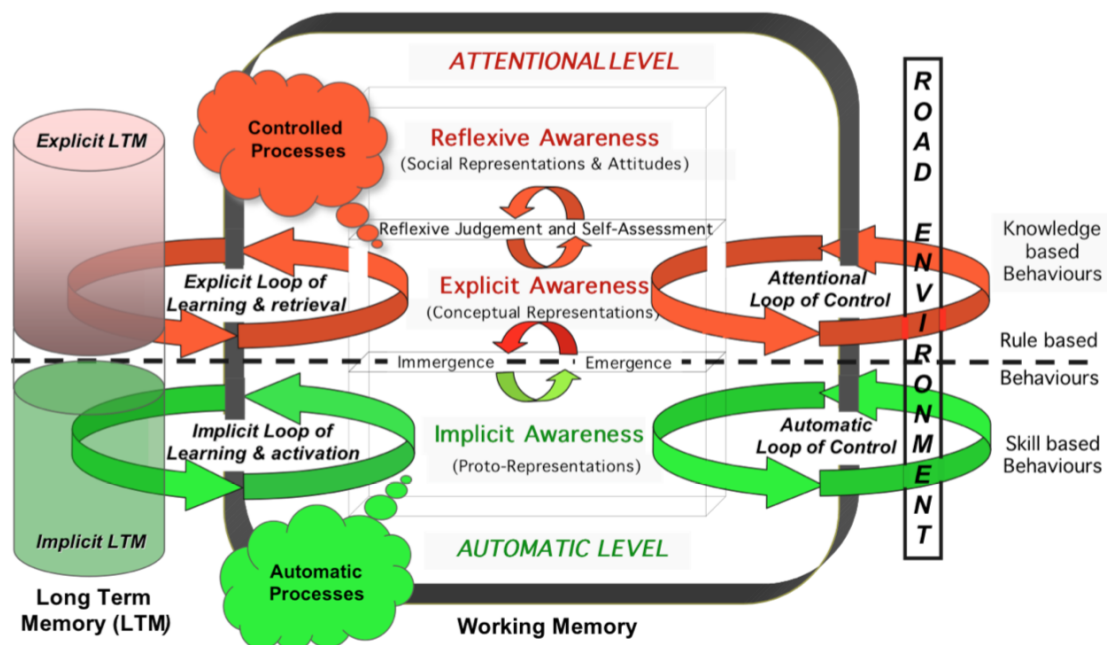


Figure 3 – Niveaux de conscience, boucles de contrôle et boucles d'apprentissage dans le modèle COSMODRIVE

Cet élément amène l’auteur à considérer qu’une représentation mentale n’est pas toujours nécessairement consciente et explicite. Un certain nombre d’actions et de décisions peuvent être gérés par le conducteur d’une manière implicite. Cette distinction renvoie aux concepts de processus contrôlés et automatiques de [Schneider and Shiffrin, 1977] mais également aux notions d’actes pré-réfléchis et de pensée réfléchissante chez [Piaget and Inhelder, 1975] ou encore aux niveaux *S-R-K* de Rasmussen (exposés à la section 1.2.3.1, p. 11).

La figure 3 (p. 20) expose la manière dont les éléments de la représentation mentale de la situation peuvent passer des niveaux implicite à explicite (et inversement). Cette illustration met également en évidence comment les informations en provenance de la MLT et les informations en provenance de l’environnement, peuvent transiter vers ou depuis la représentation mentale de la situation. Bellet propose ainsi la notion d’émergence qui permet à un élément de la représentation mentale de devenir explicite, et la notion d’immersion qui, à l’opposé, permet aux éléments de la représentation mentale de passer dans le champ de la conscience implicite.

Cette figure illustre également comment des contenus de la MLT peuvent être récupérés pour alimenter la représentation mentale de la situation. Ces connaissances peuvent entre autres, porter sur l’environnement routier et les précédentes situations déjà rencontrées. Elles prendront alors la forme de schémas de conduite. Un autre type de connaissances, relatives à la planification de l’action et à la gestion des interactions avec les autres usagers, prendront la forme de zones enveloppes. Nous détaillerons ces deux types de connaissances et examinerons leur rôles dans les deux prochains paragraphes.

1.3.4 Les schémas de conduite

Le modèle COSMODRIVE a recours à la notion de schéma comme structure de connaissance pour l’action stockée en mémoire à long terme et utilisée en mémoire de travail comme base de la construction de la représentation mentale de la situation. [Bellet, 1998] propose la notion de schéma dont il retrace l’origine en psychologie cognitive à [Bartlett, 1932]. [Bornard, 2012] indique ainsi que dans sa définition d’origine : « *un schéma correspond à une structure organisée qui intègre nos connaissances et nos attentes relatives à un aspect quelconque du monde* » (p.48). Les schémas jouent ainsi un rôle central dans la planification et la réalisation de l’action. Ce sont des modèles de situations forgées par l’individu, suivant son expérience. Ils jouent un rôle facilitateur dans la compréhension de l’environnement mais, dans la mesure où ils sont le fruit de l’expérience de l’individu et où ils sont orientés pour l’action, ils peuvent également être sources de déformations du réel. Le concept de schéma a été repris dans le domaine de l’intelligence artificielle par [Minsky, 1975] sous la terminologie de *frame*. La notion de schéma est à rapprocher de celle de *schème* chez [Piaget and Inhelder, 1975] mais aussi de la notion de *script* chez [Schank and Abelson, 1977], ces derniers mettant plus particulièrement en avant la composante temporelle typique des événements et situations concernés.

Dans le cadre de COSMODRIVE, un schéma de conduite est une structure de connaissance de niveau tactique (i.e. situationnel). C’est « *un modèle fonctionnel de l’environnement routier* » [Bellet, 1998], [Bornard, 2012](p.48) qui va permettre au conducteur de diviser l’environnement de conduite autour de lui en différentes zones. [Mathern, 2012] précise que : « *un schéma tactique est associé à un but tactique à atteindre dans une certaine infrastructure routière. Il se compose d’une trajectoire de conduite, elle-même définie comme une séquence de zones (de déplacement) et d’un ensemble d’actions (simples ou complexes). [...] L’exécution de ces actions est assortie de conditions à respecter et à vérifier, concernant l’occurrence d’événements dans certaines zones de l’infrastructure. Les zones relèvent de deux*

dimensions. Elles sont des zones d'évolution du véhicule ou des zones d'exploration perceptive » (p.34). Les zones de déplacement correspondent donc à des espaces dans lesquels la trajectoire du véhicule peut potentiellement s'inscrire, tandis que les zones d'exploration perceptives constituent des espaces de l'environnement dans lesquels des informations pertinentes sont susceptibles de se trouver, et donc en direction desquelles le conducteur pourra orienter son regard. Les zones de déplacement et d'exploration visuelles peuvent être relatives ou absolues. Les zones absolues sont fixes dans l'infrastructure (e.g. zone d'exploration au niveau d'un passage piéton), tandis que les relatives sont dépendantes de la vitesse et de la position du véhicule (e.g. zone d'exploration dans l'angle mort du véhicule). Afin de mieux comprendre les principes détaillés des schémas de conduite, appuyons nous sur l'exemple très étudié du schéma du tourne-à-gauche à une intersection.

1.3.4.1 Le schéma du tourne à gauche

La figure 4 (p. 23) issue de [Bellet et al., 2003] illustre de manière détaillée le schéma de conduite du *Tourne-à-gauche* dans un carrefour à feux.

Le but tactique du schéma de conduite va définir un *état final* que le conducteur devra atteindre en partant de son *état initial*. Comme le précise [Bornard, 2012] : « *Un état correspond à une position et une vitesse du véhicule* » (p.48-49). Dans notre cas, le véhicule doit franchir l'intersection en tournant à gauche et donc en traversant les voies de circulation en sens opposé. Lors du franchissement de l'intersection, le conducteur passera par des *états intermédiaires* qu'il atteindra en franchissant les différentes *zones de déplacement*. Au niveau de ces zones de déplacements sont définies des actions que le conducteur doit effectuer pour atteindre l'état intermédiaire se situant à la fin de celle-ci. Ces actions ne peuvent être mise en œuvre que si certaines conditions sont réunies. Afin de déterminer si elles le sont, le conducteur devra consulter les *zones d'exploration perceptives* associées à la zone de déplacement en question. Ainsi, par exemple, dans le cas de la zone de déplacement *Z1*, le conducteur devra examiner la zone d'exploration perceptive *Ex1* pour déterminer si le feu est rouge et l'éventuelle présence de piétons sur le passage piéton. Si c'est le cas, alors la vitesse correspondante à de l'état intermédiaire en fin de *Z1* sera 0 *km/h* (le conducteur devra donc marquer l'arrêt). À certains niveaux du schéma peuvent se trouver des points de décision comme par exemple, dans la figure 4 (p. 23), à la fin de *Z2*. Dans le cas présent, il s'agit d'un point où doit être prise une décision concernant la trajectoire à emprunter pour traverser la zone de déplacement *Z3*. En effet, suivant la présence ou non de véhicules à contre sens en instance de tourne-à-gauche (zone *Ex3*), il est possible de choisir une trajectoire qui passera par a zone *Z3a* (i.e. par évitement) ou une trajectoire qui passera par la zone *Z3b* (i.e. par contournement).

Nous voyons ici que ce schéma de conduite est générique pour un tourne-à-gauche dans un carrefour à feux, et même s'il existe de nombreux carrefours qui y ressemblent fortement, la réalité présente souvent quelques variations ou particularités qui font différer légèrement la configuration du carrefour de celle du schéma que nous présentons ici. Lorsque le conducteur parvient à un carrefour de ce type et que son but tactique est de le franchir par tourne-à-gauche, le schéma de conduite est activé en MDT, la représentation tactique de la situation courante se construit alors par un mécanisme d'appariement du schéma et de la réalité perçue. Cette mise en correspondance et appelée instanciation. Ainsi, les schémas de conduite sont génériques et peuvent guider la construction de la représentation mentale occurrente de la situation de conduite, au moyen de mécanismes d'adaptation au réel. Le conducteur pourra alors découper la situation réelle, anticiper son déplacement et planifier ses actions. Le schéma

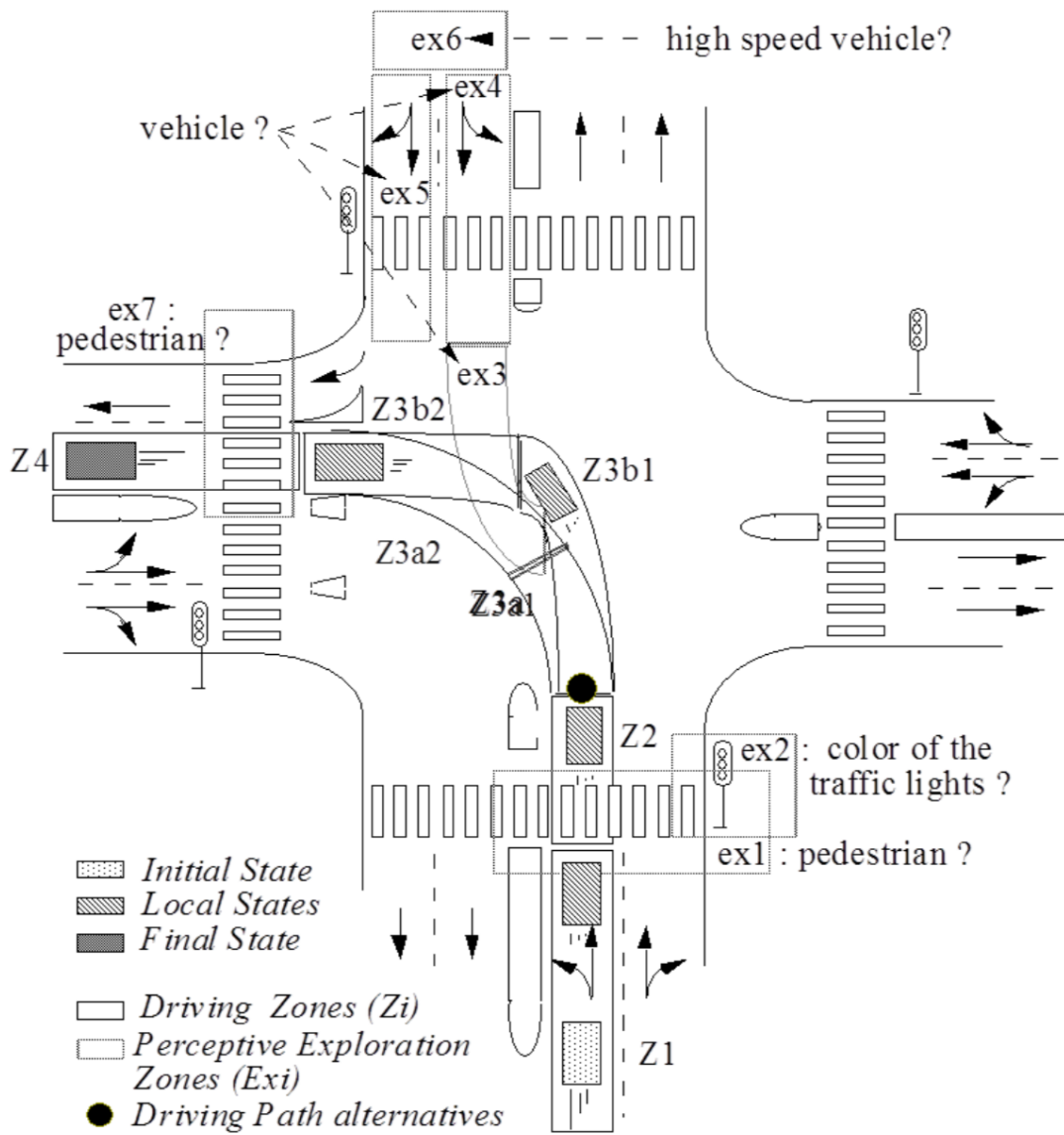


Figure 4 – Schéma de conduite de Tourne-à-gauche, [Bellet et al., 2003]

de conduite guidera également sa prise d'information.

Il ne faut cependant pas oublier que la réalité des situations de conduite n'est que rarement vide d'obstacles ou d'autres usagers. Le conducteur ne peut pas négliger ces éléments dans la mesure où leur présence et leurs déplacements peut venir interférer avec celui du véhicule, créant un risque non négligeable d'accident. Pour gérer les interactions avec les autres usagers, le modèle COSMODRIVE propose l'utilisation d'un type de connaissances particulier : *les zones enveloppes* (ZE).

1.3.5 Les Zones Enveloppes

La notion de zone enveloppe s'appuie sur trois conceptions théoriques : 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].

A la manière de la conception de [Gibson and Crooks, 1938], les zones enveloppes servent au maintien des distances de sécurité avec les objets environnants et les autres usagers. Elles sont par exemple utilisées pour la gestion des distances de suivi ou de rabattement après un dépassement. Les zones enveloppes de COSMODRIVE se basent sur les travaux de [Kontaratos, 1974] et de [Otha, 1993] qui établissent trois zones : « *la zone de sécurité* », « *la zone de menace* » et « *la zone de danger* ». Cette dernière étant la plus critique, le conducteur ne tolérera normalement pas qu'un objet y pénètre. Un objet entrant de façon imprévue dans la seconde alertera le conducteur qui le considérera comme une « *menace imminente* ». Enfin la première sera celle que le conducteur cherchera en général à préserver.

[Bornard, 2012](p.50) explique ainsi le lien entre les ZE et la théorie des schémas corporels de [Schilder, 1950] : « *En référence à la théorie des "schéma corporels" de Schilder, définissant ces schémas comme "l'image tridimensionnelle que chacun a de soi-même", 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* ».

Enfin, [Hall, 1992] indique que les distances d'interactions sociales peuvent être délimitées par des « *bulles de proximité* » déterminées culturellement. [Bellet et al., 2007] proposent donc d'utiliser les ZE dans COSMODRIVE pour gérer une dimension sociale des interactions avec les autres. Ainsi, les distances que nous adoptons avec les autres usagers peuvent revêtir une signification sociale (e.g. courtoisie, agressivité, etc.)

La taille des ZE n'est pas représentée par une simple distance métrique. En effet, si nous prenons par exemple une distance de 20 m avec le véhicule qui nous précède, suivant que nous nous déplaçons à 30 km/h ou à 130 km/h cette distance pourra paraître grande ou très petite. Nous préférons donc exprimer les distances en « *temps inter-véhiculaire* » (TIV) c'est-à-dire en temps que prendra le véhicule pour parcourir une distance donnée (par exemple, celle qui le sépare du véhicule devant lui à un instant donné). La figure 5 (p. 25) représente les zones enveloppes de COSMODRIVE.

L'utilisation des ZE dans la représentation mentale de la situation de conduite présente d'autres avantages que la simple régulation des distances au moment de l'action. Nous l'avons évoqué précédemment, la représentation tactique de la situation sert également de support pour le conducteur au déroulement de processus d'anticipation de l'évolution de la situation. Ces processus dits de « *déploiement* » ou de simulation mentale [Bellet et al., 2009], [Bellet et al., 2007] permettent au conducteur de planifier son déplacement, de tester diverses options et de prendre des décisions permet-

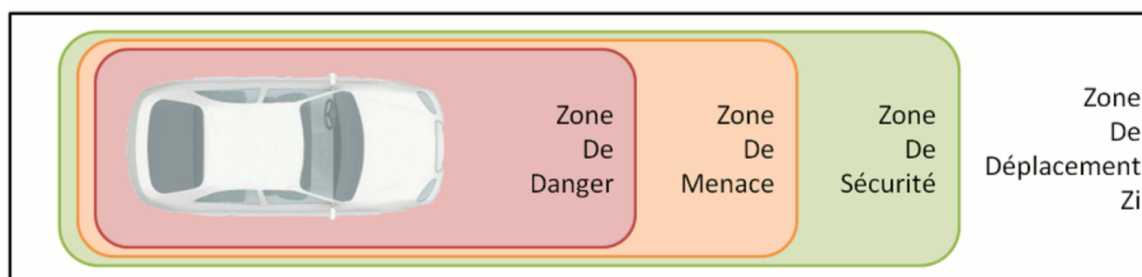


Figure 5 – Zones Enveloppes dans le modèle COSMODRIVE [Bellet, 1998] (p.153) [Kontaratos, 1974], [Otha, 1993] (adapté par [Bornard, 2012],p.51)

tant de gérer la situation par anticipation. L'application des zones enveloppes lors des anticipations va permettre au conducteur d'estimer le devenir des distances d'interaction avec les autres usagers. Il va donc pouvoir détecter, en amont, les éventuels conflits de trajectoires. Pour cela, le conducteur va appliquer les ZE aux autres véhicules suivant ce qu'il a pu estimer de leurs vitesses, de leurs trajectoires, ou supposer de leurs intentions. Cette projection des ZE sur les autres usagers autorise à la fois une anticipation de l'évolution de la situation, mais également une gestion des interactions sociales (i.e. en référence aux bulles de [Hall, 1992], [Bellet et al., 2007]). Lorsque le conducteur procède à ce déploiement cognitif en projetant les ZE pour lui même et pour les autres, il lui devient possible de simuler différentes possibilités d'évolution de la situation. Suivant les configurations, des conflits peuvent être détectés. La figure 6 (p. 26) illustre un conflit de zones enveloppes entre deux véhicules à une intersection (ici un conflit jaune-vert). Ces conflits se matérialisent par un chevauchement entre les ZE du véhicule du conducteur et celles de l'autre usager. La combinatoire des chevauchements potentiels se traduit par « une matrice de conflits » [Bornard et al., 2016]. L'analyse anticipée par le conducteur, des conflits de ZE et la détermination de leur statut dans la matrice, lui permettra de prendre des décisions pour éviter les collisions, de gérer les risques de la situation ainsi qu'une partie de la dimension sociale des interactions avec les autres usagers. Nous comprenons donc ici que les ZE peuvent jouer un rôle déterminant dans l'évaluation subjective du risque par le conducteur et sur les décisions qu'il prendra. Nous détaillerons ces processus, ainsi que quelques résultats qui ont déjà été obtenus concernant leur modélisation, à la fin du prochain chapitre (2.3.2, p. 53). Avant cela, nous allons nous intéresser à la notion de risque et à son évaluation en situation de conduite automobile.

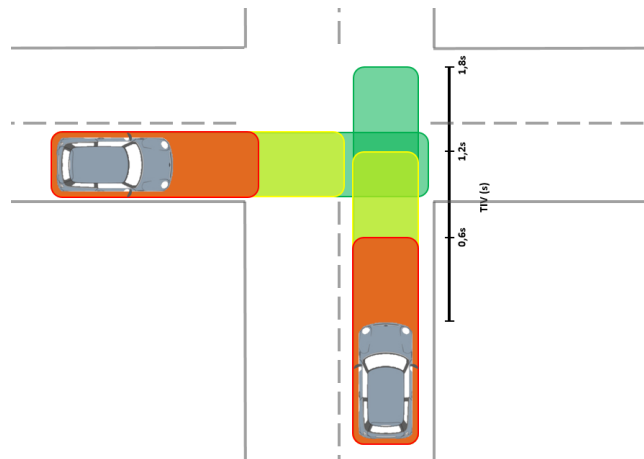


Figure 6 – Illustration d'un conflit de zones enveloppes entre deux véhicules à une intersection

Le risque et son évaluation en situation de conduite automobile

2.1 Généralités sur la notion de risque

2.1.1 Définition de la notion de risque

Avant de nous intéresser à la question de l'évaluation subjective du risque et plus particulièrement à celle des processus cognitifs qui aboutissent à sa production dans le cadre de l'activité de conduite automobile, portons dans un premier temps notre attention sur la définition même de la notion de risque et sur le champ d'étude plus général de son évaluation subjective.

2.1.1.1 Le Risque au sens commun

En premier lieu, rapportons la définition du terme « Risque » telle qu'on peut la trouver à l'entrée correspondante dans le dictionnaire Trésor de la Langue Française Informatisée ¹.

I. Le risque est subi

- A. « *Danger éventuel, plus ou moins prévisible, inhérent à une situation ou à une activité.* »
- B. « *Spécialement - Éventualité d'un événement futur, incertain ou d'un terme indéterminé, ne dépendant pas exclusivement de la volonté des parties et pouvant causer la perte d'un objet ou tout autre dommage* »

II. Le risque est affronté

- A. « *Possibilité hasardeuse d'encourir un mal, avec l'espoir d'obtenir un bien.* »

Dans sa thèse [Banet, 2010] (p. 84 - 90) retrace l'étymologie de ce concept et note que, malgré le constat d'une multiplicité des définitions de la notion de « *risque* », ce terme renvoie systématiquement à une notion de « *menace pour l'homme* » ou encore de « *danger dont ce dernier cherchera à se prémunir* ». Toutefois, dans son sens commun, le risque se distingue du danger par son caractère plus anodin, ainsi que par une plus faible probabilité d'occurrence de l'événement négatif. En résumé, le sens commun associe à la notion de risque, celle d'un danger ou d'une menace liée à une incertitude quant à sa survenue.

Cette conception, peu précise, très variable et sujette à la subjectivité, a poussé à l'établissement de définitions plus précises et scientifiques de la notion de risque.

2.1.1.2 Définitions scientifiques du risque

Les définitions plus formelles du risque sont également nombreuses et variables. Elle se sont multipliées au cours du temps, notamment en fonction des domaines d'application. Toutefois, on constate

¹<https://www.cnrtl.fr/definition/risque>

que la grande majorité des définitions plus techniques se réfèrent à deux notions avancées comme composantes fondamentales du concept de risque :

- La probabilité de survenue d'un événement
- La gravité des conséquences de la survenue de cet événement

En témoigne la liste traduite que [Banet, 2010] rapporte dans sa thèse (p.335) (issue de [Macgill and Siu, 2005]).

Dans certains cas, ces deux composantes sont prises au sens mathématique, alors que dans d'autres il s'agit plus simplement de notions conceptuelles servant à la définition du terme. Il est intéressant de noter que ces deux composantes semblent apparaître dès les premières définitions scientifiques de la notion de risque.

Historique de la notion de risque

On retrace les premiers intérêts pour la notion de risque de la part des scientifiques chez Pascal et Huygens en 1657², puis chez Daniel Bernoulli et Cramer en 1738³. Dans ces deux publications, il est d'abord question de jeu de hasard ([Hermand and Chauvin, 2008]). L'un des points intéressants est que, dès cette époque, les mathématiciens font le constat du manque de rationalité des sujets dans leur appréhension du risque et des gains. Le paradoxe de Saint-Petersbourg présenté par Cramer et N. Bernoulli et dont traite l'écrit de D. Bernoulli⁴ en témoigne. Ce paradoxe a servi de source au développement de l'étude scientifique des choix et des risques⁵. Il constitue également le premier constat objectif de l'existence d'une forme de biais des individus concernant l'évaluation des risques et des gains⁶.

Mathématiquement, la probabilité d'un événement i est notée p_i , et la conséquence (positive ou négative) de sa survenue est notée C_i . La formule de calcul du risque est alors définie comme suit :

$$r = \frac{\sum p_i \times C_i}{1} = \frac{\sum p_i \times C_i}{\sum p_i} \quad (1)$$

Cette formule indique que le risque est défini comme « le barycentre des événements pondérés par leur probabilité d'occurrence ». La mathématisation, dans un but de quantification et d'objectivation du risque, a donné naissance à une discipline spécifique : la cindynique.

2.1.1.3 Bilan de la notion générale de risque

On constate au travers de l'exploration des définitions du risque et de leur historique, que deux aspects majeurs présentent une relative constance :

- **Les composants de la notion de risque :**
 - La probabilité de l'événement
 - Les conséquences de l'événement
- **L'évaluation du risque :**
 - Aspect objectif du risque
 - Aspect subjectif du risque

²De ratiociniis in alea ludo

³Specimen theoriae novae de mensura sortis

⁴Specimen theoriae novae de mensura sortis

⁵qui aboutira plus tard à la théorie des jeux dans le domaine économique.

⁶il s'agit de ce qui sera établi plus tard sous le terme d'aversion pour le risque [Hermand and Chauvin, 2008]

Dans notre contexte, notre intérêt principal concerne la dimension subjective de l'évaluation du risque. Dans ce domaine, de nombreuses recherches ont été effectuées, et de nombreuses découvertes ont été faites. La part la plus importante de ces travaux concerne l'évaluation subjective du risque au sens général. La prochaine section évoque les principaux travaux et auteurs de ce domaine. Nous nous consacrerons ensuite plus amplement à l'étude des travaux dédiés à l'évaluation subjective du risque en contexte de conduite automobile.

2.1.2 L'évaluation subjective du risque ou « Perception du Risque »

La perception du risque est un terme consacré, qui renvoie à l'évaluation subjective du risque par les individus dans divers contextes. Nous reprenons ici ce terme pour traiter des travaux généraux consacrés à l'évaluation subjective du risque, puis nous l'abandonnerons au profit d'une terminologie plus adaptée lorsque nous traiterons des travaux liés au domaine de l'étude du conducteur et de son évaluation du risque.

2.1.2.1 Aperçu historique de la notion de « Perception du Risque »

Initialement, la différence entre l'évaluation subjective et objective du risque est apparue comme une curiosité. Les premières recherches sur ces questions ont été la source du développement d'une approche mathématique dans laquelle une estimation des valeurs (gains ou pertes) et une estimation des probabilités (des événements considérés) est effectuée pour servir de base au calcul du risque. Cette approche a ensuite été développée et axiomatisée par Von Neuman et Morgenstern en 1947, puis étendue sous le nom de paradigme de l'utilité subjective espérée. Dans ce paradigme, le sujet est considéré comme un acteur rationnel⁷.

Plus tardivement, le développement de certaines technologies complexes (i.e. énergie nucléaire, industrie chimique, etc.) ont rendu plus manifeste la différence entre l'évaluation effectuée par les experts (i.e. cindynique) et celle produite par les individus de la population au travers de l'opinion publique. La question de l'évaluation subjective du risque est alors devenue une problématique à part entière.

Starr fut le premier à proposer une méthode d'étude de la perception du risque : la méthode des « *préférences révélées* » [Starr, 1969]. Ces premiers travaux restent encore dans la conception considérant l'individu comme un agent rationnel, et concluent que les différences observées entre les experts et les profanes proviennent potentiellement d'un manque d'information. Les recherches dans le domaine ne s'arrêteront pourtant pas là, d'autres chercheurs apporteront des critiques à ces conclusions et proposeront de nouvelles approches.

2.1.2.2 La théorie des perspectives

Au cours des années qui suivirent, Kahneman et Tversky [Kahneman, 2011], prennent la suite de ces premiers travaux et mettent à jour un certain nombre de particularités de l'évaluation subjective du risque, en l'étudiant dans le contexte de la théorie économique dominante de l'époque, basée sur l'utilité espérée. Leur but était de vérifier si les agents économiques prenaient des décisions rationnelles face au risque (i.e. suivant l'utilité espérée). Leurs travaux ont été couronnés de succès et ont mis à

⁷nous verrons plus loin dans ce chapitre que Wilde, l'un des principaux auteurs dans le domaine de l'étude de l'évaluation subjective du risque, se réfère en partie à cette conception.

jour différents effets aujourd'hui fort connus, tels que ceux de *supériorité des pertes*, d'*aversion ou d'attrance pour le risque* ou encore de *renversement des préférences* ([Raufaste and Hilton, 2001]). Leur théorie des perspectives servira, entre autres, de socle au développement de l'économie comportementale.

2.1.2.3 Système 1, Système 2, heuristiques et biais

L'approche se basant sur la théorie de l'utilité espérée, suppose un examen de toutes les options et de tous les cas de figure. Or, il apparaît que dans les situations naturelles, comme par exemple celle d'un diagnostic médical, les spécialistes ne se concentrent sur l'examen détaillé que d'un nombre restreint d'options, souvent identifiées extrêmement rapidement. Kahneman, Epstein et nombre d'autres chercheurs [Slovic et al., 2004] proposent alors un modèle cognitif impliquant deux voies de traitement de l'information. L'une rapide, intuitive, peu coûteuse en ressources cognitives et souvent implicite (« *le système 1* »), l'autre plus lente, rationnelle, coûteuse en ressources cognitives et souvent explicite (« *le système 2* ») [Kahneman, 2011]. La voie rapide mettrait en place un mode de raisonnement particulier appelé *heuristique* et caractérisé par cette grande vitesse d'exécution et ce faible coût cognitif. C'est ainsi que l'hypothèse d'une influence lourde des raisonnements de type heuristiques dans l'évaluation des risques a été avancée comme une approche explicative des tendances constatées chez les sujets dans l'évaluation des risques. Ces heuristiques seraient à l'origine des déformations constatées dans l'évaluation (i.e. aversion au risque ou préférence pour le risque, supériorité des pertes, etc.) et qualifiées de biais cognitifs. Cette distinction entre les deux voies de traitement de l'information n'est pas sans relation avec celle de conscience implicite et explicite évoquée au chapitre précédent (cf. 1.3.3, 19).

D'autres chercheurs se sont investis dans ce champ d'étude et produiront d'importants travaux, comme par exemple le développement du paradigme psychométrique initié par [Slovic, 1987], que nous n'approfondirons pas ici. Par ailleurs [Cadet and Kouabéna, 2005] dans une revue de la littérature du sujet, rapportent le développement d'une approche de la question qu'ils nomment « *paradigme cognitif* ».

2.1.2.4 Le paradigme cognitif de la perception du risque

Le « *paradigme cognitif* » s'est développé en parallèle du paradigme psychométrique. Selon [Cadet and Kouabéna, 2005], les précédents paradigmes et approches développées se consacrent à l'étude d'évaluations produites de risque, de ce qu'ils appellent un « *résultat stabilisé* » ; en d'autres termes, du produit final des processus d'évaluation du risque. Si nous avons déjà évoqué dans la partie 2.1.2.3 (p. 30) les propositions de mécanismes cognitifs avancées par Kahneman et ses collaborateurs (i.e. heuristiques, biais, systèmes 1 & 2), nous n'avons pas fait état des autres conceptions qui se sont développées en ayant pour objectif d'identifier et de modéliser les processus cognitifs de l'évaluation du risque.

[Cadet and Kouabéna, 2005] dans leur revue, présentent le modèle de [Hogarth, 1980] ici rapporté en figure 7 (p. 31) comme l'un des plus pertinents. Ils indiquent qu'une des premières propriétés intéressantes du modèle consiste en la différenciation entre la sortie produite (i.e. évaluation du risque) et l'utilisation qui en sera faite au travers de l'action puis de son résultat. Ils indiquent également que ce modèle présente l'avantage de considérer l'évaluation comme produite dans un contexte, dans un environnement qui pourra potentiellement intervenir. Ils insistent enfin sur le recours au concept de

schéma, qui permet de résoudre un certain nombre de problématiques soulevées, par une approche plus séquentielle et orientée du traitement de l'information. En effet, une conception de la chaîne de production de l'évaluation du risque sous la forme simple d'une collecte importante d'informations, suivie de la production d'une évaluation, pose de nombreuses difficultés, à commencer par la potentielle surcharge du système. Les schémas décrits par Amalberti (1996) comme « *des structures de données destinées à représenter des situations génériques* » [Amalberti, 1996], permettent en tant que cadres orientés vers un but, de résoudre cette problématique, en définissant les informations pertinentes à rechercher et en limitant les possibilités de choix d'action au travers de règles à appliquer.

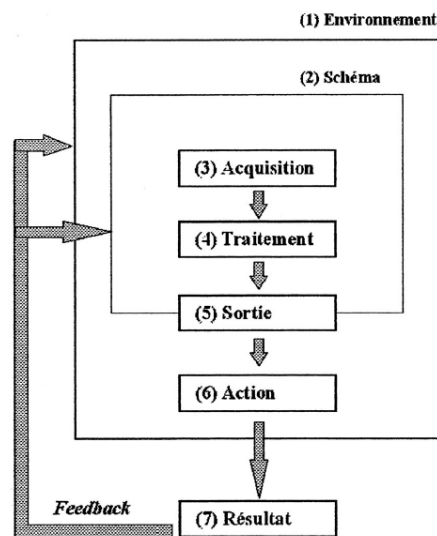


Figure 7 – Modèle conceptuel du jugement de Hogarth (1980) (issu de [Cadet and Kouabénan, 2005])

Le recours à la notion de schéma implique donc que, dans un premier temps, le sujet identifie le cadre (i.e. schéma) qui guidera le processus d'évaluation. Ce schéma prescrira des sources d'informations requises limitant ainsi la collecte et privilégiant la qualité des sources d'information à leur quantité. Le schéma bornera ensuite les processus d'évaluation et de décisions d'action suivant le but vers lequel il est orienté. Nous retrouvons donc ici la notion de schéma sur lequel nous nous appuyons déjà dans le cadre de la modélisation de la cognition du conducteur (cf. section 1.3.4, p. 21). Cadet et Kouabénan indiquent également les limitations consécutives à l'utilisation de schémas dans le cadre de la perception du risque, en particulier le cas du choix d'un schéma inapproprié dont la conséquence est d'orienter l'évaluation dans une mauvaise direction et qui peut se traduire par une difficulté du sujet à prendre conscience de son erreur et à la corriger en activant le schéma pertinent.

Suivant cette approche, l'évaluation des risques ne serait donc pas un processus simple et séquentiel basé sur une collecte aussi exhaustive que possible d'informations, suivie de la production d'une évaluation, mais un processus plus complexe et cyclique, basé à la fois sur des activités de collecte limitées d'informations, d'inférences et de vérifications d'hypothèses. Cette conception n'est pas sans conséquences. Elle implique par exemple qu'il faille un moyen de limiter le nombre d'informations à prendre en compte, ce qui peut se faire au travers de l'établissement d'une sélection des sources supposées porteuses d'informations de plus grande valeur. Cette nécessité de hiérarchiser les sources d'informations suivant leur utilité est l'une des caractéristiques pour expliquer les différences entre

l'évaluateur profane de l'évaluateur expert, ce dernier ayant, par la formation et la pratique, un avantage dès les premières étapes du traitement.

Cadet et Kouabénan abordent également une autre difficulté à surmonter dans l'analyse et la compréhension des processus de l'évaluation du risque : « *les modalités d'intégration des informations* ». Les indices collectés peuvent être de natures variables, le système cognitif doit pourtant les agencer pour produire une valeur unique et homogène. Cette procédure est nommée *intégration*.

Cette approche par modélisation cognitive de l'évaluation du risque n'est pas incompatible avec les autres approches développées dans ce champ de recherche. On constate d'ailleurs que les conceptions de Kahneman et celles de Slovic convergent d'une certaine façon et que tous les auteurs aboutissent à la proposition de mécanismes cognitifs pour rendre compte de l'évaluation subjective du risque. La théorie des heuristiques s'est également fortement développée, elle a été entre autres, alimentée par les résultats issus de la méthode psychométrique. Parmi ces résultats, l'identification du rôle joué par les émotions et les affects dans les processus d'évaluation du risque a pris de l'importance dans les conceptions plus récentes, comme en témoigne l'heuristique d'affect proposée par Slovic.

2.1.2.5 L'heuristique d'affect

Les travaux effectués dans le cadre du paradigme psychométrique ont été poursuivis et approfondis. Il en a résulté la découverte, que le sentiment de peur représente la dimension prépondérante de l'évaluation subjective du risque ; ce qui a amené Slovic à faire le lien entre ses résultats et les propositions évoquées plus haut concernant les deux voies de traitement de l'information et de production de jugements de risque. Il en vient ainsi à qualifier la voie rapide (i.e. système 1), qu'il nomme *système expérientiel*, comme marquée par les émotions et les affects, le sentiment de peur prenant toute sa place au sein de cette conception dans le contexte de l'évaluation subjective du risque. Il propose alors la notion d'*heuristique d'affect* dans laquelle il rattache ses travaux à ceux de Damasio et à sa théorie des marqueurs somatiques [Damasio, 1994] [Slovic et al., 2004]. Il démontrera en parallèle les liens entre l'affect et l'évaluation des bénéfices et des risques. La force de l'affect (positif ou négatif) est montrée comme impactant l'évaluation des bénéfices et des risques.

Finucane, sa collaboratrice, montrera en outre, que la relation inverse entre les bénéfices et les risques perçus est grandement impactée par la contrainte temporelle. En d'autres termes, moins le sujet dispose de temps, plus la relation inverse entre les bénéfices évalués et les risques perçus sera forte, ce qui, une nouvelle fois, est un argument en faveur du recours au système expérientiel et de l'importance de l'affect lors des évaluations subjectives du risque [Slovic et al., 2004].

Nous disposons maintenant d'une vision plus claire des conceptions développées dans le cadre de l'évaluation du risque de manière générale. Nous avons vu que certaines recherches se concentrent sur des évaluations très spécifiques et artificielles (e.g. jeux) ; d'autres s'intéressent aux évaluations du risque concernant une grande variété d'objets ou d'événements (e.g. industrie du nucléaire, de la chimie, tabagisme, etc.) ; enfin certaines s'intéressent aux évaluations du risque en conditions naturelles sur des objets précis et parfois complexes, comme le pilotage d'un avion ou encore un diagnostic médical. L'évaluation du risque dans le domaine de la conduite automobile n'a pas fait exception à la recherche sur ce sujet. Dans les sections suivantes, nous porterons notre attention sur les recherches spécifiquement dédiées à cette thématique en passant en revue les différents modèles cognitifs et les principaux résultats qui ont été produits.

2.2 Les modèles cognitifs de l'évaluation du risque par le conducteur

En conduite automobile, comme dans d'autres domaines où peuvent s'exercer le jugement et l'évaluation du risque, différents niveaux peuvent être identifiés. En effet, comme indiqué précédemment, l'évaluation subjective du risque peut s'exercer sur un spectre allant des aspects très généraux de cette activité, comme par exemple l'estimation du risque routier en général, aux aspects très particuliers comme l'évaluation du risque à un instant particulier, à un endroit particulier, et dans un contexte particulier. Un certain nombre de modèles ont vu le jour au cours des dernières décennies ; il nous faut les passer en revue pour bien aborder la question et l'approche que nous aurons dans ce manuscrit. Nous verrons ainsi comment les travaux de Taylor ont ouvert une aire de production de nombreux modèles. Ainsi, les modèles du risque zéro (Näätänen & Summala), d'homéostasie du risque (Wilde), d'évitement de la menace (Fuller) et de hiérarchie du risque, ont été les principaux de cette courte période. Par la suite, à un rythme plus lent, certains modèles, comme celui de l'évitement de la menace, ont été repris et modifiés par leurs auteurs, tandis que d'autres ont donné naissance à de nouveaux modèles, comme celui du moniteur de risque. Enfin de nouvelles approches ont cherché à intégrer l'évaluation subjective du risque à la modélisation de la cognition du conducteur, comme dans le cas de la conscience du risque du modèle COSMODRIVE. Nous prenons ici le parti d'examiner ces modèles dans l'ordre chronologique afin de mieux représenter la structure de leur évolution et l'intégration des données empiriques acquises au fil du temps (certains des premiers modèles sont toujours d'actualité).

2.2.1 Les premières conceptions de l'évaluation du risque en conduite automobile

Les premières considérations de la question du risque dans le domaine de la conduite automobile mettaient l'accent sur le lien entre l'accidentologie et les propriétés intrinsèques des conducteurs, leurs compétences propres. Ainsi, la conduite était considérée comme une activité visuo-motrice et les accidents étaient avant tout supposés comme étant dus à une défaillance de ces compétences ou à un manque d'habileté [Summala, 1988]. Cette conception a amené à la notion de *prédisposition à l'accident* comme une sorte de caractéristique individuelle. [McKenna, 1982] retrace l'origine de ce terme aux travaux de Greenwood and Woods au début du XX^e siècle. Entre les années 50 et 70, les résultats d'études menées dans ce domaine ont invalidé cette conception basée sur les compétences et les aptitudes. Les données d'accidentologie semblaient relativement insensibles à la fois aux actions de formations des conducteurs [Adams, 1970], [Planek, 1971] (issu de [Näätänen and Summala, 1974]) mais également aux améliorations techniques (qu'elles concernent l'infrastructure routière ou les véhicules). Ce constat baptisé *compensation du risque* [Cownie and Calderwood, 1966] a poussé les chercheurs à tenter de mieux comprendre comment les conducteurs appréhendaient le risque routier.

2.2.2 L'étude princeps de Taylor (1964)

Deux études sont fréquemment reconnues comme fondatrices de l'émergence des théories relatives à l'évaluation subjective du risque dans le domaine de la conduite automobile. Elles ont été menées par Taylor et rapportées dans son article de 1964 [Taylor, 1964]. Comme dans le domaine de l'étude de l'évaluation subjective du risque au sens général, Taylor fait le constat d'une différence entre l'évaluation des risques faite par les spécialistes de l'accidentologie et celle des usagers de la route. Les premiers cherchant à avertir le grand public des grands risques d'accidents de la route, les derniers se sentant très libres dans la mesure où, pour la plupart, ils font l'expérience de conduire plusieurs

années (ou milliers de kilomètres) sans accident. Taylor fixe alors comme objectif à ces études, d'évaluer l'impact de la variation du risque objectif (dans son amplitude et sa distribution) sur la dimension subjective. Pour appréhender cette dimension subjective, Taylor s'appuie sur des travaux antérieurs tendant à montrer que la conductance cutanée (GSR) des conducteurs est sensible à l'expérience de presque-accidents. Il décide donc de mesurer lors de deux expérimentations s'il existe un lien entre la réponse électrodermale des conducteurs et différentes portions de l'infrastructure routière présentant des niveaux d'accidentologie différents. Les résultats qu'il obtient indiquent selon lui, que la distribution de la conductance cutanée suit et reflète la distribution des valeurs d'accidentologie sur le parcours. L'auteur résume ces premiers résultats ainsi : *« un observateur extérieur stationnaire voit que là où les virages sont plus rapprochés, les taux d'accidents sont plus élevés, les vitesses sont plus faibles et les événements impactant la GSR sont plus fréquents. Un observateur dans le véhicule avec le conducteur, quant-à-lui, voit les événements impactant la GSR à une fréquence relativement constante indépendamment de la position sur le parcours. Il noterait également que le conducteur tend à passer les virages à un rythme régulier et, s'il est particulièrement observateur, il constatera que le produit de la vitesse moyenne et du taux d'accident est approximativement constant sur le parcours. »* (p. 447-448). L'auteur note ainsi que les conducteurs semblent maintenir une réponse électrodermale relativement constante tout au long du parcours en adaptant sa vitesse et son rythme de la conduite. Ce résultat majeur constitue une avancée significative dans la démarche de compréhension du phénomène de compensation du risque, aboutissant à un échec relatif des mesures d'amélioration de la sécurité des infrastructures routières. L'intérêt du recours à la GSR doit toutefois être nuancé dans la mesure où cet indicateur n'est pas spécifique de l'évaluation subjective du risque.

2.2.3 Le modèle du risque zéro (1974)

Le modèle du risque zéro (ZRT) a été proposé par Näätänen & Summala dans les années 70 (1974, 1976a) [Näätänen and Summala, 1974], [Näätänen and Summala, 1976]. Il s'intéresse à l'explication et à la compréhension du phénomène de compensation du risque. Taylor, dans son étude, proposait déjà l'idée que l'adaptation comportementale à l'origine de la compensation du risque, était en lien avec une recherche du conducteur de maintenir un certain niveau d'anxiété ou de stimulation. Le modèle du risque zéro s'inscrit dans ce courant en mettant l'accent sur les aspects motivationnels comme base de comportement et sur son adaptation en fonction du risque perçu. Il est considéré comme l'un des premiers qui soient spécifiquement dédiés à l'évaluation subjective du risque en conduite automobile. Le grand principe de ce modèle est le postulat suivant lequel le conducteur adaptera son comportement de conduite de sorte à rendre nul le risque qu'il évalue subjectivement. La figure 8 (p. 35), extraite de l'article fondateur du modèle [Näätänen and Summala, 1974] présente l'organisation et le fonctionnement du modèle.

Les modules clés de ce modèles sont :

- le Module Motivation
- le Module Moniteur de Risque Subjectif
- le Module Vigilance

Notons avant tout que le Module Vigilance entretient des interactions avec la plupart des autres modules. La volonté des auteurs est de montrer par ce biais, que chacun des modules composant le modèle est influencé par l'état de vigilance et d'attention du conducteur. Ainsi, par exemple, la motivation comme la situation de conduite, peuvent affecter le niveau de vigilance du conducteur.

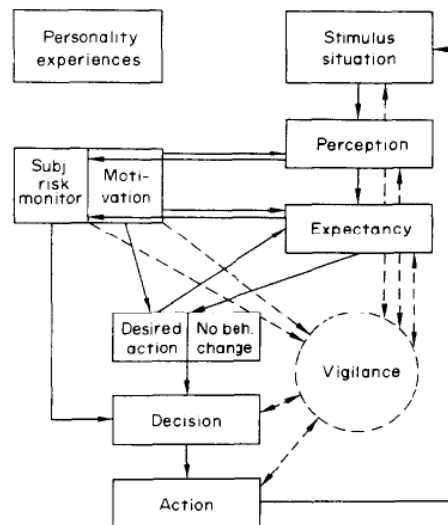


Fig. 2. A flow chart for decision-making by drivers.

Figure 8 – Modèle du risque zéro [Näätänen and Summala, 1974]

Commençons à présent la lecture du modèle par l'entrée la plus simple : la situation / stimulus. Elle représente l'environnement extérieur, la situation de conduite. Elle est donc naturellement influencée par les actions préalables du conducteur qui l'ont amené à cet état du monde. Le Module de Perception, comme son nom l'indique, assure la prise d'informations dans cet environnement. Il est la porte d'entrée des stimuli.

Toutefois, il n'est pas une simple porte passive dans la mesure où il peut être influencé par le Module des Motivations (e.g. un niveau de carburant faible facilitera l'entrée d'informations relatives aux stations services). Il peut également être influencé par les attentes du conducteur (i.e. Module « Expectancy »). Nous pouvons constater à ce stade que le Module Motivation agit sur ces deux Modules de Perception et d'Attentes.

Par ailleurs, nous constatons que le Module Motivation agit également sur le Module d'Action souhaitée. C'est ainsi que s'articule le rôle de la motivation dans le modèle. Les auteurs partent du principe que le conducteur présente une motivation à se déplacer dans l'environnement au moyen de son véhicule. Cette motivation va engendrer des actions désirées qui, en temps normal, se traduiront par des décisions (i.e. Module Décision) puis des actions (i.e. Module Action). Ces actions désirées produisent en parallèle, des attentes relatives à la situation de l'environnement. Par exemple, le souhait de vouloir prendre une direction particulière va engendrer l'attente d'indices perceptifs relatifs à cette direction (e.g. panneau de direction). Les actions souhaitées peuvent être de nature variée, comme celle d'accélérer ou de ralentir. Dans certains cas, les indices perceptifs collectés par le Module Perception traduisent un danger potentiel, un risque d'accident. Ainsi, le Module Motivation pourra être la source d'une demande d'augmentation de la vitesse du véhicule afin de réduire le temps de trajet. Toutefois, la présence d'un virage prononcé se profilant à l'horizon, rendra l'accélération dangereuse et le risque de sortie de route important. Les informations relatives à ce virage seront collectées par le Module de Perception et viendront activer le Module Moniteur de Risque subjectif. Ce module constitue une forme de seuil qui, s'il est franchi, court-circuite le Module d'Action Désirée pour directement forcer

la décision d'action, de sorte qu'une action soit effectuée pour repasser sous le seuil de risque (e.g. maintenir sa vitesse ou ralentir). Le fonctionnement en seuil du Module Moniteur de Risque subjectif explique le fait que, selon les auteurs, le conducteur recherche le risque zéro. En effet, selon eux, dès l'instant où les indices perceptifs témoignent d'un risque objectif trop élevé, le Module Moniteur de Risque détectera un risque subjectif non nul et activera la décision de gestion du risque. Les auteurs n'indiquent donc pas que le conducteur ne prend pas objectivement de risque, simplement que si cela ce produit, il s'agit d'une erreur involontaire relevant d'une mauvaise évaluation du risque. Dans un tel cas le comportement suivra alors les prescriptions faites par le Module Motivation.

Les auteurs se rattachent ainsi aux données fournies par Taylor concernant la réponse électrodermale. Ils tentent de rendre compte du phénomène de compensation du risque en indiquant que les mesures de réduction du risque accidentologique, dans la mesure où elles peuvent laisser l'impression d'une route ou d'un véhicule plus sûrs, repoussent les conditions d'activation du Module Moniteur de Risque subjectif et favorisent donc la satisfaction du Module de Motivation qui, lui, peut souhaiter un temps de trajet toujours plus court.

Dans un article de [Summala, 1988], une précision est apportée concernant le fait que le module n'est pas activé par la présence d'un risque immédiat, mais par l'atteinte d'une marge de sécurité. Ainsi, sont considérés comme activateur du Module Moniteur de Risque Subjectif, les indices perceptifs témoignant d'un non respect de ces marges.

2.2.4 Le modèle d'homéostasie du risque (1982)

En 1982 Wilde propose un nouveau modèle, lui aussi inspiré par les résultats des travaux de Taylor [Wilde, 1982] mais également par un concept fort connu en physiologie : *l'homéostasie*. Le modèle *d'homéostasie du risque* (RHT) représenté dans la figure 9 (p. 36) a été autant populaire que débattu dans la communauté des chercheurs s'intéressant aux questions de l'accidentologie en lien avec l'évaluation subjective du risque.

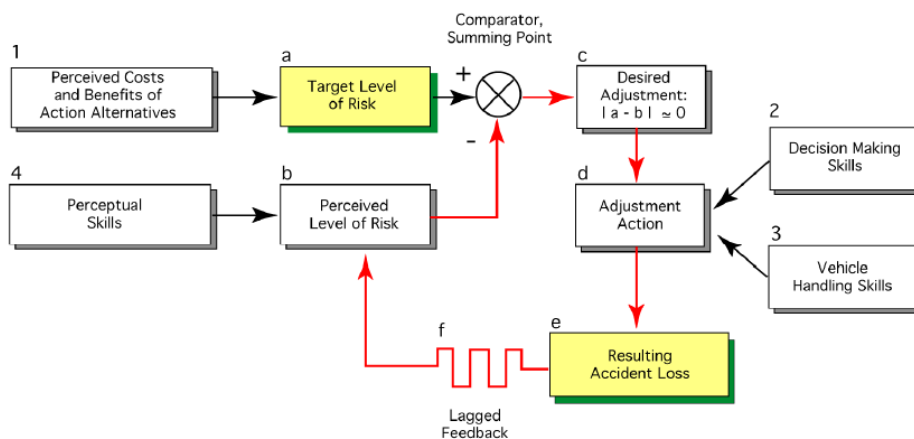


Figure 9 – Modèle d'homéostasie du risque [Wilde, 1982]

Le modèle de Wilde postule que le conducteur va déterminer un niveau de risque cible vers lequel il doit tendre et adapter son comportement en conséquence. Pour cela, le conducteur dispose d'un mécanisme de type homéostatique qui lui permet de constamment comparer le niveau de risque sub-

jectif courant au niveau cible. Ce mécanisme, similaire à celui d'un thermostat, permet selon l'auteur de rendre compte du phénomène dit de compensation du risque. La simplicité de ce modèle n'est qu'apparente et pour mieux en saisir la subtilité, il nous faut en explorer les différents aspects plus en détail.

2.2.4.1 Le concept d'homéostasie

Commençons par le concept d'homéostasie. Historiquement découvert par C. Bernard en physiologie [Bernard, 1859], puis nommé *homéostasie* par Cannon en 1929 [Cannon, 1929], le concept d'homéostasie a pour but d'expliquer comment un organisme vivant peut maintenir une certaine stabilité de son milieu intérieur. En effet, pour les organismes vivants, quelle que soit leur échelle de taille et d'organisation, il existe des bornes physico-chimiques entre lesquelles le fonctionnement est optimal (i.e. concentrations chimiques, température, etc.). Or, le milieu ambiant est caractérisé par une grande fluctuation des conditions physiques et chimiques.

Un défi important pour la survie et la pérennité, est donc de parvenir à maintenir le milieu intérieur entre les bornes du fonctionnement optimal. Pour cela, l'organisme doit disposer d'au moins trois attributs fondamentaux. Le premier permet de détecter / collecter les changements du milieu intérieur (ou ambiant), le second doit permettre de comparer cette information au niveau cible des paramètres physiques, enfin le dernier doit permettre d'agir sur le milieu intérieur de sorte à minimiser l'écart entre le niveau détecté et le niveau cible.

Le principe homéostatique est donc caractérisé par une valeur cible et une suite de mécanismes permettant de faire varier la valeur réelle en direction de cette valeur cible. L'efficacité des mécanismes d'homéostasie est dépendante de la capacité de l'organisme ou du système, à détecter les variations du paramètre considéré, à comparer ces variations à la valeur cible mais également de la capacité des mécanismes de correction à réduire l'écart constaté. Cette efficacité est également affectée par la réactivité de cette chaîne de mécanismes, c'est-à-dire les temps de détection de comparaison et de correction. L'un des intérêts du principe homéostatique réside dans son fonctionnement cyclique, ce qui lui donne une certaine flexibilité et ce qui explique également le fait qu'un mécanisme homéostatique n'assure pas une constance du paramètre qu'il contrôle, mais une oscillation plus ou moins fine de celui-ci autour de la valeur cible. La figure 10 (p. 37), tirée de [Wilde, 2014], montre différents exemples d'oscillations homéostatiques pour une même valeur cible.

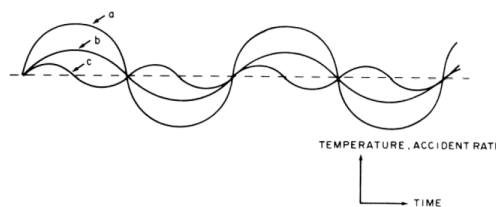


Figure 10 – Exemple d'oscillations homéostatiques [Wilde, 2014]

2.2.4.2 L'homéostasie appliquée au risque

Wilde applique donc ce concept de régulation homéostatique à l'évaluation du risque, pour expliquer l'adaptation comportementale des conducteurs aux mesures de sécurité routière et la relative stabilité des données d'accidentologie malgré les mesures prises. Il postule donc que chaque conducteur détermine un niveau de risque cible auquel il comparera la valeur de risque subjectivement évalué à chaque instant de la situation de conduite. Si le niveau de risque subjectif est inférieur au niveau de risque cible, alors le conducteur modifiera son comportement dans le sens d'une prise de risque (e.g. augmentation de la vitesse). Si le niveau de risque subjectif est supérieur au niveau de risque cible, alors le conducteur adaptera son comportement dans un objectif de réduction de la prise de risque. Enfin, si le niveau de risque subjectif correspond au niveau de risque cible, aucun changement comportemental n'est nécessaire.

Comme pour tout mécanisme homéostatique, l'efficacité de ces processus est affectée par différents éléments. Ici, le niveau de risque subjectivement évalué est dépendant des capacités perceptives et cognitives d'évaluation du risque. En cas de manque de sensibilité de ce système d'évaluation, une valeur erronée sera comparée au niveau de risque cible, ce qui aboutira à un ajustement inapproprié. De même, l'ajustement pourra être inapproprié si le comparateur n'est pas capable de déterminer la différence entre le niveau cible et le niveau de risque évalué, ou encore si les mécanismes décisionnels ou effecteurs sont défaillants. Ainsi, des erreurs de décision concernant l'action ou des capacités de gestion du véhicule altérées, peuvent conduire à une mauvaise adaptation comportementale. Wilde précise que l'estimation du niveau de risque par le conducteur à chaque instant est réalisée sur la base de trois sources d'informations :

- l'expérience passée du trafic
- l'estimation du potentiel d'accident de la situation en cours
- le niveau de confiance du conducteur en ses capacités à gérer la situation et le risque

Sur la base de l'évaluation subjective, le comparateur estime la différence entre cette valeur et la valeur cible. Une inégalité sera détectée si cette différence est supérieure à la différence détectable (i.e. « *Just Noticable Difference* »). La différence détectable est simplement la plus petite valeur de différence que le comparateur peut détecter. En dessous de cette valeur, toute différence est indétectable par le comparateur et ne peut donc être prise en compte.

2.2.4.3 La notion de risque cible

Outre ce mécanisme de rétro-contrôle et d'adaptation comportementale, une autre particularité de ce modèle requiert notre attention : la notion de risque cible. En effet, le mécanisme homéostatique permet le maintien du niveau de risque autour d'un niveau cible, ce qui signifie que ce dernier doit être déterminé par le conducteur. Selon l'auteur, le conducteur effectue une comparaison entre les gains attendus (« *expected gain* ») et les pertes attendues (« *expected loss* ») pour chaque niveau d'exposition au risque (« *level of exposure to risk* »), afin de déterminer le bénéfice net attendu (i.e. utilité espérée) de chaque niveau d'exposition au risque. La figure 11 (p. 39) présente un exemple de courbe d'utilité espérée suivant le niveau d'exposition au risque.

Suivant cette procédure, le conducteur détermine le niveau d'utilité (i.e. bénéfice) maximal possible qui correspondra au niveau optimal d'exposition au risque (« *level of exposure to risk* ») et sera choisi comme niveau de risque cible. Wilde ne précise pas à quel point ce raisonnement est rationnel chez le conducteur (cf. 2.1.2.1 p. 29). Toutefois, il indique qu'il effectue ses estimations sur la base des

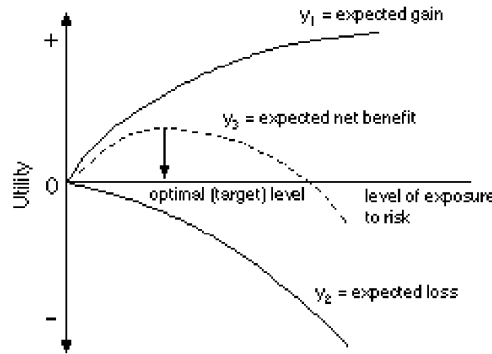


Figure 11 – Courbe d'estimation de l'utilité [Wilde, 2014]

données accidentologiques qu'il connaît, ainsi que d'autres éléments plus subjectifs. Quoiqu'il en soit, le conducteur établit un niveau de risque cible non nul, correspondant au niveau optimal d'utilité qu'il a estimé. Le modèle d'homéostasie du risque est donc motivationnel par essence, dans la mesure où le comportement est motivé par la réduction de l'écart entre le risque courant subjectivement estimé et le risque cible (lui-même déterminé par une estimation subjective d'utilité).

Ce double mécanisme a plusieurs conséquences sur la manière d'interpréter et de prédire les comportements et le risque effectivement pris par les conducteurs. Premièrement, il permet, contrairement au modèle de [Näätänen and Summala, 1976], d'imaginer un conducteur qui prendrait des risques volontairement. Deuxièmement, il exclut la recherche d'un risque nul, ce qui est à l'opposé de la proposition avancée par la théorie du risque zéro. La conception de Wilde propose que le risque puisse être subjectivement évalué comme non nul, sans pour autant que cela constitue une barrière à l'acceptation de celui-ci et donc une modification du comportement dans le sens de la réduction du risque pris. Elle autorise donc une prise de risque intentionnelle et consciente. Troisièmement, le modèle de Wilde, par sa constitution, fait reposer le comportement de prise de risque ou d'évitement du risque sur l'estimation de l'utilité espérée. Ceci a pour conséquence de retirer beaucoup d'importance à l'estimation subjective du risque dans la mesure où, quelle qu'elle soit, elle n'est pas responsable directement des choix comportementaux. Ainsi, selon Wilde, la manière la plus efficace de diminuer la prise de risque effective, n'est pas d'apporter des améliorations technologiques ou perceptives afin d'améliorer les performances des conducteurs à évaluer le risque ou à le gérer, mais d'agir au niveau de la procédure d'estimation de l'utilité subjective espérée, en jouant sur le ratio entre les bénéfices et les pertes associées à la prise de risque. Ainsi, Wilde identifie quatre voies pour modifier le seuil de risque cible dans le but de le faire baisser :

- diminuer les bénéfices associés à la prise de risques ;
- augmenter les pertes associées à la prise de risques ;
- augmenter les bénéfices associés à une conduite prudente ;
- diminuer les pertes associées à une conduite prudente ;

Selon lui, les échecs des politiques de sécurité routière sont donc à rechercher dans ce mécanisme qui permet de déplacer le niveau de risque cible vers le bas. Ainsi, si une mesure de sécurité routière ne cherche pas à faire baisser l'utilité subjective espérée d'une prise de risque, elle sera inefficace car compensée comportementalement.

2.2.4.4 Arguments et données empiriques

Pour justifier son approche, Wilde s'appuie sur différents types de résultats, certains impliquant un déplacement du risque cible et d'autres non.

Le changement de sens de circulation Suédois

Il commence par le cas très célèbre du changement de côté de conduite en Suède à la fin des années 60 [Wilde, 1982]. Il rapporte en effet que cette mesure très particulière a consisté, dans ce pays, à passer d'une conduite à gauche à une conduite à droite du jour au lendemain. Un tel changement nous inciterait intuitivement à s'attendre à une augmentation importante du nombre d'accidents dans les mois suivant ce changement. Or, l'effet constaté fut inverse. Dans les semaines suivant le changement, le nombre d'accidents a fortement diminué avant de progressivement retrouver sa valeur initiale. L'interprétation fournie par la théorie de l'homéostasie du risque est que cette décision de changement de sens de circulation a considérablement élevé l'estimation du niveau de risque accidentologique associé à cette réforme. Les conducteurs ont donc surévalué le risque de chaque situation de conduite. Cette évaluation subjective biaisée s'est alors trouvée à un niveau bien supérieur au risque cible habituel, une telle différence était donc homéostatiquement compensée par une conduite bien plus prudente. Un changement comportemental qui s'est, au final, traduit par une baisse de 17 % de la mortalité routière dans l'année suivant l'introduction de cette nouvelle mesure. Par la suite, les conducteurs ont petit à petit pu faire l'expérience d'un risque moins élevé qu'initialement supposé ce qui, associé à l'apprentissage de la nouvelle façon de conduire, a progressivement diminué l'écart entre le risque subjectif et le risque cible. Cette adaptation s'est alors traduite par une remontée progressive du niveau d'accidents aux valeurs initiales.

Cette première donnée est un cas relativement particulier dans la mesure où c'est l'évaluation subjective du risque qui a été momentanément biaisée, et non le niveau de risque cible qui a été modifié. Selon Wilde, le fait que le niveau d'accidentologie soit remonté à sa valeur initiale est un argument en faveur de sa conception selon laquelle une baisse durable de la mortalité routière ne peut être obtenue si l'on ne cherche pas à faire baisser le niveau de risque cible.

L'expérience des taxis munichois

Afin de tester la théorie de l'homéostasie du risque, et en particulier les effets d'une mesure de type amélioration technologique, une expérimentation a été conduite au début des années 90, impliquant des conducteurs de taxi à Munich [Wilde, 2014] [Aschenbrenner et al., 1987]. Le principe de l'expérimentation était simple. Deux groupes ont été créés auxquels les conducteurs de taxis ont été aléatoirement affectés. Le premier groupe était composé de véhicules équipés d'un système de freinage ABS, tandis que le second ne l'était pas. Les deux groupes étaient appariés, et rien d'autre que le système ABS ne différenciait les véhicules. La première phase de l'étude a duré trois ans, à l'issue desquels les données d'accidentologie ont été analysées. Les résultats ne montrent aucune différence importante d'accidentologie entre le groupe des taxis équipés d'un ABS et celui des taxis non équipés. Par ailleurs, des observations en aveugle ont été réalisées au cours de cette période, ainsi que des mesures d'accélérométrie. Les résultats ont révélé que les conducteurs du groupe des taxis ABS avaient une conduite significativement moins précise et plus brutale, avec des accélérations et décélérations plus fortes. Les résultats de cette première phase de l'étude tendent donc à montrer que les conducteurs bénéficiant d'un système de freinage ABS ont adapté leur comportement pour tenir compte de l'amélioration des performances de leur véhicule, de sorte à maintenir un niveau de risque équivalent.

L'étude a été étendue pour une quatrième année, au cours de laquelle la compagnie de taxi a introduit une mesure consistant à faire payer une partie des réparations par les chauffeurs de taxis accidentés. Ils étaient également avertis de la possibilité d'être licenciés en cas d'accidents trop nombreux. L'auteur rapporte qu'au cours de cette dernière année, le nombre d'accidents a considérablement chuté. Il s'agit là encore, selon Wilde, d'un argument en faveur de la théorie de l'homéostasie du risque car cette nouvelle mesure visait uniquement à modifier le rapport des gains et des pertes associés à l'occurrence d'un accident. Autrement dit, les pertes associées à une conduite risquée devenaient plus importantes et donc l'utilité espérée d'une prise de risque plus faible. Il est donc possible de supposer que face à ce changement du rapport bénéfices / pertes, les conducteurs aient abaissé leur niveau de risque cible et adapté leur comportement quel que soit le type de taxi utilisé.

Cette étude en deux temps, présente l'intérêt d'avoir cherché à évaluer les effets d'une action purement technologique sans incidence sur le niveau de risque cible puis, dans les mêmes conditions, les effets de l'introduction d'une action spécifiquement destinée au déplacement du risque cible. La stratégie adoptée dans cette étude était d'augmenter le coût en cas d'accident. Si elle a fonctionné dans ce cas, Wilde indique que cette stratégie n'est pas forcément la plus efficace en raison de ses limites. En effet, la stratégie que l'on pourrait qualifier de « *stratégie de la punition* » permet d'obtenir des effets jusqu'à une certaine limite. L'auteur évoque ainsi de nombreuses études témoignant de cette limite au-delà de laquelle les sujets refusent de se soumettre à la punition, parce qu'ils l'estiment injuste et disproportionnée. Cet effet plafond se traduit alors par l'apparition de plusieurs phénomènes. Le premier étant la stagnation de l'effet positif, vient ensuite la tendance au contournement de la règle, puis enfin la « *réactance* », que l'on pourrait aussi qualifier de *retour de flamme*, et qui consiste en un comportement volontairement orienté dans la direction opposée à celle recherchée.

Les données issues de mesures de récompense

Si la stratégie consistant à augmenter les pertes associées à la prise de risque s'avère d'une efficacité limitée, Wilde indique qu'un nombre conséquent d'études démontrent l'intérêt des mesures consistant à augmenter le bénéfice associé à un comportement prudent. Nous noterons le cas d'une telle disposition mise en place par une grande entreprise du secteur agro-alimentaire qui a pris la décision d'introduire en 1957, dans un élan visionnaire, une prime à ses 600 salariés conducteurs poids-lourd pour chaque semestre sans accident responsable. Les résultats se sont avérés extrêmement positifs et durables. En effet, le taux d'accident responsable est descendu d'un tiers la première année, puis a progressivement poursuivi sa descente jusqu'à atteindre 14 % de sa valeur initiale après une vingtaine d'années d'application de la disposition. Un autre résultat intéressant issu de ce rapport concerne celui des accidents non responsables (donc non concernés par la prime) qui a lui aussi chuté pour atteindre, en 1981, 25 % de son niveau en 1956.

Des analyses plus économiques de l'application de cette stratégie montrent que non seulement les résultats en terme d'accidentologie sont bons, mais qu'ils sont également très rentables au point de vue financier. Les incitations de ce genre, bien qu'ayant un coût initial apparent, semblent rapidement s'avérer être une source de revenus économisés bien supérieure au montant de la mesure. Les gains se traduisant par des économies de fonctionnement mais également par des économies d'assurance. Il faut toutefois noter que cette solution n'est pas miraculeuse et qu'elle comporte au moins un point faible : la tendance des conducteurs à ne pas rapporter les accidents. Les accidents les plus concernés étant les accidents mineurs, qu'il est plus simple de cacher.

Le modèle de l'homéostasie du risque insiste donc sur deux aspects important de l'évaluation et

de la prise de risque : la notion de risque cible autorisant la prise de risque volontaire et le recours au mécanisme d'homéostasie permettant de réguler le comportement autour de la valeur de risque cible.

2.2.5 Le modèle d'évitement de la menace (1984)

À partir de 1985, Fuller [Fuller, 1984] va proposer une suite de modèles d'évaluation subjective du risque en conduite automobile, le premier étant le modèle d'évitement de la menace. Situé dans la même ligne que le modèle du risque zéro [Näätänen and Summala, 1976], le modèle d'évitement de la menace suppose qu'une des motivations fortes du conducteur pendant l'activité est d'éviter les risques. Pour cela, Fuller reprend les concepts de conditionnement (classiques et opérants) issus du behaviorisme comme base explicative de l'apprentissage, du comportement et de l'estimation du risque. Selon Fuller, le conducteur serait à la recherche d'indices perceptifs témoignant d'une possibilité d'accident ou de la survenue d'un danger. Dans les cas où de tels indices sont présents, le conducteur procédera à un ajustement comportemental de type évitement de la menace. Le processus d'apprentissage consiste simplement en un mécanisme de récompense ou de punition permettant le renforcement ou l'oubli des comportements sur la base des indices perceptifs relevés. Ce mécanisme d'apprentissage n'est cependant pas considéré par Fuller comme la seule et unique voie d'apprentissage, dans la mesure où les indices perceptifs ne doivent pas nécessairement avoir déjà été observés et vécus par le conducteur pour être mémorisés. La figure 12 (p. 42) présente l'organisation du modèle de Fuller [Fuller, 1984]

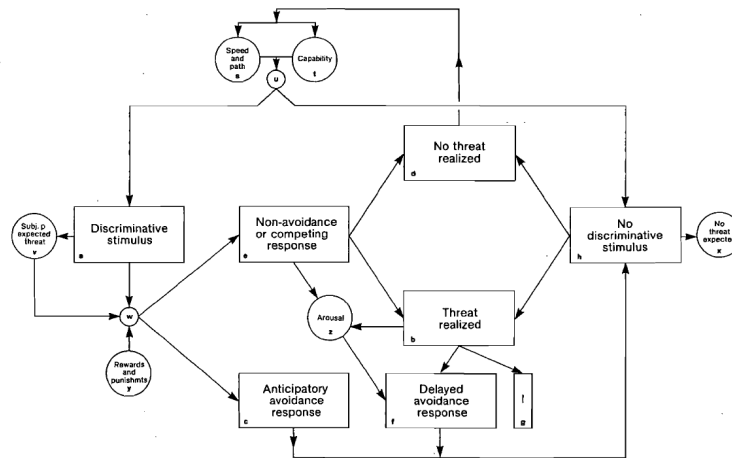


Figure 12 – Modèle d'évitement de la menace [Fuller, 1984]

Au travers de ce modèle, l'objectif de Fuller est de parvenir à gérer un certain nombre de cas qui ne le sont pas dans le modèle du risque zéro, en particulier celui de la prise volontaire de risque. En effet, le modèle d'évitement de la menace prévoit l'existence d'une réponse dite *concurrente* (« *competing response* »). Il s'agit en fait, d'une alternative comportementale plus risquée, mais permettant possiblement d'obtenir une certaine récompense (via un gain de temps ou un niveau d'excitation plus important). Fuller cherche aussi à gérer par son approche, le problème de la rareté statistique des événements associés au risque (i.e. accidents). Ceci explique qu'il propose de ne pas évaluer ces événements en eux-mêmes, mais les éventuels indices précurseurs de ceux-ci, indices que Fuller appelle « *discriminative stimulus* ».

Si nous reprenons le modèle dans l'ordre, la situation de conduite amène un conducteur avec des capacités données, dans une situation donnée. Un stimulus discriminant peut alors se présenter (e.g. virage à faible visibilité). S'il est détecté, les expériences passées, les objectifs et les compétences estimées du conducteur vont être pris en compte afin de déterminer si une action d'évitement anticipée du risque (i.e. « *anticipatory avoidance response* ») doit être mise en place, ou si l'évitement du danger peut être repoussé au profit d'une réponse concurrente.

Dans le cas d'un choix de réponse d'évitement anticipé, deux cas peuvent se produire. Si la menace se concrétise, alors le comportement d'évitement anticipé sera récompensé. Dans le cas contraire, il ne le sera pas, ce qui aura pour conséquence, une diminution de la probabilité de reproduction de l'évitement anticipé lors de la prochaine détection d'un stimulus discriminant similaire.

Dans le cas du choix d'une réponse concurrente ou d'un report du comportement d'évitement (i.e. « *non-avoidance response* »), le conducteur poursuivra son évolution dans la situation de conduite sans modification ou exécutera la réponse concurrente choisie (e.g. accélérer, dépasser, etc.). Ce choix aura pour conséquence une augmentation du niveau d'excitation physiologique (i.e. « *arousal* »). La situation, de son côté, va évoluer et voir la menace se réaliser ou non. En cas de non réalisation, le choix du report sera renforcé. En cas de survenue du danger, un évitement plus brutal (i.e. « *delayed avoidance response* ») devra être mis en place, ou bien un accident se produira. Dans les deux cas, il s'agira d'une forme de punition dont la conséquence sera une diminution de la probabilité du choix de report lors de la prochaine détection du stimulus discriminant. Fuller prévoit également le cas où aucun stimulus discriminant n'est détecté, soit parce qu'il n'existe pas, soit parce que le conducteur ne le reconnaît pas comme tel. Dans ce cas, tout se passe comme dans celui précédemment évoqué du choix d'un report de l'évitement. L'auteur prévoit enfin, un cas d'évitement anticipé partiel auquel le conducteur aura recours en cas d'incertitude trop forte concernant le stimulus discriminant.

Bien qu'étant principalement dans la veine du modèle du risque zéro, Fuller précise que le modèle d'évitement de la menace peut également rendre compte des phénomènes d'adaptation comportementale au même titre que le modèle d'homéostasie du risque. Pour cela, il évoque les cas de manifestation rare de la menace. Nous pouvons par exemple imaginer des situations de conduite où des signes précurseurs ne sont pas d'une grande fiabilité, c'est-à-dire qu'ils sont relativement rarement suivis de la survenue du danger. Dans ces cas, le comportement d'évitement anticipé va progressivement s'éteindre jusqu'à la prochaine survenue du danger. Ce cas rare va alors pousser l'évitement anticipé à réapparaître dans des situations similaires avant une nouvelle extinction progressive. Dans cette situation, nous avons donc également affaire à un phénomène cyclique.

Nous devons ici, noter que ni les règles précises de renforcement et de punition, ni les conditions à partir desquelles un évitement est considéré comme anticipé ou reporté ne sont explicitées pour ce modèle. Bien que Fuller indique qu'un évitement reporté (« *delayed response* ») correspond à une manœuvre d'évitement d'urgence, il est néanmoins, contraint d'évoquer le cas des évitements partiels qui révèlent probablement, de potentielles lacunes du modèle dans la gestion de la temporalité et de l'incertitude. Fuller proposera par la suite une évolution de ce modèle que nous aborderons plus loin dans ce chapitre.

2.2.6 Le modèle hiérarchique du risque (1988)

Van Der Molen et Bötticher, dans un article de 1988 [Van Der Molen and Bötticher, 1988], rapportent avoir testé chacun des trois précédents modèles, sur un exemple simple. Ils choisissent la

Chapitre 2. Le risque et son évaluation en situation de conduite automobile

situation de conduite suivante : un conducteur doit décider ou non de dépasser un poids lourd sur une route à double sens avec des véhicules arrivant en face tout en ayant pour objectif général de maintenir une vitesse globale qu'il a déterminée afin d'être à l'heure à un concert. Le point clé de cette situation est donc la décision d'effectuer ou non le dépassement, ce qui implique que le conducteur se livre à une évaluation subjective du risque associé à cette situation pour prendre sa décision. À titre de précision, les auteurs indiquent les postulats qu'ils fixent pour tous les modèles afin de rendre leurs résultats comparables. Ils présument ainsi que le conducteur est capable d'étudier et d'estimer toutes les probabilités et utilités subjectives pertinentes. De même, ils supposent que le conducteur choisira rationnellement l'alternative ayant l'utilité subjective la plus élevée. Pour déterminer cette solution, les auteurs se réfèrent à une formule de l'utilité subjective espérée issue de la littérature (Edwards, 1954). Les auteurs indiquent enfin qu'ils ne prétendent pas à la validité de ce test au sens psychologique, mais que celui-ci permet néanmoins de révéler certaines lacunes et contradictions dans les modèles testés. Ainsi, par exemple, ils indiquent que plusieurs de ces modèles souffrent d'un manque de spécifications, rendant hasardeuse ou impossible leur utilisation sur des données réelles. Ce constat les amène à proposer leur propre modèle « *hiérarchique du risque* ». La particularité de leur modèle est d'intriquer les processus d'évaluation du risque aux strates cognitives déjà admises dans les modèles de l'activité du conducteur (i.e. Michon, 1985). La figure 13 (p. 44) présente l'organisation du modèle.

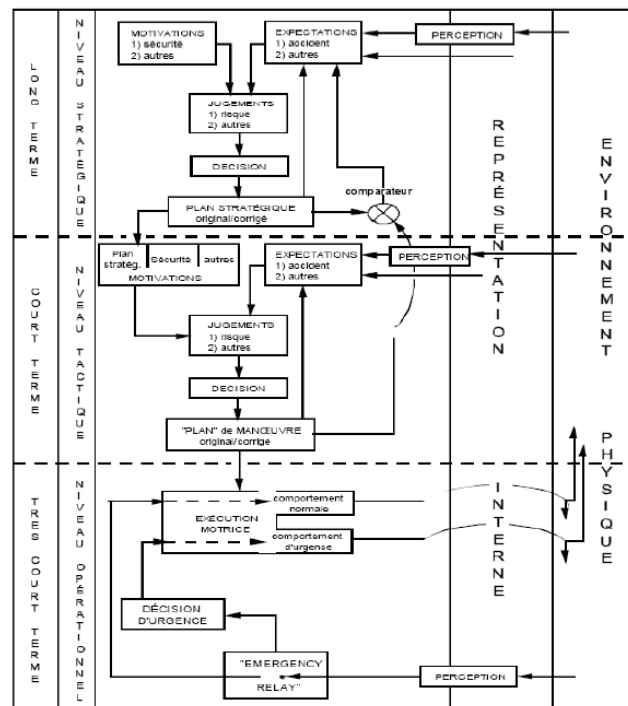


Figure 13 – Modèle hiérarchique du risque [Van Der Molen and Bötticher, 1988]

Ils reprennent ainsi les trois principaux niveaux hiérarchiques proposés par Michon [Michon, 1985] que sont : le niveau stratégique, le niveau tactique et le niveau opérationnel. Nous retrouvons donc les aspects très généraux de la planification du trajet (i.e. itinéraire général, gestion du trafic, des contraintes horaires) à effectuer au niveau stratégique, les aspects relatifs à l'analyse et à la planification de la gestion de la situation de conduite en cours au niveau tactique (i.e. décisions locales de

changement de voie, de dépassement, de suivi d'itinéraire, etc.) et enfin les aspects de très bas niveau relatifs à l'exécution et au contrôle du véhicule au niveau opérationnel (i.e. actions sur le volant et les pédales).

La particularité de ce modèle est donc que, pour chacun des niveaux hiérarchiques que nous venons d'évoquer, les auteurs ont inclus des modules spécifiquement dédiés à l'évaluation du risque et à sa gestion. Ainsi, au niveau stratégique, les auteurs placent un module d'évaluation (i.e. module jugements) qui est alimenté par les motivations d'un côté, et les attentes (i.e. expectations) de l'autre. Les auteurs font la distinction entre les motivations relatives à la sécurité routière et les autres motivations. De même, ils distinguent les attentes relatives aux accidents des autres types d'attentes. Le module de jugement du niveau stratégique effectue au moins deux types de jugements : les jugements relatifs au risque et les autres. Ces jugements sont utilisés pour prendre une décision stratégique qui sera formulée au travers d'un plan stratégique. Ce plan stratégique tiendra donc compte à la fois des aspects relatifs au risque et des autres aspects associés au trajet à effectuer en voiture (i.e. contraintes temporelles, itinéraires connus et préférés, etc.). Notons au passage que ce plan stratégique peut être corrigé à tout instant si des informations (notamment perceptives) viennent contredire les attentes stratégiques. À ce niveau hiérarchique, l'échelle temporelle est relativement longue, et généralement, les temps de décisions le sont également.

Une fois le plan stratégique établi, nous pouvons porter notre intérêt sur son impact au niveau inférieur : le niveau tactique. Ici, les modules spécifiquement dédiés aux processus d'estimation du risque sont structurés de manière similaire. Un module d'attente est approvisionné par les informations perceptives et gère les attentes relatives aux accidents potentiels et les autres attentes. Ce qui le distingue du module de même nom de niveau hiérarchique supérieur, ce sont les types d'attentes qui s'y trouvent. Ainsi, au niveau stratégique, les attentes relatives aux accidents seront très générales (e.g. *ce tronçon routier est fréquemment verglacé*), tandis qu'au niveau tactique, les attentes relatives aux accidents seront contextualisées à la situation particulière (e.g. *ce véhicule à un comportement dangereux, un accident est possible*). Au niveau tactique, le module de motivations comporte trois catégories de motivations : les motivations relatives à la sécurité, le plan stratégique et les autres motivations. Le plan stratégique représente donc une forme particulière de motivation dont le module de jugement tactique tiendra compte, en plus des autres motivations identifiées. Là encore, le jugement pourra porter sur le risque ou sur d'autres aspects tactiques de la situation de conduite. Ce jugement permettra la prise de décisions tactiques, aboutissant à un plan de manœuvre (nouveau ou correctif). À ce niveau hiérarchique, l'échelle temporelle est beaucoup plus courte (i.e. de quelques secondes à quelques dizaines de secondes).

Une fois le plan de manœuvre déterminé, il est *transmis* au niveau hiérarchique inférieur : le niveau opérationnel. Ce niveau est celui de l'action et du très court terme où le plan de manœuvre est exécuté et traduit en instructions motrices. Les auteurs intègrent également ici, une composante relative à l'évaluation subjective du risque. Toutefois, ce niveau hiérarchique étant très bas, l'élaboration des traitements relatifs au risque ne peut être aussi importante que pour les niveaux supérieurs. Les auteurs distinguent donc deux types de cas de figure :

- la conduite normale, dans laquelle le risque est géré par les niveaux supérieurs ;
- la conduite d'urgence, dans laquelle une information perceptive a indiqué un risque imminent.

Le cas de la conduite d'urgence est particulier, dans la mesure où elle fait intervenir un module de relais d'urgence (i.e. emergency relay) et un module de décision d'urgence. Ces modules servent de court-circuit permettant l'implémentation immédiate d'une manœuvre d'urgence stéréotypée (e.g.

freinage d'urgence).

En composant ainsi leur modèle, les auteurs cherchent à assembler et compléter les trois précédents, tout en les intégrant de manière plus fine à un modèle cognitif de l'activité de conduite. En ce sens, ce modèle apporte une spécification plus précise, et cherche à mieux rendre compte de la diversité des cas de figure possibles. Il permet en outre, de mieux expliciter les différents niveaux hiérarchiques au sein desquels peut prendre place l'évaluation subjective du risque. En effet, ce n'est probablement pas la même chose d'évaluer le risque pour déterminer son itinéraire que d'évaluer le risque de collision dans la prochaine seconde. Les auteurs cherchent également à maintenir la dimension motivationnelle, si importante dans le cadre de l'évaluation subjective du risque. Van Der Molen et Böttcher vont plus loin en cherchant à indiquer à quel niveau certains concepts développés dans les autres modèles peuvent s'appliquer (i.e. le moniteur de risque subjectif de Näätänen et Summala est évoqué comme pouvant être candidat au module de décision d'urgence). Enfin, dans leur article, les auteurs indiquent que le modèle peut encore être amélioré, notamment en incluant les cas d'erreurs tels que conceptualisés par [Reason, 1990].

2.2.7 Le modèle d'allostasie du risque (2000 - 2008)

Dans les années 2000, Fuller a fait évoluer son approche de l'évaluation et de la gestion du risque par évitement de la menace en proposant, tout d'abord, le modèle d'interface tâche - capacité, puis ensuite une version plus aboutie de ses conceptions sous le nom de *modèle d'allostasie du risque*.

2.2.7.1 Le modèle d'interface tâche - capacité (2000)

Le modèle de d'interface tâche - capacité de [Fuller, 2000] (ITC) met l'accent sur le caractère auto-régulé de l'activité de conduite. En poursuivant son approche de l'évitement de la menace, Fuller aborde la question sous un angle nouveau en remettant en cause l'idée que le risque subjectif évalué soit directement associé à la probabilité d'accident. Selon lui, le conducteur n'effectue pas d'estimations de la probabilité d'accident, mais une gestion de la tâche de conduite. Pour expliquer son approche, il avance le fait que les accidents sont la conséquence d'une perte de contrôle de la situation à un instant donné. En d'autres termes, un accident se produit lorsque les capacités du conducteur à exécuter la tâche de conduite, sont dépassées par les demandes de la situation. Il propose donc l'existence d'une interface entre les capacités du conducteur et les demandes de la situation de conduite. Tant que les demandes de la situation sont inférieures ou égales aux capacités, la situation est contrôlable et contrôlée. Si les demandes dépassent les capacités, alors le contrôle de la situation est perdu et, à moins d'une action compensatoire des autres acteurs impliqués (ou d'une certaine tolérance à l'erreur de la part de l'environnement), l'accident se produit. Suivant ce modèle, pour un conducteur, le risque subjectif ne serait pas le risque d'un accident mais le risque de la perte de contrôle de la situation. Cette évaluation du risque serait donc très étroitement liée à la difficulté d'exécution de la tâche de conduite. De nombreux facteurs interviennent dans l'établissement de cette interface. Comme la figure 14 (p. 47) le montre, les capacités du conducteur sont sous l'influence de facteurs permanents (i.e. « *Taining, education, competence* ») et sous l'influence de facteurs plus transitoires (i.e. « *human factors* », attention, vigilance, etc.). De l'autre côté, les demandes imposées par la situation de conduite sont également sous l'influence de plusieurs facteurs liés notamment à l'environnement de conduite, aux autres usagers de la route et au véhicule en lui-même. L'adéquation entre ces contraintes de

capacités et d'exigences de la situation, est gérée, dans la mesure du possible, par le conducteur, au travers de ses actions sur la vitesse et la trajectoire du véhicule, ou encore de la avec les autres acteurs impliqués.

Selon ce modèle, l'évaluation subjective du risque et sa gestion se font grâce à l'évaluation de la probabilité de perdre le contrôle de la situation, et donc de la difficulté éventuelle à faire correspondre les capacités de contrôle du conducteur et les demandes de la tâche de conduite.

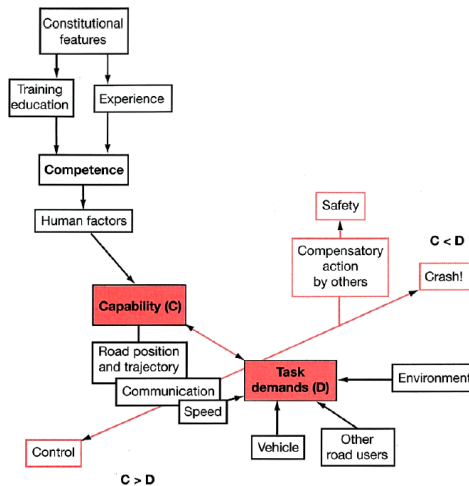


Figure 14 – Modèle d'interface Tâche - Capacité [Fuller, 2000]

2.2.7.2 La théorie de l'allostasie du risque (2008)

Quelques années plus tard, Fuller propose une version complétée du modèle d'interface Tâche - Capacité : la théorie de l'allostasie du risque. Il commence en 2005 ([Fuller, 2005]) par ajouter un mécanisme de régulation de la difficulté de la tâche de conduite en s'inspirant de celui proposé par Wilde. Il s'agit donc du mécanisme d'homéostasie de la difficulté de la tâche, dont la figure 15 (p. 48) présente le fonctionnement. Ce *thermostat de la difficulté de la tâche* permettrait au conducteur de déterminer le seuil de difficulté cible qu'il souhaite accepter. Pour justifier cette substitution de la difficulté de la tâche de conduite à l'évaluation subjective probabilistique du risque, Fuller produit des résultats issus d'une expérience dans laquelle des vidéos de conduite à différentes vitesses (filmées du point de vue du conducteur) sont présentées aux participants [Fuller et al., 2008]. Les participants devaient ensuite estimer la difficulté de la tâche de conduite, le risque subjectif et le risque d'accident. Les données montrent une très forte corrélation entre les estimations de risque subjectif et les estimations de difficulté ($r = .97$), les deux dimensions croissent de manière similaires en suivant l'augmentation de la vitesse. Les estimations du risque d'accident, quant à elles, ne suivent pas exactement la même tendance dans la mesure où, pour les vitesses faibles, elles sont évaluées comme nulles jusqu'à un certain point avant de commencer à monter. Dans une expérience complémentaire, reposant sur les mêmes principes (i.e. évaluation de situations de conduite en vidéo), il a été demandé aux participants quelle était la vitesse à laquelle la conduite était la plus confortable selon eux. La plupart d'entre eux choisirent une vitesse inférieure à la vitesse seuil à partir de laquelle ils estimaient que le risque d'accident comme supérieur à zéro. Ces résultats doivent toutefois être considérés avec précaution dans la

Chapitre 2. Le risque et son évaluation en situation de conduite automobile

mesure où le modèle de Fuller postule un mécanisme homéostatique de régulation de la difficulté de la tâche de conduite or, l'expérimentation n'impliquait pas une tâche de conduite mais le visionnage d'une séquence de conduite. Fuller avance, dans ces réflexions additionnelles, que l'homéostasie du risque de Wilde pourrait être vue comme un cas particulier de l'homéostasie de la difficulté de la tâche, dans la mesure où les données semblent indiquer que la probabilité d'accident n'est corrélée à l'estimation subjective du risque qu'à partir d'un certain seuil.

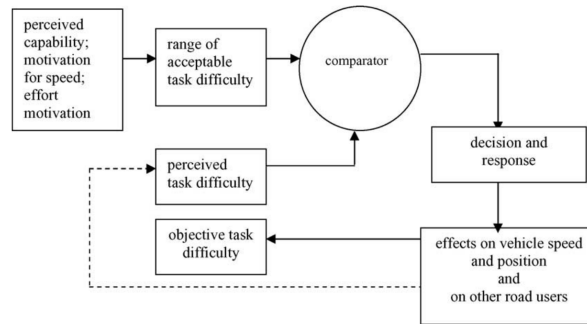


Figure 15 – Mécanisme d'homéostasie de la difficulté de la tâche [Fuller, 2005]

L'identification du lien entre l'évaluation subjective de la difficulté et celle du risque, pousse Fuller à adapter son modèle combinant l'interface tâche - capacité et le mécanisme d'homéostasie de la difficulté, pour y intégrer un mécanisme de monitoring constant du risque comme un reflet de la difficulté de la tâche de conduite. Selon cette nouvelle conception, qu'il baptise *allostasie du risque*, le conducteur dispose d'une plage de sensation de risque préférentielle. Cette sensation de risque serait en fait, le reflet du niveau de difficulté de la tâche de conduite. Elle servirait de moniteur pour que le conducteur puisse gérer la difficulté de la tâche de conduite [Lewis-Evans and Rothengatter, 2009]. La figure 16 (p. 48) présente le modèle issu de [Fuller, 2011].

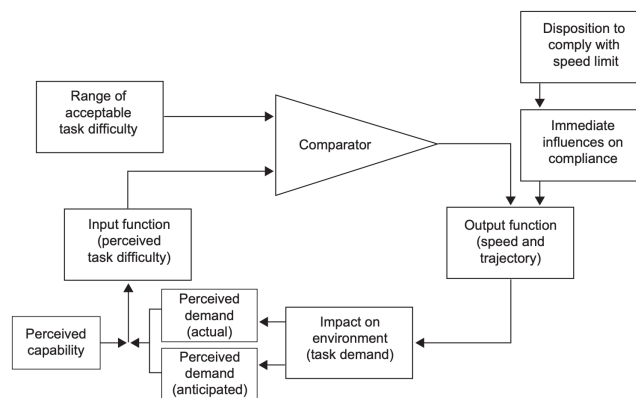


Figure 16 – Modèle d'allostasie du risque [Fuller, 2011]

Comme pour le modèle du moniteur de risque de Vaa que nous développerons dans la section 2.2.8 (p. 49), Fuller justifie son modèle en faisant référence à la théorie des marqueurs somatiques de [Damasio, 1994] ainsi qu'aux travaux de Slovic ([Slovic et al., 2004], [Slovic et al., 2007]) concernant l'heuristique de l'affect. Le modèle de l'allostasie du risque accorde donc une place primordiale aux

aspects émotionnels, dans l'évaluation du risque et la prise de décision en conduite automobile.

2.2.8 Le modèle du moniteur de risque (2007)

Durant cette même période, Vaa fait un bilan des modèles de l'évaluation du risque en conduite automobile ([Vaa, 2001], [Vaa, 2014]). Selon lui, la théorie de Wilde présente plusieurs défauts qui ont égaré les débats, et fait oublier les éléments fondamentaux provenant des données de l'expérience de Taylor et les premières idées avancées par la théorie du risque zéro. Il indique également que les découvertes récentes des neurosciences dans le domaine des émotions, et en particulier la théorie des marqueurs somatiques de [Damasio, 1994], ont été ignorées dans ce champ de recherche et qu'il serait intéressant de les rassembler en un modèle plus récent : *le modèle du moniteur de risque*. L'une des principales critiques de Vaa à l'égard du modèle d'homéostasie du risque [Vaa, 2007] concerne sa nature numérique pour laquelle nous n'avons, selon lui, aucune donnée tendant à montrer l'existence de procédures calculatoires dans l'évaluation du risque subjectif en conduite automobile. Il formule ainsi sa critique : « *Le modèle d'homéostasie du risque ne saisit ni n'imité la dynamique variée de la pensée et des sentiments, les 'courants de la conscience', les fluctuations des états automatisés mélangés aux pensées qui vont et viennent et qui sont si caractéristiques de la conduite au quotidien* » (p.53). Toutefois, malgré cette critique, Vaa reconnaît au modèle de Wilde, l'intérêt et l'apport de la notion de cible, en précisant que, selon lui, ce n'est pas un niveau de risque que le conducteur cible, mais un niveau de ressenti ou un sentiment (« *target feeling* ») [Vaa, 2011]. Il pose ainsi l'hypothèse suivante : « *En plus d'éviter les accidents, les conducteurs recherchent une certaine 'sensation cible'. Ce sentiment n'est pas le même chez tous les conducteurs, chaque conduite a un sentiment cible unique, qui n'est pas nécessairement ressenti consciemment. Les cibles peuvent être définies et caractérisées par une dimension émotionnelle, positive ou négative.* » [Vaa, 2014] (p.118).

Pour justifier son recours aux ressentis dans les processus de décision et d'évaluation subjective du risque en situation de conduite, Vaa s'appuie sur les travaux de Damasio et en particulier sur sa théorie des marqueurs somatiques. Cette théorie stipule que le processus de prise de décision, et en particulier de décision impliquant une évaluation des risques, n'est pas uniquement basé sur un examen rationnel où l'émotion et les ressentis n'ont aucun rôle à jouer. Il montre que lors de la prise de décision, les informations du système nerveux autonome en provenance du corps, et particulièrement des viscères, sont prises en compte inconsciemment et qu'elles semblent jouer un rôle déterminant dans l'évitement de solutions inappropriées ou dangereuses. Ainsi, selon Damasio, le corps constituerait une source d'information pouvant marquer positivement ou négativement les solutions envisagées, ce qui contribuerait notamment à réduire considérablement le nombre de solutions à examiner consciemment. En se basant sur ce principe, Vaa propose qu'en situation de conduite, le corps servirait de moniteur de risque, en envoyant des informations sur le modèle des marqueurs somatiques pour évaluer le risque associé aux éventuelles décisions à prendre. Selon Vaa, le moniteur de risque permettrait au conducteur de se maintenir dans la plage de ressentis cible. Il faut bien noter ici que Vaa, comme Damasio, adoptent des définitions particulières des termes *émotion* et *ressenti*. Dans leur approche, les émotions sont restreintes aux réactions neurophysiologiques somatiques, tandis que les ressentis (« *feelings* ») sont relatifs aux aspects conscients des émotions. La figure 17 (p. 50) présente l'organisation générale du modèle de Vaa.

Cette distinction entre les aspect conscients et inconscients des processus relatifs à l'évaluation subjective du risque, n'est pas sans évoquer celle faite entre les aspects implicites et explicites et la

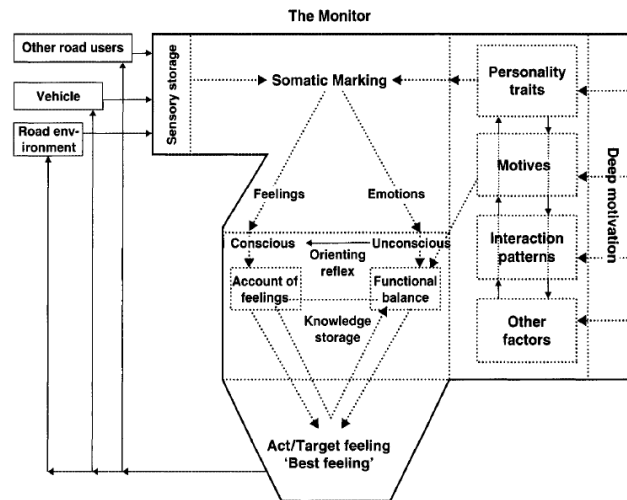


Figure 17 – Modèle du moniteur de risque [Vaa, 2007]

notion d'émergence dans le cadre du modèle COSMODRIVE (3, p. 20).

Étudions à présent les travaux déjà effectués sur cette thématique dans le cadre du développement de ce modèle.

2.3 De la perception du risque à la conscience du risque dans cadre du modèle COSMODRIVE (2010)

[Bellet and Banet, 2012] à l'issue de leurs travaux sur la question de l'évaluation subjective du risque en situation de conduite chez les motocyclistes, notent un problème terminologique autant que théorique, concernant la notion de *perception du risque*. Selon ces auteurs, ce que perçoit le conducteur, ce sont des événements, et ce n'est que dans l'analyse de la menace que font peser ces événements sur lui, que le conducteur « *évalue* » et « *se représente* » le risque. En s'appuyant sur les travaux de [Grayson et al., 2003], qui distinguent les *dangers* des *risques* (les premiers étant la cause des seconds), et en combinaison avec ceux d'[Endsley, 1995] sur la conscience de la situation, ils proposent la notion de *Conscience du risque*. Il définissent cette nouvelle conception comme « *une extension de la théorie de la conscience de la situation aux situations de conduite risquées* » ([Bellet and Banet, 2012], p.154). Ils justifient cette nouvelle terminologie en indiquant que : « *Clairement, la perception n'est pas suffisante pour la conscience du risque : les motocyclistes [comme les conducteurs] doivent également mentalement évaluer la criticité de la situation en considérant les actions qu'ils sont actuellement en train de mettre en place, et en tenant compte de leurs propres capacités à gérer le risque situationnel* » ([Bellet and Banet, 2012], p.156). Cette conception ainsi que la terminologie qui en émane étant plus précises nous les adopterons désormais.

Dans sa thèse, en 2010, Banet précise cette conception et propose un modèle cadre pour l'analyse de l'évaluation du risque chez le motocycliste. Ce modèle cadre, basé sur le cycle perception - cognition - action utilisé pour le développement du modèle COSMODRIVE est représenté schématiquement dans la figure 18 (p. 51).

L'idée générale de ce modèle est d'indiquer les différentes étapes et processus nécessaires à l'élabora-

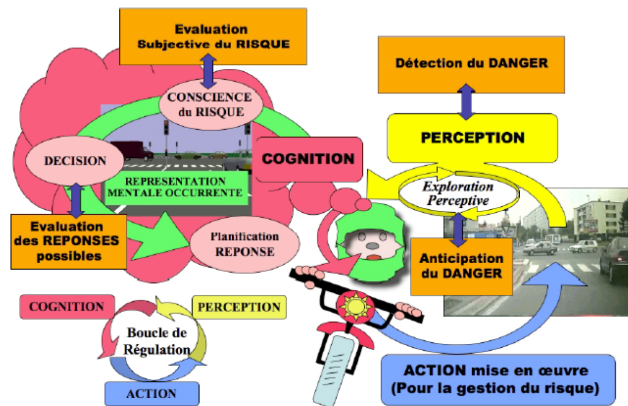


Figure 18 – Modèle cadre pour l'analyse de la conscience du risque [Banet, 2010]

tion de la conscience du risque d'une situation de conduite, en s'appuyant sur les étapes de la boucle perception - cognition - action et les conceptions relatives à l'élaboration de la représentation mentale de la situation de conduite (conscience de la situation). Ainsi, la conscience du risque selon [Banet, 2010] est le fruit d'un « ensemble de processus perceptifs et cognitifs allant de la détection du danger jusqu'à la sélection d'une réponse possible permettant d'éviter l'accident, en passant par l'élaboration d'une représentation mentale occurrente de la situation de conduite et de sa criticité. » (p.133).

Soulignons également l'intérêt de cette conception cyclique intégrant ces différentes étapes d'évaluation car elle permet non seulement l'utilisation des évaluations subjectives du risque en amont pour guider la prise de décision, mais elle permet également, par la poursuite permanente des processus, d'évaluer la criticité des décisions prises. Cette continuité dans les processus de développement de la conscience du risque ouvre la voie pour le conducteur, d'une part à la gestion du risque et d'autre part à l'identification d'erreurs de prise de décision ou d'implémentation d'actions.

Détaillons à présent ces différentes étapes ainsi que les résultats principaux qui y sont associés.

2.3.1 Détection du risque et évaluation subjective du risque

À chaque étape du cycle, des processus dédiés à l'évaluation subjective du risque peuvent intervenir. Ainsi, au niveau de la phase de perception, les processus d'exploration perceptive incluent la détection (et la recherche) de dangers anticipés. De manière générale, lors de la phase perceptive, la détection du danger est cruciale. En effet, pour une situation impliquant un élément porteur de risque (e.g. véhicule, piéton, objet sur la chaussée, etc.), en cas de non détection de celui-ci, la représentation mentale de la situation sera non seulement erronée mais cette erreur portera précisément sur un élément primordial à considérer dans l'évolution immédiate de la situation.

La distinction de ces deux étapes dissociées de détection du danger et d'évaluation subjective du risque a été mise en évidence par Banet au moyen d'un protocole expérimental mettant en œuvre un outil créé pour comparer différentes populations de motards : CRITIC (Common Risk awareness measurement meThod for Inter-population Comparisons). L'outil CRITIC est constitué de 25 courtes séquences vidéos présentant des situations de conduites à risque de collision. Pour chaque séquence l'instant à partir duquel le danger est détectable a été marqué par des experts (i.e. instructeurs de

moto-école) dans le but de permettre le calcul d'un temps de détection du danger. Les participants de l'étude devaient regarder les séquences et, pour chaque séquence, appuyer sur une touche stoppant la vidéo au moment où la situation devenait critique. Puis la séquence vidéo était reprise jusqu'à sa fin. Le participant devait alors indiquer le niveau de criticité de la situation sur une échelle continue de 0 à 100. Les auteurs ont ensuite comparé les résultats fournis par différents types de motards : experts policiers, motards expérimentés, motards sportifs novices et motards débutants. Concernant les temps de détection du danger, deux catégories de groupes de motards se distinguent : les groupes de motards expérimentés et les groupes les moins expérimentés. Les résultats montrent effectivement que l'expérience des motards joue un rôle crucial dans le temps de détection du danger, les motards peu expérimentés étant moins performants que les motards plus aguerris. Concernant l'évaluation subjective du risque situationnel (criticité), les valeurs fournies par les experts policiers étaient considérées comme une référence. La comparaison des valeurs de criticité fournies par les autres groupes de motards laisse apparaître un groupe se détachant significativement. Si les évaluations de criticité fournies par les motards expérimentés, les motards sportifs novices et les policiers ne se distinguent pas significativement les uns des autres, les motards débutants fournissent quant à eux des évaluations de criticité significativement inférieures.

Ces résultats apportent deux informations cruciales. Ils révèlent, d'un côté, le rôle important de l'expérience de conduite dans l'acquisition des compétences associées à la conscience du risque ; de l'autre, ils révèlent que les compétences d'évaluation subjective de la criticité et de détection du danger ne se rapportent pas au même type d'apprentissage. Les résultats obtenus suggèrent donc bien que la détection du danger et l'évaluation de la criticité de la situation sont le fruit de processus différents dont les apprentissages sont spécifiques. Ainsi dans cette étude, les motards sportifs novices semblent déjà capables d'évaluer efficacement la criticité générale de la situation sans toutefois être en mesure de détecter le danger aussi rapidement que leurs homologues plus expérimentés. Les motards très débutants, de leur côté, semblent n'avoir ni acquis l'aptitude à détecter rapidement le danger ni acquis celle d'évaluer à son juste niveau la criticité générale de la situation.

Les conclusions de [Bellet and Banet, 2012] semblent donc bien indiquer que détecter le danger ne suffit pas pour obtenir une bonne conscience du risque. Lors de la phase dédiée à la cognition du cycle, la représentation mentale de la situation est élaborée ; elle constitue la conscience de la situation (cf. 1.3.3, p. 19). À ce niveau s'élabore une évaluation subjective du risque. Autrement dit, la représentation mentale de la situation se *teint* d'une valeur globale de criticité actuelle et anticipée, via l'inclusion des informations perceptives mais également de celles fournies par les connaissances du conducteur. Cette évaluation subjective du risque doit également associer une évaluation des réponses possibles, en tenant compte des capacités perçues du véhicule et de celles disponibles auto-évaluées par le conducteur. Ce jugement permet d'alimenter les processus de prise de décision, qui à leur tour, serviront de base à la planification de la réponse. La réponse planifiée sera ensuite mise en action en intervenant sur les commandes du véhicule et inclura une gestion des risques identifiés et évalués. Le plan d'action permet en outre, de produire des anticipations concernant l'évolution de la situation et donc de déterminer des zones de contrôle à explorer perceptivement et pouvant, entre autres, concerner des dangers anticipables. Nous revenons ainsi aux premières étapes du cycle que nous avons décrites.

Dans ce domaine, [Banet, 2010] fournit d'autres résultats venant éclairer l'importance des connaissances de ses propres capacités d'analyse et de gestion dans l'évaluation de la criticité d'une situation de conduite. Pour cela, un autre groupe de motards a été comparé à ceux précédemment cités : les utilisateurs de scooters 125cm³. Ces motards ont la particularité de ne pas se revendiquer comme ap-

partenant à la catégorie des motards tout en utilisant régulièrement un véhicule similaire. En outre, ils ne bénéficient pas de la formation spécifique que sanctionne l'obtention du permis moto. Lorsqu'ils ont été soumis au protocole CRITIC, ces motards se sont révélés avoir des performances d'évaluation de la criticité des situations de conduite significativement inférieures aux motards experts et expérimentés. Leurs performances dans ce domaines se sont mêmes révélées plus proches de celles des débutants que des jeunes motards sportifs. Ce type de résultats peut être interprété comme le fruit d'une potentielle meilleure connaissance acquise par les motards sportifs au cours de leur formation et par leur recherche de performances durant leurs premiers mois de pratique de la moto sur route.

L'évaluation de la criticité générale de la situation de conduite, repose également sur un certain nombre d'anticipations à propos de l'évolution de la situation de conduite. Ces anticipations se font par le biais du processus de déploiement cognitif au cours duquel les zones enveloppes jouent un rôle particulier dans l'évaluation et la gestion des risques.

2.3.2 De la conscience à la gestion du risque : les zones enveloppes et les matrices de conflit

Comme nous l'avons présenté en 1.3.5 (p. 24), les zones enveloppes (ZE) assurent plusieurs fonctions dans la gestion de la situation de conduite. Elles se rapportent principalement à la gestion des distances de sécurité avec les autres objets de l'environnement. À ce titre elles peuvent donc être utilisées lors des processus d'évaluation subjective de la criticité situationnelle en s'appuyant sur un processus de déploiement cognitif [Bellet et al., 2009]. En effet, le conducteur projette mentalement les ZE pour lui même et pour les autres usagers. Cette simulation mentale lui permet d'anticiper les chevauchements de trajectoires et donc les conflits potentiels à venir. Il procède ainsi à un examen des conflits de zones enveloppes prévisibles suivant les différentes évolutions possibles de la situation de conduite. Ce processus de déploiement et d'anticipation va permettre au conducteur d'estimer la criticité de la situation dans son devenir et de prendre des décisions sur les actions les plus appropriées au maintien des conditions de sécurité.

[Bornard, 2012] propose, en suivant ce raisonnement, une matrice de conflit adaptée aux situations de tourne-à-gauche. La figure 19 (p. 53) illustre cette matrice. Le code couleur utilisé traduit le niveau de risque associé à chaque conflit.

		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 – Exemple de matrice de conflit de Zones Enveloppes en situation de tourne à gauche [Bornard, 2012] (p.178)

Sur la base de cette matrice, il est possible d'associer un niveau de risque de collision en fonction de chaque recouvrement entre une Zone Enveloppe du véhicule du conducteur et une Zone Enveloppe du véhicule d'un autre usager. Pour mieux comprendre et interpréter cette matrice de conflit, il nous faut porter notre attention sur la manœuvre de tourne-à-gauche telle qu'elle a été étudiée par [Bornard, 2012].

2.3.3 Prise de décision et gestion du risque en situation de tourne à gauche

Pour étudier l'évaluation du risque et les prises de décisions lors des manœuvre de tourne-à-gauche, Bornard a eu recours à une méthodologie innovante dans laquelle il a utilisé son implémentation du modèle COSMODRIVE pour effectuer des prédictions de conflits de ZE et en déduire des hypothèses opérationnelles de décisions de franchissement de l'intersection. Une fois ces simulations effectuées, il les a confrontées aux décisions et comportements effectifs de conducteurs humains dans la même situation de conduite simulée. Le fait que les simulations du modèle COSMODRIVE et les situations de conduite expérimentales aient eu lieu dans le même environnement simulé garantit une comparabilité des résultats fournis par le modèle et des résultats fournis par les conducteurs humains. Pour effectuer les simulations avec COSMODRIVE Bornard se base sur le schéma de conduite de la manœuvre présenté au chapitre 1, figure 4 (p. 23), sur une implémentation des ZE et sur une prise en compte de différentes trajectoires et différentes vitesses possibles lors de la manœuvre de franchissement de l'intersection.

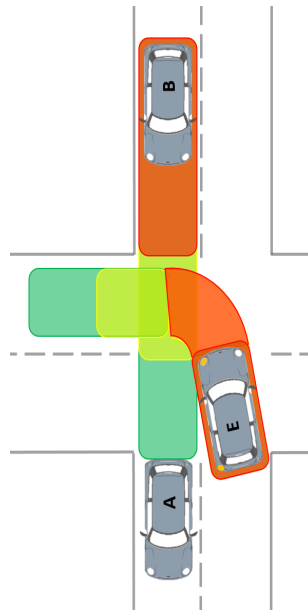


Figure 20 – Illustration d'une situation de tourne à gauche avec conflit de ZE

La figure 20 (p. 54) présente une situation de tourne à gauche telle qu'étudiée par Bornard. Lors de cette manœuvre le conducteur doit s'insérer entre deux véhicules circulant dans le sens opposé (i.e. véhicules A et B) ; les conflits de ZE ont lieu entre le véhicule du conducteur (i.e. Ego) et le véhicule du trafic arrivant dans la voie en sens opposée (i.e. voiture B). Pour prendre sa décision, il doit estimer la taille de l'espace entre deux véhicules dans le trafic arrivant en sens opposé et projeter les zones

enveloppes sur le véhicule fermant l'espace, afin d'estimer les conflits potentiels avec ses propres ZE. En fonction du TIV disponible et de la vitesse à laquelle il réalise la manœuvre de tourne à gauche, les conflits de ZE seront différents. La figure 21 (p. 55) présente les différents types de conflits de ZE possibles suivant le TIV et le temps de franchissement de l'intersection par le conducteur.

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

Figure 21 – Conflits de Zones Enveloppes en situation de Tourne-à-gauche issu de [Bornard, 2012] (p.178)

La matrice de conflit (figure 19, p. 53) permet d'interpréter les conflits présentés dans la figure 21 (p. 55). Ainsi, un conflit rouge-vert représentera un risque modéré, un conflit rouge-orange un risque très important et un conflit rouge-rouge un risque considérable, les autres cas aboutissant soit à un accident, soit à une absence de conflit. En confrontant ses hypothèses aux décisions et comportements des conducteurs, Bornard montre qu'il existe non seulement un lien entre la taille de l'espace dans le trafic et le pourcentage de décision de franchissement des conducteurs, mais également que ce lien est bien expliqué par la matrice de conflits de Zones Enveloppes. La figure 22 (p. 56) montre les conflits de ZE associés aux pourcentages de franchissement de l'intersection tels qu'ils ont été enregistrés auprès des participants lors de son expérimentation.

De plus, lors de son étude, [Bornard, 2012] demandait aux participants d'évaluer les criticité des situations de tourne-à-gauche. Il obtient alors pour chaque taille de gap dans le trafic, une estimation sur une échelle continue de 0 à 100, du risque subjectivement évalué par les participants. Les résultats montrent alors une forte corrélation entre la taille de l'espace et la criticité subjectivement estimée par les participants. Le graphique de la figure 23 (p. 56) traduit cette relation.

L'auteur montre que ce graphique présente plusieurs « sauts » (marqués ici en rouge) au niveau de certaines valeurs d'espaces dans le trafic et correspondant aux changements de types de conflits dans la matrice de conflits. Cet élément est donc en faveur du caractère explicatif de la matrice de conflits autant en ce qui concerne les décisions des conducteurs qu'en ce qui se rapporte aux valeurs de criticité de la situation de tourne-à-gauche.

Nous avons donc par le biais de ces résultats, une meilleure compréhension de l'utilité des zones enveloppes pour permettre au conducteur de produire une bonne conscience du risque situationnel.

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

Figure 22 – Conflits de Zones Enveloppes et pourcentages de décisions de franchissement issu de [Bornard, 2012] (p.179)

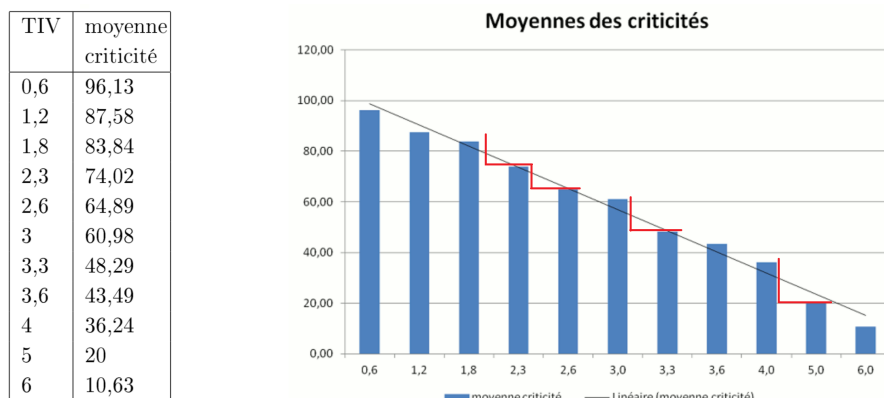


Figure 23 – Criticité moyenne du tourne-à-gauche suivant la taille des gaps dans le trafic issu de [Bornard, 2012] (p.181)

Toutefois, nous ne savons pas si cette conception permet d'anticiper d'autres types de décisions de la même manière, pour d'autres types de manœuvres. Qu'en est-il pour les situations de changement de voie, en particulier dans les cas de changements de voie impliquant une insertion du véhicule dans un espace entre deux véhicules du trafic ? Pour répondre à cette question, il nous faut aborder plus en détail la manœuvre de changement de voie.

Le changement de voie en conduite automobile

Le premier chapitre nous a informés sur la conduite automobile en général, sur sa complexité et sur notre approche en modélisation cognitive du conducteur. Le second chapitre nous a renseignés sur les notions de risque, d'évaluation subjective du risque ainsi que sur les approches existantes dans ce domaine et sur la manière dont le problème a été abordé dans le cadre du développement du modèle COSMODRIVE. Nous avons vu par la même occasion comment avait été étudiée la question de l'évaluation du risque et de la prise de décision dans le cadre de la manœuvre du Tourne-à-gauche.

Ces deux chapitres plus généraux nous permettent maintenant d'explorer (plus particulièrement), la manœuvre qui nous intéresse dans le cadre de cette thèse : *le changement de voie* (CDV). Le présent chapitre se consacrera à cet aspect, en présentant rapidement quelques généralités à propos de cette manœuvre avant d'investiguer plus en détail, les données apportées par la littérature scientifique sur le CDV ainsi que sur les indices comportementaux qui lui sont associés. Nous terminerons par un bilan des recherches déjà effectuées sur ce sujet dans le cadre de COSMODRIVE et nous présenterons comment, au regard de cet état des lieux, nous pouvons envisager cette manœuvre, les évaluations du risque et les décisions associées, sous l'angle de la cognition du conducteur. Nous poserons alors les éléments qui restent en question et amorcerons quelques hypothèses, lorsque cela sera possible.

Nous ne nous attacherons pas nécessairement à adopter un déroulement chronologique, mais suivrons plutôt un cheminement par indice comportemental et méthodologie d'étude. En effet, la variété des typologies d'études considérées, rendrait une lecture chronologique moins pertinente et ordonnée.

3.1 Généralités sur la manœuvre de changement de voie

Le changement de voie est une action de conduite fréquente, qui peut avoir différents objectifs (stratégiques ou tactiques). Son principe est simple et consiste, pour le conducteur, à déplacer latéralement son véhicule depuis la voie dans laquelle il se trouve vers une voie de destination (à sa gauche ou à sa droite). Certaines manœuvres, potentiellement plus complexes, peuvent impliquer un ou plusieurs changement(s) de voie. Par exemple, le dépassement consiste en un premier CDV suivi d'une phase de maintien dans la nouvelle voie, avant un nouveau CDV au cours duquel le conducteur revient dans sa voie d'origine, après avoir dépassé un ou plusieurs autre(s) véhicule(s). L'illustration 24 (p. 60) issue de [Mathern, 2012] indique une version simplifiée du détail des sous-schémas du dépassement, parmi lesquels nous trouvons bien deux changements de voie.

Les raisons d'un changement de voie peuvent être variables. Dans la littérature, sont généralement distingués deux grands types de changements de voie [Gurupackiam and Lee Jones, 2012], [Nilsson et al., 2016] :

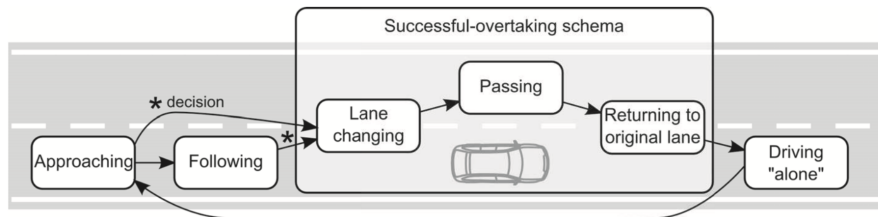


Figure 24 – Schéma tactique simplifié du dépassement sur autoroute, [Mathern, 2012]

- *Les changements de voie obligatoires (mandatory lane changes)*¹, pour lesquels le conducteur n'a pas le choix. Il doit exécuter la manoeuvre s'il veut poursuivre sa route (e.g. bifurcation de voie, encombrement de la voie actuelle, etc). Au sein des CDV obligatoires se trouvent deux cas particuliers : les entrées et sorties de routes (i.e. autoroute, périphérique, etc.)
- *Les changements de voie facultatifs (discretionary lane changes)*² pour lesquels le conducteur n'a aucune obligation d'effectuer la manoeuvre pour poursuivre sa route. Dans ce cas, le conducteur procédera au changement de voie pour des raisons qui lui sont propres (e.g. maintien de la vitesse, anticipation d'une particularité du trajet, etc.)

Enfin concernant la typologie des changements de voie, on peut également faire la distinction entre les CDV effectués en milieu urbain et les CDV effectués sur autoroute.

Le risque associé au CDV réside rarement dans le déplacement latéral du véhicule en lui même. Il repose principalement sur deux éléments : soit l'éventuelle contrainte imposée par un élément dans la voie d'origine (e.g. obstacle lors d'un CDV obligatoire) ; soit le trafic, son sens et sa vitesse dans la voie de destination. [Jula et al., 2000] indiquent qu'en 1991, aux États-Unis, les collisions ayant eu lieu durant les changement de voies / insertions représentaient 4 % du total des collisions enregistrées par les forces de police. Les auteurs indiquent que, de surcroît, la plupart de ces collisions ont un impact important sur la fluidité du trafic et donc des conséquences économiques importantes. La question de la gestion du trafic a donc beaucoup guidé les recherches concernant cette manoeuvre. Par ailleurs, selon [Peng et al., 2013], les mauvais CDV représenteraient 8 % des accidents en Chine. Quant à [Schmidt et al., 2014], ils indiquent qu'en 2011, en Allemagne, 13 % des accidents avec blessures sur autoroute étaient associés à un CDV, ce qui ajoute aux motivations sur la gestion du trafic, une motivation associée à la sécurité de cette manoeuvre souvent fréquente sur les axes à vitesse élevée.

3.2 Revue de la littérature sur les changements de voie

Parmi les études que nous avons trouvées à propos des changements de voie, la plupart d'entre elles ont pour objectif primaire ou secondaire de pouvoir anticiper la décision et prédire le comportement de changement de voie du véhicule. Cette information est jugée utile pour plusieurs domaines : l'anticipation et la modélisation du trafic, la prévention des collisions et la sécurité routière, ou la compréhension et le monitoring du conducteur.

¹Nous emploierons également parfois le terme de CDV *contraint* dans le reste de ce mémoire.

²Nous emploierons également parfois le terme de CDV *libre* dans le reste de ce manuscrit.

3.2.1 Les différentes approches

Dans cet objectif on trouve au moins trois grandes typologies d'études :

- Les études visant à une modélisation mathématique et / ou statistique du CDV à une échelle micro ou macroscopique : ces études, principalement dédiées à la modélisation du trafic, ont avant tout recours au traitement de grandes quantités de données de déplacement de véhicules, obtenues depuis l'infrastructure d'un site particulier (e.g. caméra sur un tronçon d'autoroute). Le comportement détaillé du conducteur est donc rarement connu, l'unité est le véhicule.
- Les études visant à anticiper la décision de CDV sur la base du comportement du conducteur : ce type d'étude s'intéresse au comportement du conducteur mais en n'ayant pour objectif que son anticipation au moyen de modèles mathématiques ou statistiques (e.g. machine learning, etc.). Ces études apportent des informations concernant le rôle éventuel de tel ou tel type de données (e.g. eye tracking, angle volant, etc.) pour la prédiction de la décision et / ou de la trajectoire, sans pour autant avoir d'exigence quant à la sémantisation du comportement. Elles fournissent ainsi des modèles ou des approches permettant de prédire le comportement, sans toutefois que le modèle ou l'approche proposés ne puissent expliciter une éventuelle chaîne de traitements cognitifs aboutissant au comportement. Ces études ont donc une visée prédictive, voire descriptive, mais non explicative (cf. 1.2.5, p. 15).
- Les études visant à décrire le comportement observable du conducteur lors des changements de voie : ces études portent le plus souvent sur l'analyse du comportement d'exploration visuelle du conducteur et ont un objectif descriptif et potentiellement explicatif.

Lors de notre bilan de cette littérature, nous nous concentrerons donc principalement sur ces deux derniers types d'études, dans la mesure où ils nous apportent a minima des informations sur le comportement du conducteur, et parfois sur les processus cognitifs supposés associés à la décision.

3.2.2 Les étapes et indicateurs de changement de voie

Lors d'un changement de voie et pendant les instants qui le précèdent, un certain nombre d'éléments peuvent informer l'observateur, de l'initiation potentielle de la manœuvre. Deux questions ont ainsi été souvent étudiées :

- *Quelle est la temporalité et la durée des différentes étapes d'un changement de voie ?*
- *Quels sont les indices pertinents permettant de prévoir un CDV ?*

À ces deux questions s'est logiquement ajoutée une troisième synthétisant les deux précédentes :

- *À partir de quand peut-on prévoir qu'un changement de voie va avoir lieu et sur la base de quel(s) indice(s) ?*

Nous pouvons identifier deux principaux types d'indicateurs utilisés : (1) les indicateurs physiques liés aux vitesses et positions des véhicules impliqués et à la configuration géométrique de l'infrastructure (i.e. lignes de séparation des voies, feux, etc.) et (2) les indicateurs associés au comportement du conducteur comme, par exemple, l'activation du clignotant, la position du regard, l'orientation de la tête ou encore l'angle du volant.

Les études cherchant à prévoir l'occurrence d'un CDV se sont donc appuyées sur un ou plusieurs de ces indicateurs pour identifier, soit les conditions favorables de l'environnement de conduite, soit les signes témoignant de *l'intention de changement de voie (lane change intent)* (c.f. figure 25, p. 65).

Concernant la question de la temporalité des CDV, se pose également le problème du découpage

de cette manœuvre en différentes phases, ainsi que l'identification de leurs différentes caractéristiques.

3.2.2.1 La durée des changements de voie

La littérature n'identifie pas formellement de temporalité stricte pour la durée des changements de voie, et ce pour plusieurs raisons. La première est associée au type de changement de voie et à son contexte d'exécution. En effet, il est relativement logique qu'un changement de voie obligatoire en milieu urbain prenne moins de temps qu'un changement de voie facultatif sur autoroute. La seconde concerne les critères d'identification de début et de fin de la manœuvre, pour lesquels il n'existe pas de réel consensus. Certaines études incluent par exemple une phase pré-changement de voie tandis que d'autres non. La question de la durée des changements de voie a tout de même fait l'objet de recherches. Ainsi, par exemple, [Salvucci and Liu, 2002] déterminent dans leur étude, que les changements de voie durent en moyenne 5.14 s. [Gurupackiam and Lee Jones, 2012], quant à eux, produisent le tableau 2 (p. 62) qui synthétise les durées moyennes de CDV identifiés dans la littérature. En effectuant la moyenne des moyennes de chaque étude, nous obtenons une durée de 4.94 s. Bien que ces données restent approximatives et que leurs sources soient variées, elles tendent à indiquer qu'un changement de voie dure environ 5 s. Cette information reste toutefois à considérer avec précaution, dans la mesure où les études sources ne sont pas d'une grande homogénéité en terme de contexte routier.

Étude	Moyenne (s)	Ecart-Type (s)	Plage (s)
Tijerina et al., 2005	5	-	3,5 à 6,5
Tijerina et al., 2005	5,8	-	3,5 à 8,5
Lee, 2006	6,28	2	-
Thiemann et al., 2008	4,01	2,31	-
Toledo et al., 2007	4,6	2,3	1,0 à 13,3
Gurupackiam et al. 2012 (Heure de pointe habituelle)	4,19	0,81	2,6 à 6,0
Gurupackiam et al. 2012 (Heure de pointe inhabituelle)	4,71	0,9	2,7 à 6,5

Tableau 2 – Tableau de bilan de la littérature sur la durée des changements de voie, adapté de [Gurupackiam and Lee Jones, 2012]

3.2.2.2 Les phases du changement de voie

Pour bien comprendre la manœuvre de CDV, un certain nombre d'auteurs ont pris le parti de la segmenter en différentes étapes. Le nombre d'étapes ainsi que les critères de segmentation sont variés suivant les auteurs et les objectifs des études.

Ainsi par exemple [Finnegan and Green, 1990] identifient quatre grandes étapes pour les CDV obligatoires :

- (1) Temps de détection du message d'obligation de changement de voie par le conducteur (e.g. panneau, accident, etc.)
- (2) Intégration du message

- (3) Planification du CDV
- (4) Exécution de la manœuvre

[van Winsum et al., 1999], quant à eux, ne s'intéressent pas à la période précédant le changement de voie, mais au séquençage de la manœuvre elle-même, en se basant sur les valeurs de l'angle du volant. Ils déterminent ainsi trois phases :

- (T1) Temps séparant le dernier angle volant à 0° du premier angle maximum
- (T2) Temps séparant le premier angle volant maximum du retour à 0°
- (T3) Temps séparant le moment du retour du volant à 0° du premier angle négatif maximum.

[Salvucci et al., 2001] puis [Salvucci and Liu, 2002] identifient quatre à six phases :

- (LK) Phase de maintien dans la voie
- (BLC) Phase de préparation avant le changement de voie
- (LC1) Première partie du changement de voie (avant le franchissement de la ligne de séparation des voies)
- (LC2) Seconde partie du changement de voie (après le franchissement de la ligne de séparation des voies)
- (ALC) Phase suivant immédiatement LC2 de stabilisation dans la voie de destination
- (LK) Phase de maintien dans la voie

Dans leurs études, les phases sont séparées sur la base des verbalisations des participants en direct (sauf le franchissement de ligne).

[Kanaris et al., 2001] n'étudient pas directement les conducteurs, mais produisent un modèle destiné à déterminer les conditions minimales pour assurer un CDV sécurisé. Pour effectuer ce changement de voie, les auteurs séparent la manœuvre en trois phases :

- (1) Phase d'ajustement de la vitesse dans la voie d'origine pour assurer une distance sécurisée avec le véhicule qui précède
- (2) Phase d'ajustement de la vitesse pour atteindre la voie de destination à la vitesse du trafic s'y trouvant
- (3) Phase d'accélération latérale pour passer de la voie d'origine à la voie de destination

Les auteurs précisent que les phases (2) et (3) n'ont pas nécessairement d'ordre déterminé.

[Xiaokai He et al., 2011] distinguent deux phases principales, la première comprenant deux étapes :

- (1) Phase de décision de changement de voie
 - (1a.) Évaluation de la « désirabilité » du CDV
 - (1b.) Évaluation de la faisabilité du CDV
- (2) Phase d'exécution du CDV

[Tomar and Verma, 2012] optent pour un séquençage en trois phases, chacune subdivisée en plu-

sieurs étapes.

- (1) Phase de pré-changement de voie
 - (1a.) Vérification de l'espace dans la voie de destination
 - (1b.) Activation du clignotant
 - (1c.) Vérification de la disponibilité de l'espace de trajectoire jusqu'à la voie de destination
 - (1d.) Vérification de l'absence de véhicule arrivant derrière dans la voie de destination
 - (1e.) Maintien des distances de sécurité
- (2) Phase de CDV
 - (2a.) Préparation du CDV par ajustement de la vitesse
 - (2b.) Accélération et mouvement latéral en direction de la voie de destination
- (3) Dans la voie de destination
 - (3a.) Ajustement de la vitesse et de la position dans la voie de destination.

[Peng et al., 2013] n'identifient que deux phases dont ils détaillent les opérations qui s'y déroulent : une phase de décision et une phase d'exécution du CDV. L'approche de ces auteurs est particulière, dans la mesure ils font appel à des notions issues de la théorie des jeux pour décrire les règles suivies par les processus de décision. Selon eux, lors de cette phase, le conducteur dispose d'un module de perception en charge de collecter les informations dans l'environnement. Ensuite, suivant les informations perçues, un module de décision est activé. En cas d'espace insuffisant dans la voie de destination, aucune décision de CDV n'est prise. En revanche, en cas d'espace suffisant, un jeu est lancé. Il s'agit d'un jeu non coopératif dont la pire issue possible est l'accident, auquel cas tous les joueurs perdent³.

[Peng et al., 2015] ne mentionnent également que deux phases : la fenêtre d'intention de changement de voie et le début du CDV. Dans cette étude, les auteurs indiquent que la fenêtre d'intention de CDV est déterminée entre le premier regard dans le rétroviseur et le début du changement de voie lui-même. Ce début étant marqué par une importante variation de l'angle du volant sans variation de la position latérale du véhicule.

[Nilsson et al., 2016], dans le cadre du développement d'un modèle de décision de changement de voie, segmentent la phase avant le CDV effectif en quatre temps :

- (1) Estimation de la désirabilité du CDV ;
- (2) Phase de sélection d'un espace d'insertion sûr ;
- (3) Estimation du moment de CDV ;
- (4) Phase de planification de la trajectoire de CDV :
 - (4a.) Définition de trois zones : pré, péri et post ligne de démarcation des voies ;
 - (4b.) Définition d'un couloir de sécurité latéral et longitudinal pour chaque zone.
 - (4c.) Définition de la trajectoire.

³Dans leur approche, l'issue du jeu est un équilibre de Nash.

Ces quelques exemples montrent bien comment les approches et la segmentation de la manœuvre de CDV varient autant dans le nombre de phases qu'elles comprennent que dans leur nature, leurs critères de démarcation ou même leur durée. Suivant que les recherches sont axées sur l'élaboration d'un modèle d'anticipation du changement de voie, d'automatisation de la manœuvre, ou d'étude du comportement du conducteur, les auteurs ont focalisé le découpage sur les instants de l'exécution ou sur les instants la précédant. Certains ont opté pour un découpage plus fonctionnel, d'autres plus factuel et basé sur les éléments observables. Nous verrons dans la section consacrée aux travaux sur cette manœuvre dans le cadre du développement de COSMODRIVE, que ces deux approches sont complémentaires pour l'étude et la modélisation cognitive du conducteur.

La figure 25 (p. 65) a été reconstituée à partir des cinq références présentées précédemment, afin de mieux illustrer comment, sur une même trajectoire de CDV, les différentes typologies de segmentations peuvent s'appliquer.

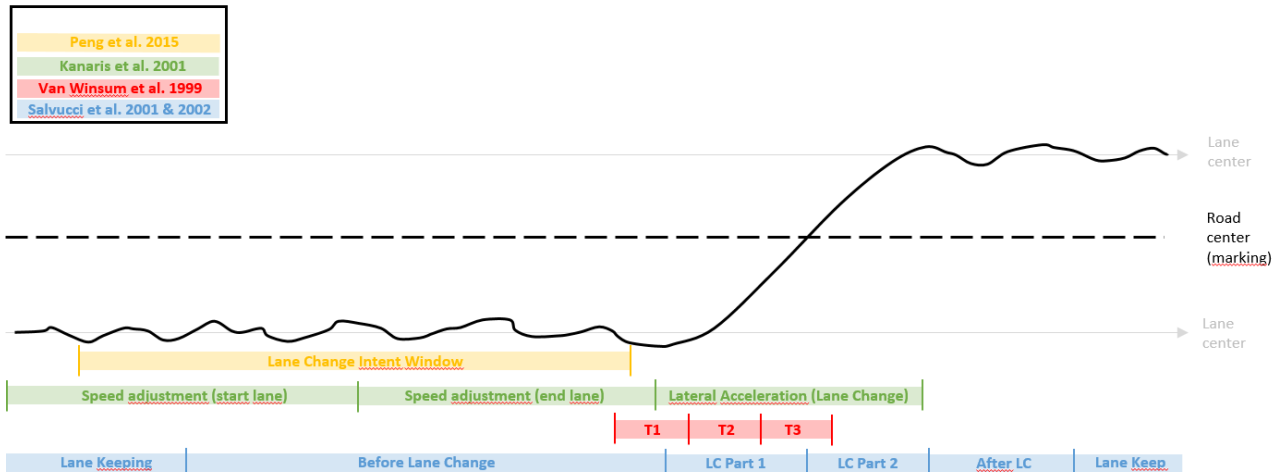


Figure 25 – Schéma synthétique de différentes méthodes de segmentation de CDV à partir de [Peng et al., 2015], [van Winsum et al., 1999], [Salvucci et al., 2001], [Salvucci and Liu, 2002], [Kanaris et al., 2001]

3.2.2.3 Mesurer les changements de voie

L'étude et la modélisation du changement de voie impliquent bien souvent la définition et la mesure d'indicateurs objectifs. Comme pour le séquençage, les indicateurs utilisés sont très nombreux et variés.

Le premier d'entre eux a déjà été présenté en 3.2.2.1 (p. 62). Il s'agit bien évidemment du temps. La durée du CDV, comme celle de ces différentes phases, a été étudiée avec toute les difficultés que nous avons abordées concernant la manière de séquencer la manœuvre. Bien qu'important, le temps seul n'apporte que peu d'information, d'autres éléments mesurables doivent lui être rapportés pour qu'il prenne du sens. Nous distinguerons les indicateurs propres au véhicule, à sa dynamique et aux autres véhicules, des indicateurs relatifs au comportement du conducteur.

Les indicateurs du véhicule

Le premier et le plus simple est celui des coordonnées de position du véhicule. Fréquemment uti-

lisées, elles peuvent être obtenues de différentes manières suivant le type d'étude et les instrumentations utilisées (e.g. mesure par capteurs de position, estimation vidéo, donnée de simulation, etc.). En règle générale, cette information est utilisée pour déterminer la position du véhicule dans la voie, ou encore le moment du franchissement de la ligne de séparation des voies.

Un autre indicateur important et très fréquemment relevé, est le clignotant. Les études ayant cherché à déterminer la qualité des informations du clignotant en tant que prédicteur du changement de voie montrent néanmoins qu'il est relativement peu fiable. Ainsi [Schmidt et al., 2014] rapporte des résultats variables dans la littérature allant d'une utilisation des clignotants dans 50 % à 99 % des cas. Par ailleurs, la règle d'utilisation du clignotant peut varier suivant les conducteurs et les contextes. Dans certains cas, le clignotant marque la décision actée du CDV, tandis que dans d'autres, elle marque l'intention, le souhait du conducteur de changer de voie. En d'autres termes, dans le premier cas, la décision est prise et le changement de voie sera entrepris dans les instants qui suivent, dans l'autre, la décision n'est pas prise, et si les conditions d'espacement et de sécurité ne sont pas réunies, la manœuvre ne sera jamais initiée.

L'indicateur de vitesse des véhicules est également courant, tout comme celui de la vitesse relative. Ils sont informatifs, dans la mesure où ils permettent le calcul d'autres indicateurs plus complexes comme les temps inter-véhiculaires (TIV), les temps à la collision (TTC⁴), les temps au franchissement de ligne (TLC⁵) etc. Dans certains cas (e.g. [Kanaris et al., 2001]), les distances par rapport aux autres véhicules, et en particulier par rapport au véhicule suivant dans la voie de destination, sont calculées. Dans cette catégorie des indicateurs associés à la dynamique du véhicule, nous trouvons également les accélérations longitudinale et latérale ([Kanaris et al., 2001], [Xiaokai He et al., 2011], [Peng et al., 2013], [Wang et al., 2018b], etc.).

Dans certaines études (e.g. [van Winsum et al., 1999], [Jula et al., 2000], [Salvucci and Liu, 2002], [Henning et al., 2007], etc.), des indicateurs pouvant conjointement relever des informations du véhicule et du comportement du conducteur, sont utilisés. On compte parmi eux l'angle du volant, le taux d'enfoncement des pédales, etc. Ces indicateurs sont à la fois la conséquence directe des actions du conducteur et donc la traduction de son comportement ; de plus, ils fournissent également des informations relatives à l'état et à la dynamique du véhicule. Nous noterons ainsi, par exemple, les travaux de [van Winsum et al., 1999] qui utilisent les informations d'angle du volant pour séquencer la manœuvre, ou encore ceux de [Peng et al., 2015] qui déterminent le début du CDV en comparant l'angle du volant au déplacement latéral du véhicule.

Les indicateurs comportementaux du conducteur

Outre les actions que le conducteur peut avoir sur les commandes du véhicule, d'autres aspects de son comportement peuvent être recueillis pour étudier le CDV. L'un des plus utilisés est relatif aux actions de prise de l'information dans l'environnement. Les mouvements oculaires et l'orientation de la tête sont supposés être le fruit de mécanismes d'exploration perceptive. De nombreuses études ont de ce fait tenté de mesurer ces dimensions, entre autres pour inférer l'intention de changement de voie. Lors d'un changement de voie, le conducteur cherchant à déterminer si celui-ci est possible, doit consulter les rétroviseurs et angles morts, ce qui implique a minima des mouvements oculaires et bien souvent des mouvements de la tête entière.

[Finnegan and Green, 1990] déterminent ainsi, lors de leur revue de littérature, que la durée

⁴pour Time To Collision

⁵pour Time to Lane Crossing

moyenne d'exploration visuelle est de 6.1 s en cas de trafic et 3.7 s en absence de trafic. Ils déterminent également que le nombre moyen de mouvements de tête avant un CDV est de 2.5. [Salvucci et al., 2001] constatent quant à eux qu'avant un CDV, la durée des regards en direction de la voie d'origine diminue progressivement au profit des regards en direction de la voie de destination. Ils identifient que le pic du nombre de regards dans le rétroviseur est atteint à la fin de la période précédant le CDV, avant de tendre vers une valeur nulle pendant le CDV. Ils notent enfin que les fixations destinées au contrôle du véhicule et au maintien dans la voie, ont une durée moyenne de 700 ms, tandis que les regards destinés à la surveillance de l'environnement et à la mise à jour de la conscience de la situation (SA) ont une durée moyenne de 350 ms. [Morris et al., 2011], pour leur part, déterminent que la capture des mouvements de la tête est un indice utile pour prédire les changements de voie entre 1.5 s et 3.0 s avant le CDV. Enfin, [Peng et al., 2015] déterminent que l'écart-type des angles d'orientation de la tête dans le plan horizontal est supérieur en cas de CDV qu'en cas de maintien dans la voie (respectivement 8.9° et 1.6°).

Parmi les autres indices comportementaux qui peuvent être recueillis, nous trouvons également les verbalisations des conducteurs. Bien qu'il ne s'agisse pas d'un aspect spontané et systématique de l'activité de conduite, il est possible pour l'expérimentateur de demander au conducteur de verbaliser différents éléments en rapport avec elle. Ces verbalisations peuvent prendre la forme d'une explicitation ou de réponses à des questionnaires standardisés. Elles peuvent être demandées en direct, pendant le déroulé de l'activité (dans la limite des interférences possibles avec la conduite et la sécurité), ou à posteriori lors d'entretiens d'explicitation [Paris, 2014] [Vermeersch, 1994]. Ainsi, par exemple, [Salvucci et al., 2001], [Salvucci and Liu, 2002] se sont basés sur les indications des participants, fournies lors de l'expérimentation pour séquencer le CDV. Ou encore [Henning et al., 2007] ont eu recours à des entretiens d'explicitation au cours desquels les participants devaient indiquer le point du trajet (revu en vidéo) où ils avaient commencé à penser au changement de voie, puis au moment où ils avaient arrêté d'y penser, ou bien les points où ils avaient renoncé au CDV (respectivement dans les cas où les changements de voie avaient été effectués et les cas de renonciation au CDV). Parmi les articles que nous avons examinés, nous n'avons pas relevé d'études ayant demandé aux participants impliqués de remplir des questionnaires d'évaluations en rapport aux différents aspects de la manœuvre ; mais il serait tout à fait envisageable de le faire, si le protocole expérimental s'y prêtait.

Les indicateurs particuliers

Les différents indicateurs que nous avons présentés jusqu'ici, qu'ils soient relatifs au véhicule, à la situation ou au conducteur, ne sont pas les seuls à avoir été utilisés. Suivant les objectifs des études, leur contexte scientifique ou encore l'imagination des auteurs, d'autres indicateurs ou méthodologies, plus rares et spécifiques, ont été utilisés. Nous n'en ferons pas ici une liste exhaustive, mais en évoquerons quelques uns afin que le lecteur puisse avoir un aperçu de leur diversité. [Kanaris et al., 2001], par exemple, enregistrent les forces latérales et longitudinales exercées sur le véhicule lors du CDV pour déterminer les éventualités de dérapage. [Xiaokai He et al., 2011] calculent et enregistrent un ratio de décélération, estiment un facteur de politesse, un facteur de distance de suivi ainsi qu'un facteur d'évaluation du risque. [Morris et al., 2011] enregistrent les informations issues du bus CAN du véhicule, mais également celles en provenance de diverses assistances à la conduite. [Gurupackiam and Lee Jones, 2012] enregistrent le type d'embouteillage et la taille de l'espace d'insertion dans le trafic de la voie de destination lors du CDV. [Schmidt et al., 2014] enregistrent le moment où le conducteur stoppe une tâche secondaire prévue dans leur protocole. Enfin, [Wang et al., 2018b]

estiment le « *dernier moment pour un changement de voie sûr* ».

Les analyses effectuées

Un certain nombre d'études, en particulier celles visant à tester des modèles prédictifs, procèdent à des traitements et calculs effectués sur la base de ces indicateurs directement enregistrés. Ces traitements reposent sur des méthodologies variées, allant des simples statistiques descriptives aux traitements complexes, tels que ceux mis en œuvre dans les algorithmes de machine learning.

[Jula et al., 2000] proposent par exemple, un algorithme de calcul d'une distance longitudinale minimale de sécurité (MSS) pour que le changement de voie se fasse sans collision. [van Winsum et al., 1999] testent l'effet de la vitesse et de l'angle du volant sur les valeurs de TLC durant les différentes phases du CDV. [Salvucci et al., 2001] fournissent des statistiques descriptives sur le comportement d'exploration visuelle des conducteurs au moment des changements de voie. [Kanaris et al., 2001], dans la même optique que [Jula et al., 2000], calculent une distance minimale de sécurité pour les changements de voie (MSSLC). [Salvucci et al., 2007] utilisent les données enregistrées pour alimenter un algorithme dont l'objectif est de prédire l'intention de changement de voie ; ils comparent ensuite les prédictions du modèle avec les données réelles. [Xiaokai He et al., 2011] calculent un indicateur de désirabilité du changement de voie. [Morris et al., 2011] adaptent une méthode de machine learning (*Relevance Vector Machine*) pour détecter les intentions de changement de voie. [Zheng et al., 2014] comparent les prédictions de deux types de modèles de prédiction des changements de voie : un réseau de neurones et un modèle de régression logistique multinomiale.

Toutes ces méthodologies différentes aboutissent à un certain nombre de résultats. Certains d'entre eux ont une portée relativement générale, tandis que d'autres sont très spécifiques (i.e. notamment pour les études testant ou comparant des modèles de prédiction spécifiques).

Les principaux résultats obtenus

Concernant la durée des changements de voie, nous avons vu que cette donnée était à la fois dépendante du type de changement de voie et de la méthode de mesure. Nous retiendrons qu'un certain nombre d'études rapportent une durée de changement de voie avoisinant 5 s. Suivant que la phase de décision précède le CDV soit estimée et incluse ou non, cette durée peut être plus longue et avoisiner les 10 s (e.g. [Henning et al., 2007]).

Le séquençage de la manœuvre ne fait pas l'objet d'un consensus clair. Aussi nous pouvons, au vu de la littérature, considérer à minima deux phases. Au cours de la première phase, qui précède le changement de voie, sont faites des explorations perceptives et évaluées les possibilités d'effectuer le CDV. À la fin de cette phase, la décision de changer de voie est éventuellement prise, ce qui aboutit à la planification de la trajectoire puis à la seconde phase durant laquelle la manœuvre en elle-même est effectuée. Les éléments mesurables et indicateurs calculables pour décrire ou prédire les changements de voie sont nombreux et variés. On note toutefois que les notions de distances relative aux autres véhicules, de vitesse et d'accélération latérales sont importantes dans l'analyse du CDV. Par ailleurs, la littérature révèle que l'utilisation du clignotant lors de cette manœuvre n'est pas systématique, il ne peut donc pas être considéré comme un critère d'une grande fiabilité (dans l'absolu, le clignotant, lorsqu'il est utilisé, signifie une intention explicitée d'engager le CDV). Le nombre d'indicateurs pertinents pour prévoir un changement de voie est variable, mais nous pouvons noter que certains semblent suffisamment fiables pour être régulièrement utilisés. Ainsi la rotation de la tête et les mouvements oculaires semblent apparaître comme des indicateurs fiables et relativement précoces de la décision de CDV [Salvucci et al., 2001]. Par exemple [Morris et al., 2011] montrent que

leur modèle ne produit des prédictions fiables qu'à partir de 3 s avant le changement de voie. Sur cette fenêtre, la position de la tête est l'indicateur fiable le plus précoce (i.e. entre 3.0 s et 1.5 s avant le CDV), vient ensuite la position dans la voie (i.e. à partir de 2.0 s avant le CDV). Selon [Peng et al., 2015], le moment optimal de prédiction de l'occurrence du CDV se situe environ 1.5 s avant le début du CDV.

Pour ce qui est de la question de la sécurité des changements de voie, nous retiendrons que les méthodes développées par [Jula et al., 2000] et [Kanaris et al., 2001] proposent de définir des « espaces sûrs »⁶ au moyen des paramètres de vitesse, d'accélération latérale et de distance avec les autres véhicules. Si, suivant ces paramètres, le véhicule se trouve dans l'espace de sécurité, alors le changement de voie peut se faire sans collision. Sinon, au moins l'un de ces indices devra être ajusté par le conducteur (dans la mesure des capacités du conducteur et du véhicule) pour que le changement de voie puisse se faire sans collision. Si ce n'est pas le cas, alors le changement de voie débouchera sur un accident. Les études de [Wang et al., 2018b] et [Wang et al., 2018a] ont testé la pertinence de l'utilisation de l'indicateur du temps à la collision (TTC) dans l'estimation de la sécurité des CDV en comparant leur performances à des évaluations subjectives de participants (i.e. les participants devaient indiquer quel était le dernier moment où un changement de voie pouvait encore être effectué en sécurité). Ils notent que si le critère d'un TTC inférieur à 5.5 s couvre près de 90 % des cas testés, ce seuil très conservateur présente aussi un haut niveau de fausses alarmes. Par ailleurs ils testent la pertinence de l'utilisation du TIV comme indicateur de la dangerosité du changement de voie et montrent que le seuil d'un TIV de 0.6 s avec le véhicule précédent est plus pertinent que l'utilisation d'un seuil de TTC à 3.0 s.

3.2.3 Premier bilan des études de la manœuvre de changement de voie

Cette analyse de la littérature nous a informés sur les indices physiques (e.g. distance, vitesse, accélération, etc.), comportementaux (e.g. mouvements oculaires, rotation de la tête), temporels (e.g. durée du changement de voie, séquençement de la manœuvre, verbalisations) et calculés (e.g. TTC, TIV, MSSLC, etc.), relatifs à la décision et à l'exécution du CDV. Nous avons pu voir que certaines études se focalisaient sur la prévision des décisions voire des intentions de CDV, que d'autres s'intéressaient au comportement du conducteur et enfin que certaines cherchaient à établir les conditions à réunir pour un changement de voie sécurisé. Un certain nombre d'études invoquent des étapes dans la procédure d'évaluation, de décision et de planification de la manœuvre de CDV, mais aucune à l'exception de [Salvucci et al., 2007] et de [Georgeon, 2008] (dont nous détaillerons l'approche dans la section suivante), ne s'appuie sur un modèle cognitif du conducteur ou ne cherche à en alimenter un. La plupart des modèles ont une visée prédictive sans dimension explicative de la cognition humaine malgré le fait que certains prévoient des étapes « algorithmiques » nécessaires à la décision et l'exécution du changement de voie [Tomar and Verma, 2012]. Un autre modèle tend à faire exception à ce défaut : celui développé par [Peng et al., 2013] dans lequel il prévoit un module de perception et un module de décision, au sein duquel un jeu non-coopératif opère en définissant les règles de décision. Comme l'indique très bien [Georgeon, 2008] dans sa thèse (p.74), concernant les études de modélisation du changement de voie, « *Les approches cognitives existantes posent des modèles cognitifs comme des successions de phases définies a priori, et cherchant dans un deuxième temps à trouver des indicateurs de transitions entre ces phases dans les données* ». Les études, à visée purement prédictives ou

⁶les espaces sûrs évoqués ici sont des espace mathématiques et non des espaces physiques

descriptives, nous apportent toutefois une information potentiellement intéressante, dans la mesure où l'évaluation de la performance des prédictions est souvent assortie d'une évaluation de la pertinence et de la capacité prédictive des indicateurs utilisés et des variables collectées. Ainsi nous savons que le comportement oculaire peut nous informer sur la prise de décision qui sera éventuellement faite.

Si plusieurs études s'intéressent à la sécurité du changement de voie, elles n'évoquent toutefois que rarement, le rapport entre la sécurité, le risque associé au changement de voie et l'évaluation subjective du risque effectuée par le conducteur. Certaines études décrivent la structure comportementale des actions sur les commandes du véhicule mais ne concluent que superficiellement sur l'information que ces données nous apportent sur les processus cognitifs à l'œuvre chez le conducteur. Nous pouvons prendre l'exemple de l'étude de [van Winsum et al., 1999] dont les conclusions montrent une chaîne de dépendance entre certains indicateurs. Ils déterminent l'existence d'un effet de la vitesse sur le maximum de l'angle volant, d'un lien entre le TLC au moment de l'angle volant maximum et la durée de la seconde phase du changement de voie (suivant leur séquençage). Ils concluent de ces résultats que seule la durée du premier mouvement du volant semble stéréotypée et indépendante de la vitesse. Les autres études portant sur la dimension de sécurité des changements de voie se sont centrées sur le test des indicateurs utiles et fiables pour mesurer cette dimension d'un point de vue de l'évaluation objective du risque. Elles ne disent rien de la manière dont le conducteur évalue subjectivement le risque en situation de changement de voie. Il nous faut également noter que si les études concernant le changement de voie que nous avons examinées, s'intéressent régulièrement aux distances de sécurité et d'interaction avec les autres véhicules, elle se focalisent majoritairement sur le véhicule arrivant à l'arrière dans la voie de destination, et parfois sur le véhicule précédant celui du conducteur dans la voie initiale. Or il est fréquent, lors d'un changement de voie, que le conducteur doive s'insérer entre deux véhicules dans le trafic de la voie de destination. À l'exception de [Gurupackiam and Lee Jones, 2012], aucune étude ne semble s'intéresser à la taille du gap d'insertion, ni aux interactions et distances avec le véhicule ouvrant l'espace d'insertion dans la voie de destination. Nous nous intéresserons donc plus spécifiquement à cette situation dans le cadre de notre propre recherche.

Avant cela, il nous faut nous arrêter un moment sur les travaux portant sur le CDV qui ont déjà été réalisés dans le cadre du développement de COSMODRIVE.

3.3 L'étude du changement de voie dans le cadre des travaux sur COSMODRIVE

Dans le cadre du développement du modèle COSMODRIVE, trois principaux travaux ont été effectués concernant le changement de voie. Les deux premiers réalisés par [Georgeon, 2008] et [Mathern, 2012], dans le cadre de leurs thèses, concernent principalement l'extraction de connaissances à partir de traces d'activité de conduite. Par la suite, d'autres travaux ont été effectués dans le cadre du projet HoliDes⁷, et ont porté sur la simulation des effets de la distraction cognitive sur la conscience de la situation pour la décision de CDV. Avant de présenter les principaux résultats et apports sur lesquels nous nous appuyons pour définir notre problématique et nos hypothèses, nous devons présenter le contexte méthodologique dans lequel ces travaux ont été effectués.

⁷<http://www.holidays.eu/>

3.3.1 L'analyse de traces d'activités

Comme nous l'avons vu dans la précédente section (3.2.2.3, p. 65), mesurer et enregistrer le comportement du conducteur est fréquent dans le cadre de l'analyse de l'activité de conduite. Ces éléments enregistrables (au moyen d'un véhicule instrumenté de capteurs par exemple) constituent des *traces* de l'activité. [Laflaquière and Prié, 2003] définissent une trace d'activité comme « *un ensemble de mesures horodatées* ». Typiquement, dans le cadre de l'enregistrement de données de conduite automobile, il peut s'agir des informations d'angle du volant, d'enfoncement des pédales, des données oculométriques, etc. ([Paris, 2014])

Dans le cadre de sa thèse [Georgeon, 2008] a procédé à une expérimentation de conduite sur route réelle avec un véhicule instrumenté enregistrant les paramètres du véhicule, les données de télémétrie et de stéréo-vision, les données GPS et enfin les données oculométriques. Sur la base des données recueillies, il procède à des traitements spécifiques au moyen du logiciel ABSTRACT. Ce logiciel de traitement, spécifiquement développé pour l'analyse de l'activité, permet à partir de données brutes (« *traces collectées* ») de produire un enrichissement par abstraction, sur la base de règles d'inférences (appelées « *modèles de transformation* »). En d'autres termes il permet, à partir des données brutes, d'inférer des niveaux plus abstraits du comportement pouvant aller jusqu'à un « *niveau d'abstraction de l'ordre de celui que les conducteurs eux-mêmes utilisent pour décrire leur propre activité* », ce qui rend possible l'analyse des données en termes de schémas. À titre d'illustration, la figure 26 (p. 71) présente la visualisation dans ABSTRACT des traces d'un changement de voie ([Henning et al., 2007])

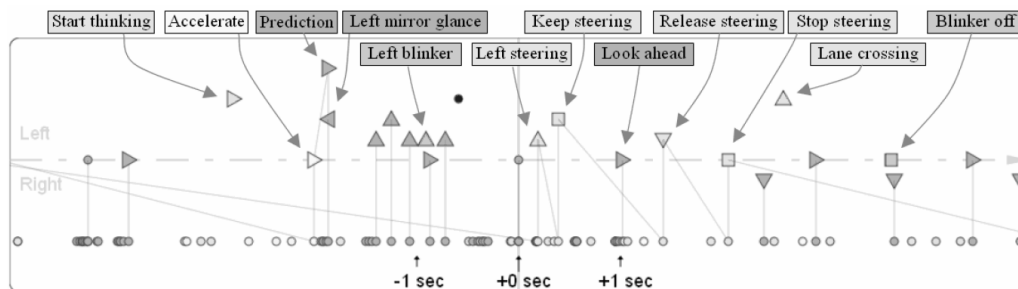


Figure 26 – Représentations des traces d'un changement de voie dans le logiciel ABSTRACT

3.3.2 Le schéma du changement de voie

3.3.2.1 Les schémas comportementaux du changement de voie

Une fois les données traitées par ABSTRACT, [Georgeon, 2008] (p.193) a procédé à une analyse pour gagner un niveau d'abstraction supplémentaire en inférant des schémas comportementaux typiques puis des connaissances approchant la formalisation des schémas cognitifs mis en œuvre par le conducteur. Il a appliqué ce processus à la manœuvre de CDV sur autoroute dans les données collectées. Les analyses ont alors produit deux catégories de schémas comportementaux pour le CDV. Un CDV libre (nommé « *par anticipation* » par Georgeon) dans lequel le conducteur détecte précocement le véhicule lent qui se trouve devant lui, effectue les vérifications de disponibilité dans la voie de destination et prend librement la décision d'engager ou non sa manœuvre (avant d'avoir besoin de ralentir pour gérer la distance avec le véhicule devant lui). Le second type de schéma comportemental

est imposé par le trafic (nommé « avec accélération » par Georgeon) par les conditions de trafic et caractérisé par une impossibilité, pour le conducteur, d'anticiper le véhicule lent qui motivera son changement de voie. Ce schéma comportemental est caractérisé par une simultanéité de l'accélération et du contrôle du rétroviseur, précédant d'environ 1 s l'activation du clignotant. Dans le cas du CDV *libre*, la gestion du risque est à l'initiative du seul conducteur, tandis que dans le CDV *imposé* elle est le résultat d'une contrainte situationnelle (comme par exemple le ralentissement d'un véhicule dans la voie d'origine).

3.3.2.2 Le schéma cognitif du changement de voie

Sur la base de ces patterns comportementaux typiques, l'auteur procède à un niveau d'inférence supplémentaire pour tendre vers la description des schémas cognitifs (dont le principe a été présenté en 1.3.4, p. 21) qui sont supposés avoir été exécutés par les conducteurs. Nous ne nous situons donc plus uniquement dans l'inférence de la structuration et de l'organisation du comportement, mais dans la structure de connaissance qui en est à l'origine. Pour cela, Georgeon ne se contente pas d'analyser les cas de situations de changements de voie qui se sont correctement déroulés. Il analyse en détail des séquences de changements de voie dans lesquels des erreurs ont été commises et rapportées par le conducteur. Cette analyse a été nécessaire afin d'apporter un éclairage sur les niveaux de contrôle mis en place par les conducteurs durant les changements de voie ainsi que pour identifier les éventuels points de décision. Cette analyse l'amène à produire deux versions du schéma de changement de voie suivant qu'il s'agisse d'un CDV *libre* ou *imposé*. Ces deux schémas étant très proches et pour des raisons de clarté, nous ne présentons au travers de la figure 27 (p. 72) que le schéma du changement de voie libre, tel que décrit dans sa thèse (p.218). Georgeon précise également que, contrairement au schéma du tourne-à-gauche (1.3.4.1, p. 22), le schéma tactique du changement de voie est relatif au véhicule, et donc non fixe par rapport à l'infrastructure.

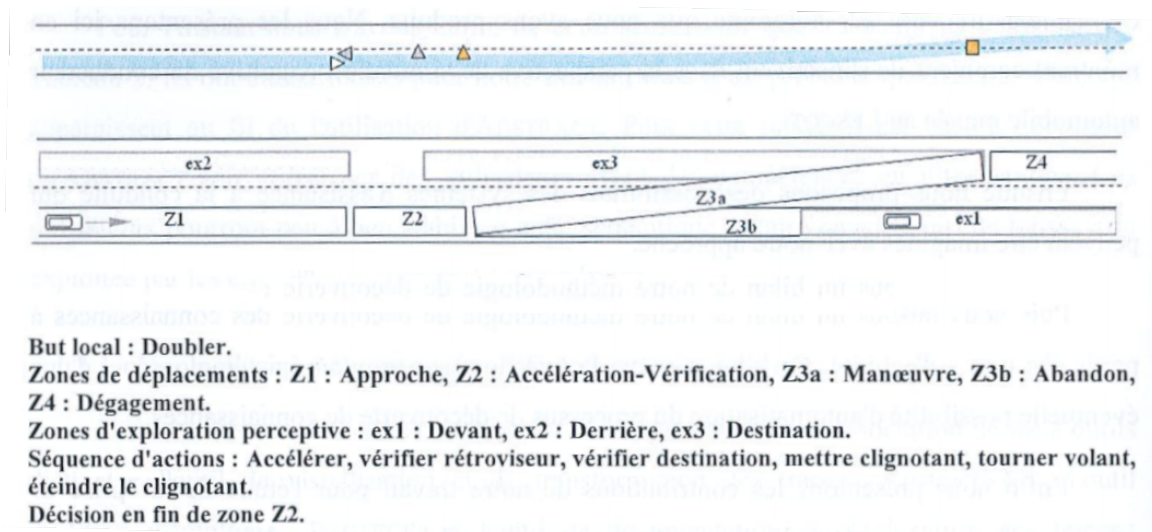


Figure 27 – Représentation du schéma cognitif de changement de voie libre établi par [Georgeon, 2008]

3.3.2.3 États et transitions dans la manœuvre du changement de voie

À la suite des travaux de Georgeon, [Mathern, 2012] reprend dans sa thèse les données de changement de voie issues d'ABSTRACT pour y appliquer un autre type d'analyse et produire une formalisation des schémas de conduite sous la forme de graphes « *État-Transition* » modélisé mathématiquement par un réseau de Petri. Il produit ainsi le graphe présenté en figure 28 (p. 73).

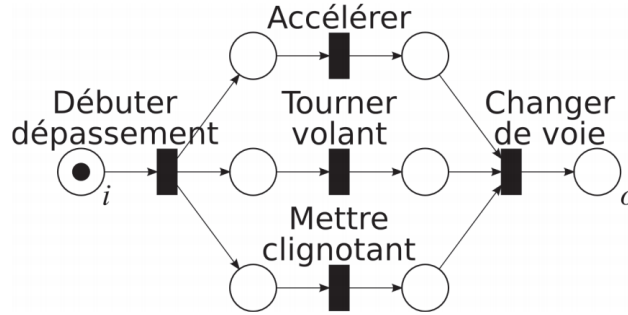


Figure 28 – Graphe « *État-Transition* » du changement de voie à l'état initial (issu de [Mathern, 2012], p. 81)

Pour produire ce graphe, Mathern a développé un algorithme qui recherche automatiquement des régularités dans les traces d'activités issues d'ABSTRACT. Le graphe produit est donc une forme de synthèse des phases d'activité repérées dans les traces d'activité. Dans l'illustration, les états sont représentés par des ronds et les transitions par des rectangles noirs. L'intérêt des réseaux de Petri repose sur la possibilité de parallélisme qu'ils offrent. Ainsi, ce graphe rend bien compte du constat de l'absence d'un ordre défini concernant les actions accélérer, mettre le clignotant et tourner le volant parmi les traces d'activité qui composent le schéma de CDV.

3.3.3 Les simulations de changement de voie avec COSMODRIVE

Les derniers travaux effectués dans le cadre du développement du modèle COSMODRIVE en relation avec le changement de voie ont été réalisés lors du projet HoliDes [Bellet et al., 2016]. Lors de ces travaux, le modèle COSMODRIVE a été utilisé pour tester des situations de changement de voie obligatoires dans le cas d'un conducteur devant dépasser un camion ralentissant sur autoroute. La situation de conduite était la suivante : COSMODRIVE conduit un véhicule et suit un camion sur la voie de droite d'une autoroute. Ses différents modules tactique, perceptif, opérationnel et d'exécution assurent la gestion du véhicule et l'élaboration d'une représentation mentale de la situation. Le camion suivi freine, et COSMODRIVE doit alors détecter ce ralentissement et modifier son but tactique pour passer du suivi au dépassement. Il procède ensuite aux explorations visuelles nécessaires à la prise d'information concernant le trafic sur la voie de gauche (voie de destination). Une fois ces éléments intégrés dans la représentation mentale occurrente de la situation, COSMODRIVE se base sur celle-ci pour procéder à des simulations prédictives (i.e. déploiements) en calculant une trajectoire au moyen de courbes de Bézier et déterminer une solution ne produisant pas de conflits aboutissant à l'accident. Lorsqu'une solution de CDV sécuritaire est trouvée, COSMODRIVE exécute la manœuvre. Dans le cas contraire il engage un freinage pour éviter une collision avec le camion qui le précède

[Bellet et al., 2019]. Notons que dans cette recherche, les CDV étudiés se rapportent aux CDV *imposés* selon [Georgeon, 2008]. La situation de CDV que nous investiguerons dans cette thèse porte pour sa part, sur le schéma de CDV *libre*, visant, qui plus est, à s’insérer entre deux véhicules.

3.3.4 Bilan des travaux sur le changement dans le cadre du modèle COSMODRIVE

Les travaux de [Georgeon, 2008], [Mathern, 2012] concernant le CDV, permettent d’inscrire les éléments de la littérature et les différents types de mesures de l’activité du conducteur, dans une conception de l’activité de conduite axée sur la cognition. Ils apportent une première ébauche du schéma du changement de voie, autant dans la définition de ses zones que dans la description des opérations qui doivent y être exécutées. Les simulations de changement de voie effectuées dans le cadre du projet HoliDes ont également permis d’aborder la question du changement de voie contraint par un véhicule lent dans la voie d’origine. Cependant, nous ne sommes pas informés de la manière dont les décisions sont prises par un conducteur lorsque le CDV comporte une insertion entre deux véhicules dans la voie de destination. Nous ne savons pas non plus, comment les zones enveloppes sont utilisées pour prendre la décision et produire une estimation subjective du risque associée au CDV. La prochaine partie de ce chapitre sera dédiée à la description de ce type de situation et des inconnues qu’elle comporte.

3.4 Le changement de voie par insertion dans un espace du trafic

Nous nous posons donc à présent la question d’approfondir les travaux concernant le CDV dans le contexte du développement de COSMODRIVE. Nous nous intéressons en particulier à la décision d’insertion dans un espace entre deux véhicules dans le trafic, à l’image des travaux sur le tourne-à-gauche de [Bornard, 2012] présentés précédemment (2.3.3, p. 54). Pour cela, il nous faut envisager en détail le type de situation de CDV sur lequel se porte notre intérêt, puis examiner les implications en terme d’évaluation subjective du risque, exposer les détails du problème de la décision et enfin celles de l’exécution de la manœuvre et de la gestion du risque au travers du placement du véhicule dans l’espace d’insertion. Nous verrons dans ce chapitre que la littérature apparaît peu fournie concernant les situations de CDV avec insertion entre deux véhicules du trafic et donc qu’en conséquence, les données relatives à la gestion du risque par les conducteurs dans ces situations particulières semblent faire défaut. Lors de ce type de CDV, il ne s’agit plus uniquement pour le conducteur de changer de voie en gérant le risque associé au véhicule arrivant derrière lui sur la voie de destination, mais également de gérer le risque avec le véhicule précédent, dans la voie de destination. Dans les situations jusque là étudiées et simulées avec COSMODRIVE, le risque à gérer par le conducteur était unique.

3.4.1 La situation de changement de voie

Comme dans le cas des travaux de [Bornard, 2012], il nous faut envisager un bon contrôle de la situation expérimentale étudiée. Nous avons vu qu’il existe une grande variété de méthodologies pour appréhender l’étude des situations de CDV. Toutefois, certaines d’entre elles ne correspondent pas à nos besoins. Ainsi, pour une étude spécifique des CDV par insertion dans un espace (espace que nous appellerons désormais : *gap*), les méthodes d’observation de trafic depuis une infrastructure

ne semblent pas appropriées. En effet, une observation fine du comportement du conducteur ainsi que des paramètres de la situation (i.e. vitesse des véhicules, taille des gaps, etc.) est difficile voire impossible. Une étude sur route réelle au moyen d'un véhicule instrumenté, à l'image de celle de [Georgeon, 2008], pourrait être envisagée. Elle pose tout de même le problème du contrôle de l'environnement de conduite. Nous avons pu voir dans la littérature que les CDV sont différents suivant l'environnement de conduite (i.e. conduite en ville, sur autoroute, etc.) et l'état du trafic (i.e. trafic fluide, embouteillé, etc.) [Gurupackiam and Lee Jones, 2012], [Nilsson et al., 2016]. Il nous faut donc un bon contrôle de ces paramètres pour obtenir des mesures fines portant à la fois sur les dimensions comportementales et cognitives de la décision, et sur l'exécution du changement de voie. Le recours au simulateur de conduite, bien que moins écologique, permet de pallier ces difficultés. Offrant conjointement, une grande maîtrise de l'environnement de conduite et une plus grande possibilité de mesure des comportements du conducteur, cette solution offre un bon compromis pour répondre à nos questions et objectifs de recherche.

Pour mieux comprendre comment les décisions de CDV sont prises en considérant la taille du gap d'insertion, il serait idéal de pouvoir soumettre, lors de situations identiques, des espaces de tailles variées. La question de l'impact du véhicule précédent dans la voie d'origine est importante et nous avons pu voir au travers des schéma de changement de voie *libre* ou *imposé* (3.3.2.2, p. 72), qu'il peut jouer un rôle dans la manière dont va s'exécuter le CDV [Georgeon, 2008]. Afin de limiter l'influence de ce paramètre sur les décisions du conducteur et la compréhension que nous en avons, nous pouvons envisager de créer une situation de CDV libre dans laquelle le véhicule précédent ne présente aucune contrainte pour la décision du conducteur.

Nous aboutissons donc, après ces considérations, à une situation de conduite relativement simple, à implémenter dans un simulateur de conduite et dans laquelle le conducteur serait amené à décider librement (sans obligation) de changer de voie entre deux véhicules dont l'espacement est contrôlé.

3.4.2 La question des décisions de changement de voie

Cette situation de conduite maintenant définie, nous pouvons considérer la manière dont nous allons étudier les décisions de CDV. Nous avons pu constater que la littérature sur la question est relativement peu informative. Au cours de nos recherches, nous n'avons relevé que deux études évoquant l'insertion dans un gap. Dans le premier cas ([Gurupackiam and Lee Jones, 2012]), les situations de conduite se font en contexte urbain avec un trafic important. Il faut par ailleurs noter que, telle qu'ils la décrivent, leur méthodologie de mesure de la taille des gaps manque de clarté et laisse à penser que le gap est mesuré en même temps que le changement de voie se déroule. Or, leurs données étant issues d'observations du trafic sur site, la taille des gaps n'est donc pas constante et il est envisageable que celle-ci se modifie (du fait de l'adaptation des autres usagers) au cours du changement de voie. Dans le second cas ([Wang et al., 2018a]), l'étude porte sur les CDV de bus qui, par nature, impliquent des espacements différents et des compétences de conduite spécifiques de la part des conducteurs. Enfin, aucune de ces deux études ne s'est intéressée aux processus cognitifs aboutissant à la décision CDV et d'acceptation du gap.

Nous ne pouvons donc pas nous baser sur les éléments de la littérature comme indications fiables à propos de la taille des espaces qu'il faut étudier ou sur la plage d'espacements dans laquelle s'étaleront les prises de décision. Correctement saisir cette répartition des prises de décision est important, il nous faut donc proposer aux conducteurs une plage de gaps suffisamment grande pour qu'elle comprenne à

la fois des espacements d'une taille telle que tous prennent la décision de changer de voie et des gaps assez petits pour que personne ne décide de changer de voie. Au sein de cette plage d'espacements, la variation de taille entre un gap et le gap immédiatement supérieur doit également être calibrée de sorte que l'on puisse saisir l'ensemble des changements de décision pour une grande variété de conducteurs. Une variation de taille trop importante entre deux gaps pourrait ainsi avoir pour conséquence qu'une majorité de gens passent en même temps d'un refus de changement de voie à une décision positive. Nous chercherons donc ici à proposer une variation de taille d'espacement offrant une sensibilité adaptée pour mieux rendre compte des différences inter-individuelles et des subtilités du passage de la décision de rester dans sa voie à la décision de changer de voie.

Une première approche, pour aborder le problème de la définition de la taille maximale de gap à présenter, pourrait consister à se baser sur les recommandations du code de la route. Or, nous n'avons trouvé aucune recommandation à ce sujet. En revanche, nous pouvons commencer par nous appuyer sur les règles concernant la distance de suivi de véhicule. Les recommandations du code de la route pour le suivi de véhicule peuvent être trouvées à l'article R. 412-12 qui stipule : « *Lorsque deux véhicules se suivent, le conducteur du second doit maintenir une distance de sécurité suffisante pour pouvoir éviter une collision en cas de ralentissement brusque ou d'arrêt subit du véhicule qui le précède. Cette distance est d'autant plus grande que la vitesse est plus élevée. Elle correspond à la distance parcourue par le véhicule pendant un délai d'au moins deux secondes.* »⁸ [cod, 2011]. Si la distance de suivi légale correspond à un TIV de 2 s, alors un conducteur ne devrait pouvoir s'insérer que dans un espace d'au moins 4 s. Un tel espace est rare et il est donc très probable que les conducteurs procèdent à des CDV par insertion dans des gaps de taille inférieure. Si nous nous référons aux références sur lesquelles s'appuie la définition des zones enveloppes, nous pouvons tenter d'approximer plus finement la taille de gap qui devrait être suffisante pour tous les usagers. Cette approche peut également nous permettre d'aborder les questions concernant l'évaluation du risque.

3.4.3 L'évaluation du risque dans cette situation

La notion des zones enveloppes et la matrice de conflits, développées dans le cadre de COSMO-DRIVE, ont déjà permis de prédire les décisions et évaluations du risque concernant les situations de tourne-à-gauche [Bornard, 2012]. Nous pouvons également les utiliser pour appréhender la manœuvre de CDV. À l'heure actuelle, nous ne savons pas exactement comment les décisions et évaluations subjectives du risque sont effectuées par le conducteur dans ce type de situations. Il nous faut donc adapter l'utilisation des zones enveloppes à cette situation particulière pour produire une nouvelle forme de matrice de conflits.

Dans la situation de changement de voie qui nous intéresse, nous pouvons considérer que la manœuvre de CDV est une phase de transition entre deux états plus stables (i.e. maintien dans la voie d'origine et suivi de véhicule dans la voie de destination). D'autre part, nous pouvons considérer que le schéma de conduite du CDV avec insertion entre deux véhicules doit s'articuler entre le schéma de maintien dans la voie initiale et le schéma de suivi de véhicule, une fois dans la voie de destination. La gestion des conflits de zone enveloppe dans notre situation de CDV concerne donc à la fois les conflits entre les ZE du véhicule arrivant par l'arrière dans la voie de destination et le véhicule du conducteur mais également les conflits entre les ZE du véhicule du conducteur et le véhicule qui deviendra le véhicule suivi dans la voie de destination. Ce sont donc dans notre cas, des conflits de ZE avec deux

⁸<https://www.legifrance.gouv.fr>

véhicules différents.

Comment ces deux sources de conflits potentiels sont gérées par le conducteur ? À ce propos, nous pouvons faire quelques suppositions, et sur cette base, en nous inspirant de la théorie de COSMO-DRIVE et de la littérature sur le risque, chercher à appréhender les tailles minimales et maximales de gap à expérimenter. Si nous nous référons aux travaux de [Otha, 1993], la zone enveloppe dite de « confort » s'arrête lorsque le véhicule précédent se trouve à un TIV inférieur à 1.2 s. Nous pouvons donc supposer que si le gap autorise des TIV avec le véhicule précédent et le véhicule suivant, supérieurs à cette valeur, les conducteurs devraient en très grande majorité accepter de s'insérer. Posons une situation telle que la vitesse des véhicules du trafic dans la voie de destination est de 110 km/h. À cette vitesse, un véhicule ordinaire d'une longueur de 4 mètres approximativement représente un espace d'encombrement approximatif de 0.15 s de TIV. La taille minimale du gap maximal à envisager est donc 2.6 s. Les figures suivantes illustrent le principe de calcul de cet espace : la figure 29 (p. 77) fournit la légende des codes couleurs utilisés et la figure 30 (p. 77) montre un exemple de conflits de ZE pour un gap de taille supérieure à 2.6 s, on observe que le conflit de ZE est de type « vert - vert ».

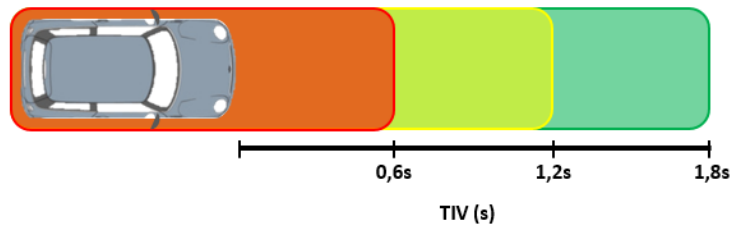


Figure 29 – Légende et code couleur pour les Zones Enveloppes et temps inter-véhiculaire

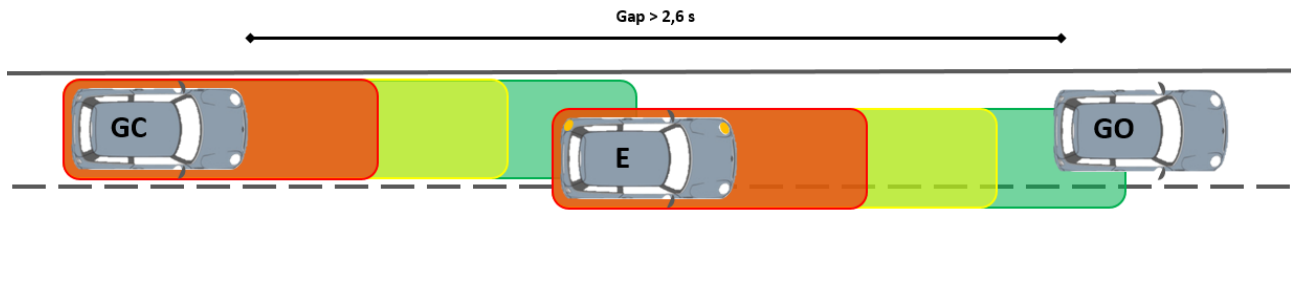


Figure 30 – Exemple d'un cas de changement de voie pour un gap de taille supérieure à 2.6 s

En suivant le même raisonnement, nous pouvons également envisager de faire quelques hypothèses concernant les décisions et évaluations de risques associées pour différentes tailles de gap. Si nous nous référons aux valeurs de TIV, en fonction des recouvrements de ZE, nous pouvons estimer qu'un espace inter-véhiculaire d'1.4s imposerait au conducteur de s'insérer à la fois dans la zone de danger du véhicule qui le suit, mais placerait également le véhicule qui le précède dans sa propre zone de danger. En conséquence, un tel CDV ne devrait pas être engagé librement par la plupart des conducteurs car il devrait être évalué comme extrêmement dangereux (conflit rouge-rouge sur la voie de destination). La figure 31 (p. 78) illustre le cas d'une insertion dans un gap de taille inférieure à 1.4 s, on constate que dans ce cas, le conflit de zones enveloppes est de type « rouge - rouge ».

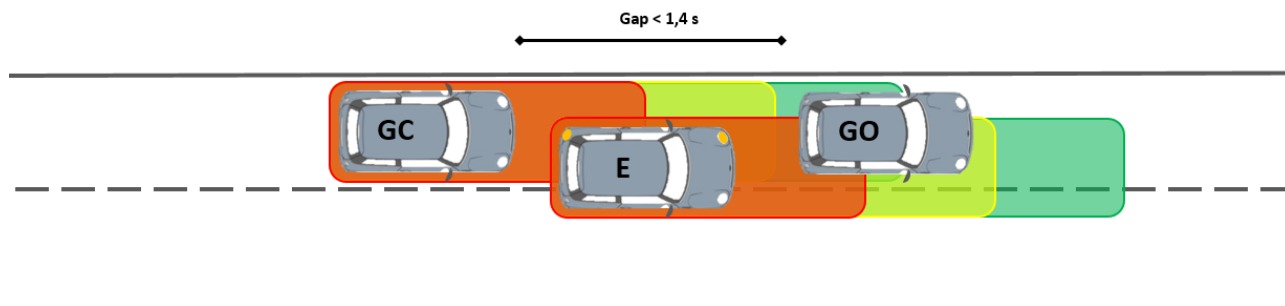


Figure 31 – Exemple d'un cas de changement de voie pour un gap de taille inférieure à 1.4 s

Si nous nous référons aux théories du risque zéro ([Näätänen and Summala, 1974]) et de l'homéostasie du risque ([Wilde, 1982]), nous pouvons également proposer des hypothèses complémentaires propres à chacune de ces deux théories pour différentes tailles de gap. Le tableau 3 (p. 78) en expose le détail (la taille du véhicule conduit a été retirée lors des calculs).

Prévisions potentielles

Taille du Gap (s)	Conflits de ZE	Risque Zéro [Summala, 1988]	Homéostasie du risque [Wilde, 1982]
$gap < 1.4$		Refus - Risque élevé	Refus - Risque élevé / Acceptation éventuelle - prise de risque
$1.4 \leq gap \leq 2.4$		Refus - Risque élevé	Acceptation probable - Risque moyen - prise de risque
$2.4 < gap$		Acceptation - Risque nul	Acceptation - Risque nul

Tableau 3 – Tableau de prédictions potentielles concernant les décisions et évaluations du risque suivant la taille des gaps

Ainsi, lorsque le gap est très petit (i.e. $< 1.4s$), les deux modèles prévoient une plus grande quantité de refus. Le modèle du risque zéro prévoit un refus systématique, sauf erreur dans l'évaluation du gap. Le modèle d'homéostasie du risque, lui, fera la même prédiction, sauf en ce qui concerne les conducteurs preneurs de risque, qui devraient néanmoins rapporter avoir pris un risque volontairement. Pour les gaps de taille moyenne (i.e. compris entre $1.6 s$ et $2.4 s$), le modèle de Wilde autorise d'avantage de cas d'acceptation avec une intention délibérée de prise de risque. Dans ces cas, les conducteurs devraient indiquer que le gap est « plutôt risqué », sans toutefois refuser de s'y insérer. En revanche, la théorie du risque zéro quant à elle n'autorise pas cette prise de risque délibérée. Elle prédit donc, de son côté, soit un refus, soit une décision positive mais prise par erreur (i.e. mauvaise perception du gap et / ou d'évaluation du risque). Enfin, pour les espaces de plus grande taille (i.e. de $2.4s$ et plus), les deux modèles prévoient une estimation du risque nulle ou proche de zéro et des décisions de CDV positives. Dans la mesure où ces prédictions ne sont que le fruit d'estimations théoriques, il nous faut prendre une certaine marge sur les tailles de gap estimées suivant cette procédure, afin de nous assurer

la possibilité de saisir la variété des comportements et décisions des conducteurs humains. Il nous faudra également mesurer les comportements et évaluations du conducteur relatifs à leur conscience du risque. Les prédictions effectuées au moyen du tableau précédent ne concernent que les décisions et les évaluations de risque associées à la situation. Nous ne savons encore rien de la manière dont les conducteurs procèdent pour se placer dans le gap.

3.4.4 La question du placement dans l'espace d'insertion

Nous l'avons évoqué dans les paragraphes précédents, l'insertion dans le gap implique de gérer la menace potentielle que représente le véhicule arrivant à l'arrière et le risque associé au véhicule se situant à l'avant, sur la voie de d'insertion. La position visée dans l'espace entre les deux véhicules sur la voie de destination, joue donc un rôle important dans la gestion du risque associé à ces deux sources de conflit. Il est donc envisageable que les conducteurs effectuent des choix variables suivant le type de stratégie qu'ils préfèrent.

Une première stratégie pour les conducteurs pourrait consister à favoriser une gestion du risque relatif au véhicule suivant (arrivant à l'arrière) en maximisant l'espace avec celui-ci et en reléguant la gestion des conflits de ZE à la phase suivant le CDV. Cette stratégie invite à s'insérer dans la première moitié (voire le premier tiers) du gap. La figure 32 illustre cette stratégie de « *maximisation de la sécurité arrière* ».

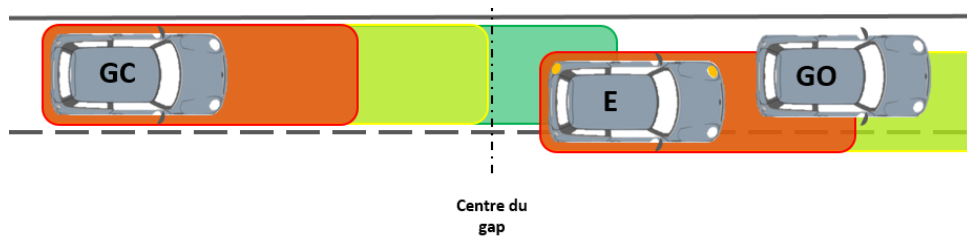


Figure 32 – Stratégie de maximisation de la sécurité arrière

Une seconde stratégie pourrait donner la priorité à la gestion des conflits avec le véhicule les précédant dans la voie de destination, et compter sur le conducteur du véhicule arrivant en arrière pour gérer leur distance de suivi lors de la phase de régulation suivant le CDV. La figure 33 illustre cette stratégie de « *de maximisation de la sécurité avant* ».

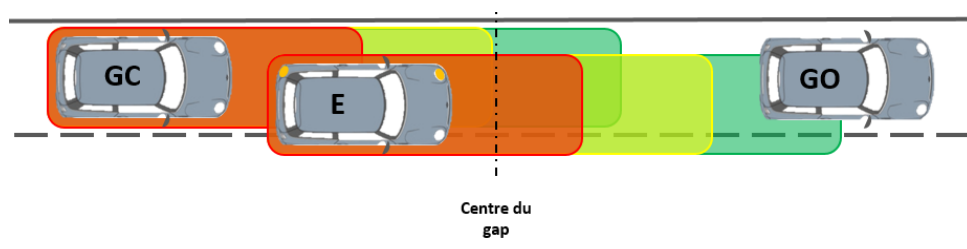


Figure 33 – Stratégie de maximisation de la sécurité avant

Une troisième stratégie pourrait consister, pour les conducteurs, à chercher un « juste milieu ».

Chapitre 3. Le changement de voie en conduite automobile

Il s'agirait ici d'une forme de « compromis cognitif » dans la gestion des deux sources de risque [Amalberti, 1996], l'insertion au centre du gap permettant un équilibrage des risques avant et arrière. L'illustration 34 présente cette stratégie de « *compromis cognitif* ».

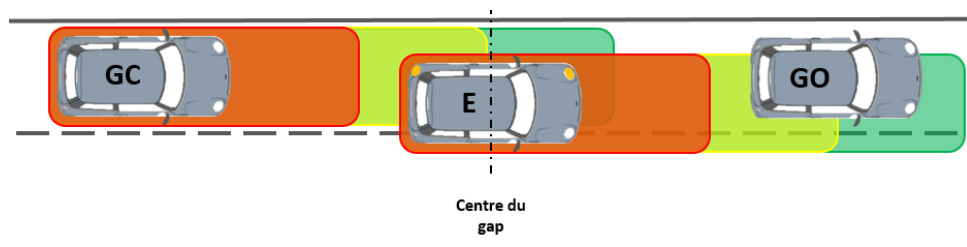


Figure 34 – Stratégie de « compromis cognitif » (équilibrage des risques)

Bien que l'état actuel de nos connaissances et l'absence de données dans la littérature concernant cette question, ne nous permette pas de faire d'hypothèses plus précises concernant la manière dont les conducteurs effectueront leur changements de voie, nous pourrions penser, en nous référant au modèle de [Summala, 1988] tout comme à celui de [Wilde, 1982], que la stratégie de « *compromis cognitif* » est la solution vers laquelle tendent les conducteurs dans la mesure où elle assure un équilibre des risques associés aux deux véhicules encadrant le gap⁹. Cette thèse vise à mettre en place une expérimentation pour « trancher » entre ces différentes possibilités.

⁹Nous reviendrons sur cet élément à la section 4.2 du chapitre 4 (p. 90)

Automatisation du changement de voie : conception et acceptation

Nous nous inscrivons également dans le contexte actuel de l'assistance à la conduite et de son automatisation. Or, dans le chapitre précédant nous n'avons envisagé l'activité de conduite, le conducteur en général et la manœuvre de changement de voie en particulier, que dans une perspective où l'humain produit l'activité. Cette dimension cognitive de l'activité n'est pas la seule sur laquelle porte ce travail de thèse. Comme nous l'avons évoqué en introduction, notre travail ambitionne également de contribuer aux recherches dans le domaine de l'ingénierie de la conception d'assistances et d'automatisation de la conduite. Pour cela, nous nous plaçons dans une approche de conception centrée sur l'humain (i.e. *Human Centred Design* HCD). Dans ce chapitre, nous procéderons dans un premier temps à une présentation générale du contexte actuel en matière d'automatisation de la conduite automobile et de développement d'assistances avancées (ADAS). Nous présenterons également le cadre et les grands principes de la conception centrée sur l'humain. Dans un second temps, nous nous pencherons plus particulièrement sur l'automatisation du changement de voie, dans une approche d'ingénierie centrée sur l'humain intégrant la cognition du conducteur. Dans un troisième temps, nous aborderons les questionnements concernant l'acceptation et les impacts de l'utilisation d'un système d'automatisation de la manœuvre de changement de voie, en cherchant à intégrer les objectifs de conception centrée sur l'humain et la réalisation de changements de voie automatiques *Human-like*.

4.1 Les assistances et l'automatisation de la conduite

Les questions de confort et de sécurité des conducteurs, associées aux progrès technologiques, ont amené les constructeurs automobile à développer des assistances à la conduite permettant une automatisation plus ou moins avancée de certains aspects de cette activité. Avec le développement de ces aides, de nouvelles problématiques ont émergé concernant à la fois leur apport en terme de sécurité, mais également leur utilisation par les conducteurs. Intéressons-nous dans un premier temps aux aspects technologiques et aux classifications des assistances et des systèmes d'automatisation de la conduite.

4.1.1 L'automatisation de la conduite, un défi technologique

4.1.1.1 Approche historique

D'un point de vue historique, la NHTSA¹, identifie cinq grandes périodes dans le développement d'assistances à la sécurité et d'automatisation de la conduite :

¹<https://www.nhtsa.gov/>

- **1950 – 2000** : développement de fonctions d’assistance et de sécurité (e.g. ceintures de sécurité, freins ABS, régulateur de vitesse, etc.)
- **2000 – 2010** : développement de systèmes de sécurité avancés (e.g. ESP, détecteurs d’angles morts, alarmes de collisions frontales, alarmes de sortie de voie, etc.)
- **2010 – 2016** : développement de systèmes avancés d’assistance à la conduite (e.g. caméra de recul, systèmes de freinage d’urgence, assistance au centrage dans la voie, etc.)
- **2016 – 2025** : développement de systèmes de sécurité partiellement automatisés (e.g. assistance au maintien dans la voie, régulateur de vitesse adaptatif, assistance à la conduite en embouteillage, parking automatique, etc.)
- **2025 – +** : développement de systèmes de conduite totalement automatisés (e.g. conduite autonome sur autoroute)

Bien que discutable, ce découpage historique a le mérite de mettre en lumière certains aspects concernant les progrès dans le développement d’assistances à la conduite.

Dans un premier temps, ces progrès se sont centrés sur l’amélioration des performances effectives du véhicule, en particulier concernant la sécurité en cas d’accident. Le conducteur restant en charge de tous les aspects de la conduite, ces assistances venaient simplement améliorer les effets de l’action qu’il mettait en œuvre, ou cherchaient à limiter les conséquences en cas d’accident.

Dans un second temps, les développements technologiques se sont centrés sur l’augmentation des performances perceptives du conducteur en munissant le véhicule de capteurs, permettant de compenser un certain nombre de faiblesses perceptives potentielles du conducteur. Toutefois, à ce niveau, le conducteur reste très majoritairement en charge de la gestion des commandes du véhicule, les assistances perceptives ne lui fournissant que des informations supplémentaires jugées utiles à sa prise de décision, améliorant par la même occasion, son interprétation de la situation. Ainsi, par exemple, les détecteurs d’angles morts permettent au conducteur de recevoir une alerte en cas de décision de changement de voie avec un véhicule dans l’angle mort, le conducteur restant en charge de la décision et de son exécution.

Dans un troisième temps, les assistances développées ont non seulement poursuivi les améliorations initiées par la précédente phase, en proposant des outils d’aide à la perception plus sophistiqués (e.g. caméra à vision nocturne), mais elles ont également introduit des automatisations du contrôle du véhicule. Bien qu’ayant été initiées auparavant par le régulateur de vitesse, ces nouvelles assistances sont dotées de capacités d’action sur les commandes du véhicule. Ainsi, ce n’est plus seulement la capacité perceptive du conducteur qui est assistée, mais sa capacité d’action. En particulier dans les cas où l’action requise ne nécessite pas de décisions complexes concernant la situation de conduite (e.g. centrage dans la voie), ou encore dans les cas où il est reconnu que les capacités de réaction du conducteur sont dépassées (e.g. freinage d’urgence).

Le quatrième temps, quant à lui, voit apparaître des fonctions automatisant des périodes de contrôle du véhicule dans des situations où leur gestion est essentiellement sensori-motrice pour le conducteur (e.g. maintien dans la voie, suivi de véhicule, etc.). Ces assistances ont la particularité de pouvoir prendre le contrôle simultané de la dimension latérale et longitudinale du véhicule, dans certains cas précis et sous la supervision du conducteur.

Enfin, le dernier temps, qui est au cœur des travaux de recherche actuels, porte sur le développement de fonctions d’automatisation capables d’une gestion de plus en plus autonome des différents aspects de la conduite. Elles intègrent donc une prise en charge non seulement des aspects perceptifs, des aspects d’exécution et de contrôle mais également des analyses et prises de décisions tactiques relatives à la

conduite.

4.1.1.2 Approche technologique

Cette progression dans l'évolution des assistances et automatisations des différents aspects de l'activité de conduite, est le fruit des progrès technologiques et informatiques associés à la baisse des coûts et aux efforts de miniaturisation. Notre objet n'étant pas d'exposer le détail de ces évolutions, nous ne ferons ici qu'en évoquer les principales, les problèmes qu'elles ont résolus et les difficultés à venir dans la progression vers l'automatisation complète de la conduite automobile.

Durant les dernières décennies, les avancées technologiques ont touché tous les composants nécessaires à l'élaboration d'ADAS. Comme le définit [Paris, 2014] dans sa thèse (p.73), une aide à la conduite est : *« un dispositif composé d'au moins un capteur orienté vers l'environnement du véhicule, ou vers l'habitacle, et qui produit des informations à destination du conducteur sous une forme symbolisée ou non, d'une des composantes de l'environnement et/ou prend en charge une partie des actions de contrôle du véhicule (voire sa totalité), en fonction du contexte de conduite »*. Les assistances sont donc des dispositifs pourvus d'éléments capables de percevoir l'environnement, de traiter cette information et de l'utiliser pour communiquer avec le conducteur ou réagir au travers d'actions sur les commandes du véhicule.

Au cours des deux dernières décennies, les progrès dans le domaine des capteurs ont été spectaculaires. Non seulement leur variété et les technologies qu'ils impliquent se sont multipliées, mais leur coût ainsi que leur taille se sont considérablement réduits avec le temps. Les véhicules peuvent maintenant être équipés de nombreux capteurs, comme les radars, lidars, caméras, systèmes GPS, etc.). Bon nombre d'entre eux sont désormais présents, de série, sur la plupart des véhicules, ce qui permet aux ingénieurs concepteurs d'ADAS de disposer de nombreuses sources d'informations sur l'environnement de conduite. Ces nouveaux capteurs permettent à la fois de résoudre des problèmes de portée et de fiabilité de l'information. Ils permettent l'acquisition de quantités toujours plus importantes d'informations.

Des progrès ont donc également dû être faits dans les domaines relatifs au traitement de ces nouvelles données. Les voitures embarquent aujourd'hui de véritables ordinateurs assurant la fusion des données captées dans l'environnement. Les moyens de communication et d'information du conducteur ont aussi progressé de leur côté. Les véhicules s'équipant progressivement d'écrans plus grands, capables de présenter des interfaces plus intuitives et de convoyer jusqu'au conducteur les informations issues des capteurs. Un exemple parlant, est celui des caméras de vision nocturne qui permettent au conducteur de bénéficier de la vision infra-rouge des caméras, au travers d'un écran dans le tableau de bord. Les progrès technologiques ont aussi affecté la chaîne de commande du véhicule en découplant les pédales et le volant, des roues et du moteur. Les véhicules modernes disposent de capteurs sur les commandes du véhicule et retranscrivent directement l'ordre recalculé aux organes effecteurs de la voiture. Ce découplage autorise alors, la possibilité pour un contrôleur numérique, de fournir des ordres au moteur, aux freins et à la direction sans intervention humaine. Il devient donc possible d'ordonner un freinage quand le conducteur n'a plus le temps de répondre, ou encore de corriger la trajectoire du véhicule de manière autonome. La vitesse du traitement de l'information par les systèmes numériques dépassant, sur certains aspects, celle de l'homme, il est devenu possible d'augmenter les performances de conduite en optimisant les réactions du véhicule, améliorant ainsi la sécurité des usagers de la route (conducteurs, passagers et autres usagers). Les récents progrès techno-

logiques et algorithmiques permettent aujourd'hui, non seulement de disposer de plus d'informations sur l'environnement de conduite pendant le déroulement de l'activité, mais de tirer meilleur parti de ces informations. Ainsi, par exemple, l'accroissement de la puissance des micro-processeurs et les progrès en intelligence artificielle, en particulier dans le domaine de la vision artificielle (notamment au travers du *deep learning*) permettent aujourd'hui, non seulement de disposer d'une image précise de l'environnement de conduite, mais également d'une reconnaissance dans cette image, des différents éléments la composant. Il est ainsi possible pour les nouvelles générations d'assistances, d'identifier les panneaux, les véhicules, les voies, les piétons etc. Les avancées qui ont été faites dans ce domaine, sont les premiers pas vers une compréhension progressive de l'environnement de conduite par les assistances. Des systèmes de surveillance et de monitoring du conducteur commencent également à voir le jour et à être commercialisés. Certains véhicules s'équipent d'eye-tracker, d'autres disposent de systèmes complexes dont le but est de détecter la somnolence.

Cet ensemble d'améliorations explique les progrès obtenus dans le domaine des assistances à la conduite. Toutefois, sur le plan technologique, de nouvelles difficultés émergent. Parmi elles, les problématiques de performance de calcul nécessaires à un traitement toujours plus poussé des données collectées par les capteurs. Les nouvelles générations de capteurs sont si performantes et fournissent des données en quantité telles, que se posent même des problématiques de connectique au sein du véhicule pour transporter ces données brutes vers les centres de traitement. Les « ordinateurs » embarqués sont actuellement si puissants qu'ils posent également des problèmes de consommation énergétique et de place occupée dans le véhicule. À ces difficultés techniques, viennent s'ajouter celles liées à la communication entre le véhicule et l'environnement (infrastructure et autres usagers), non seulement au niveau de la quantité d'informations qui doit transiter, mais également en terme de standardisation des protocoles d'échange d'information et de sécurité informatique². Les défis technologiques supportant le progrès des systèmes d'automatisation de la conduite sont donc loin d'être tous relevés. L'automatisation de la conduite n'est par ailleurs pas qu'une simple affaire de progrès technologique, elle affecte les conducteurs dans leur activité, en assurant progressivement une ou plusieurs parties de celle-ci. Cet angle d'approche est celui adopté par les classifications des niveaux d'automatisation que nous présentons dans la section suivante.

4.1.2 Les niveaux d'automatisation de la conduite

L'automatisation progressant, des classifications permettant de situer les assistances et systèmes d'automatisation ont été développées sur la base du raisonnement que nous avons suivi au paragraphe dédié à l'histoire des assistances. La classification des niveaux d'automatisation a pour intérêt principal d'identifier qui, du véhicule ou du conducteur, est en charge de quel aspect de la tâche de conduite. Cette démarche de classification n'est pas propre au domaine automobile. Nous pouvons par exemple citer les niveaux d'automatisation de [Sheridan and Verplank, 1978] établis dans le domaine du contrôle d'engins sous-marins téléguidés. Dans le domaine automobile, la classification la plus communément référencée est celle de la SAE³. Les figures suivantes 35 (p. 85) et 36 (p. 85) en illustrent les principes.

Suivant cette classification, la plupart des systèmes d'automatisation de la conduite disponibles à

²comme en témoignent les éléments fournis par G. Le Lann dans une conférence sur le sujet <https://www.youtube.com/watch?v=jsUr.VE6DLM>

³<https://www.sae.org/>



SAE J3016™ LEVELS OF DRIVING AUTOMATION

	SAE LEVEL 0	SAE LEVEL 1	SAE LEVEL 2	SAE LEVEL 3	SAE LEVEL 4	SAE LEVEL 5
What does the human in the driver's seat have to do?	You are driving whenever these driver support features are engaged – even if your feet are off the pedals and you are not steering			You are not driving when these automated driving features are engaged – even if you are seated in “the driver's seat”		
	You must constantly supervise these support features; you must steer, brake or accelerate as needed to maintain safety			When the feature requests, you must drive	These automated driving features will not require you to take over driving	
What do these features do?	These are driver support features			These are automated driving features		
	These features are limited to providing warnings and momentary assistance	These features provide steering OR brake/acceleration support to the driver	These features provide steering AND brake/acceleration support to the driver	These features can drive the vehicle under limited conditions and will not operate unless all required conditions are met		This feature can drive the vehicle under all conditions
Example Features	• automatic emergency braking • blind spot warning • lane departure warning	• lane centering OR • adaptive cruise control	• lane centering AND • adaptive cruise control at the same time	• traffic jam chauffeur	• local driverless taxi • pedals/steering wheel may or may not be installed	• same as level 4, but feature can drive everywhere in all conditions

Figure 35 – Classification des niveaux d'automatisation de la conduite selon la SAE

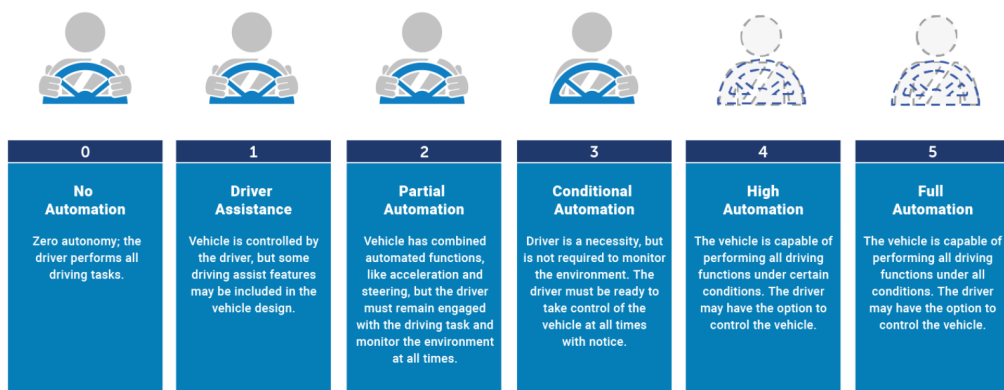


Figure 36 – Version simplifiée de la classification de la SAE (adaptée par la NHTSA)

l'heure actuelle, se situent au maximum au niveau 2. Il faut toutefois noter que le système *Autopilot* proposé dans les véhicules Tesla, bien qu'actuellement classé niveau 2, semble proposer des fonctionnalités que l'on pourrait sans doute attribuer au niveau 3. Ainsi, par exemple, la dernière mise à jour de l'assistance (2019.8.5) autorise le véhicule à gérer la conduite sur autoroute en prenant seul la décision de changer de voie, sans confirmation nécessaire de la part du conducteur. Celui-ci est simplement averti de la décision de CDV par l'assistance. Sans contre ordre de sa part, le véhicule effectue seul le CDV. Cette fonctionnalité pourrait éventuellement être considérée comme étant de niveau 3, si l'assistance n'imposait pas au conducteur de garder les mains sur le volant. L'apparition de cette nouvelle fonctionnalité confirme bien la tendance actuelle des constructeurs, au déploiement d'assistances assurant des aspects de plus en plus complexes de l'activité de conduite. Elle nous confirme également que, parmi les prochaines manœuvres qui bénéficieront d'une automatisation à grande échelle, figurera le CDV.

4.1.3 Automatisation et approche centrée sur l'humain

Que l'on aborde l'automatisation de la conduite sous l'angle historique, technologique ou normatif, nous ne pouvons éviter l'évident constat d'une transition. Cet aspect transitionnel pose donc obligatoirement la question de la place du conducteur, de son rôle et des impacts de l'automatisation sur son activité. Dans la mesure où la transition vers l'automatisation ne consiste pas en un passage brutal de l'absence d'automatisation à une automatisation totale, toutes les étapes intermédiaires entre ces deux extrêmes impliquent une interaction entre le conducteur et les assistances pendant l'activité. Cette inévitable interaction n'est pas sans conséquences.

Nous l'avons évoqué précédemment, les assistances sont généralement développées dans deux objectifs : l'augmentation du niveau de sécurité et le confort de l'utilisateur. Ces progrès sont toutefois régulièrement associés à l'émergence de nouvelles problématiques directement en lien avec les automatisations. Ce constat est relativement ancien puisque [Bainbridge, 1983] dans un article de référence, en 1983, identifiait déjà les revers de l'automatisation dans le domaine industriel. L'un des principaux problèmes identifiés dans le cadre de l'automatisation des activités en général, et de la conduite en particulier, concerne le désengagement progressif du conducteur de l'activité. Ce désengagement, aussi appelé « *sortie de la boucle de contrôle* », se manifeste entre autres, par une dégradation de la qualité de la représentation mentale de la situation [Sassman et al., 2018]. Ce phénomène ne poserait pas problème si la conduite était totalement et parfaitement automatisée, le conducteur pourrait allouer ses ressources cognitives à d'autres activités sans prendre de risques. Cependant, dans les cas où l'automatisation est partielle, le maintien, par le conducteur, d'une conscience de la situation suffisante, est une nécessité pour qu'il puisse assurer la gestion des aspects de l'activité dont il reste en charge. De plus, bien que l'automate puisse gérer certains éléments de l'activité, il peut se produire des erreurs ou anomalies, il peut arriver que les caractéristiques de la situation excèdent le champ de compétence de l'automate. Dans ces cas de figure, le conducteur devra détecter l'incapacité de l'assistance et compenser sa défaillance par les actions appropriées. Il devra donc à la fois être capable de diagnostiquer l'état d'incapacité de l'assistance, mais aussi disposer d'une compréhension suffisante de la situation pour prendre les décisions et mettre en place les actions adéquates à la gestion de la situation. Dans ces circonstances, nous pouvons dire que le conducteur se trouve partiellement délesté d'une partie de l'activité mais qu'il doit, en contrepartie, assurer la supervision de l'automate. Il s'agit donc à la fois d'un changement progressif d'activité, passant de la conduite à la supervision, mais également, dans

ces cas d'automatisation incomplète, d'une addition de ces activités. [Banks et al., 2014] montrent ainsi que cette transformation de l'activité peut aboutir à une augmentation de la charge cognitive pour le conducteur.

L'automatisation partielle impose donc une forme de cohabitation dans l'activité entre le conducteur et l'automate. Cette question de la gestion de l'activité par deux entités a fait l'objet de différentes conceptions. L'une des distinctions qui est classiquement faite, différencie deux types d'automatisations : les automatisations substitutives, dont le but est de « *Remplacer le conducteur humain par l'automate dès lors que cela est techniquement possible.* » [Bellet et al., 2010a] et les automatisations complémentaires, répondant à une logique de couplage homme-machine « *visant à instaurer une relation plus 'coopérative' entre l'homme et la technologie* » [Bellet et al., 2003]. Les cas d'automatisation substitutives sont généralement le fruit d'une approche 'techno-centrée', cherchant à compenser la faible fiabilité de l'homme en le remplaçant par une solution technologique. Comme l'indique [Bellet et al., 2003], dans cette approche : « *le problème de la 'coopération' homme-machine est plus subi que souhaité* ».

La problématique du bon fonctionnement du couple homme-machine ne concerne pas uniquement la question de la répartition des rôles et des actions. Dès l'instant où les deux entités se partagent les divers aspects de l'activité, il est important que les actions de l'une n'impactent pas négativement celles de l'autre, et que chacun dispose d'une idée claire de l'état de la situation autant que de l'état du système homme-machine. C'est ainsi que [Norman, 1990] indique, en s'appuyant sur des exemples issus de l'aéronautique, que le problème du manque ou de la mauvaise qualité des « *feedback* » est une source fréquente de dysfonctionnement du couple homme-machine, l'harmonie fonctionnelle de ce couple, dans le cadre de la conduite automobile étant importante du point de vue du maintien de la sécurité. Ce problème fait l'objet d'une réelle préoccupation au cœur de nombreuses études, comme par exemple celles portant sur la reprise en main du véhicule après une phase de conduite autonome [Stanton et al., 2001], [Sassman et al., 2018], ou encore celles portant sur le « *monitoring* » du conducteur [Paris, 2014], [Bellet et al., 2019].

Ces problématiques de recherche sont cruciales car, pour que la coopération entre le conducteur et les assistances fonctionne, nous ne pouvons nous contenter de concevoir des assistances fournissant des feedbacks et informations en grande quantité sans nous préoccuper de leur nature, de leur format, de leur temporalité et de leur pertinence. Comme l'indiquent [Bellet et al., 2003], l'un des problèmes posés par les assistances (qu'elles soient juste informatives ou qu'elles prennent en charge une partie de la conduite) « *réside dans le fait que ces systèmes sont souvent développés indépendamment les uns des autres. Une implantation anarchique de ces dispositifs dans le véhicule peut être source de conflits, ce qui requiert d'en assurer une gestion centralisée* ». L'un des objectifs de la démarche de conception centrée sur l'humain sera donc de « *donner la bonne information, sous la bonne forme et au bon moment* ». Cet objectif nécessite de connaître au moins quelques éléments relatifs à l'état du conducteur et donc de le monitorer.

[Boy, 2003] ([Boy, 2011]) indique au travers de la pyramide AUTOS (Artefact - Utilisateur - Tâche - Organisation - Situation) que la conception d'assistances dans une démarche centrée sur l'humain, doit comprendre un large champ de considérations, y compris concernant l'environnement organisationnel (qui comprend tous les agents en interaction avec l'utilisateur). [Paris, 2014](p.90) a ainsi pris en compte ces dimensions dans son travail de recherche pour le développement de fonctions de monitoring destinées au conducteur âgé. Bien que nous nous plaçons dans ce cadre général, notre travail ne pourra intégrer des dimensions aussi larges. Nous nous restreindrons aux problématiques liées au fait

que le comportement des assistances et leur intégration dans le couple homme-machine peuvent non seulement avoir un impact sur la sécurité, mais également sur leur acceptation par le conducteur. Ainsi, même une assistance fiable et efficace, peut être rejetée car mal intégrée. L'acceptation des nouveaux outils, des assistances et des automatisations, représente un champ de recherche important. Le prochain paragraphe expose brièvement les différentes conceptions qui y ont été développées.

4.1.4 L'acceptabilité et l'acceptation, quelques généralités

Les nouveaux outils et les nouvelles technologies ne reçoivent pas toutes un accueil identique auprès des consommateurs et des utilisateurs. Cet accueil est le fruit de phénomènes complexes qui ne se manifestent pas uniquement au moment ou après l'utilisation du nouvel outil. Les spécialistes ont ainsi distingué différents concepts relatifs à la manière dont un outil ou une technologie sont acceptés par les utilisateurs. La première notion est généralement appelée « *acceptabilité* » (aussi appelée « *acceptabilité a priori* » par [Payre, 2015] p.6). Elle renvoie au « *jugement prospectif envers une technologie ou des mesures qui seront introduites dans le futur* » [Distler et al., 2018] (p.1) [Schade and Schlag, 2003]. La seconde notion est appelée « *acceptation* » (*acceptance* en anglais) renvoie au jugement, à l'attitude et aux réactions comportementales, après l'usage de l'outil ou de la technologie [Distler et al., 2018], [Schade and Schlag, 2003]. [Somat et al., 2012] ajoutent une dernière notion qu'est « *l'appropriation* » et qui concerne l'introduction et l'usage du nouvel outil dans le quotidien de l'utilisateur.

Les contextes disciplinaires et les approches de l'étude de l'acceptabilité sont variés. Une revue de la littérature effectuée par [Alexandre et al., 2018] répertorie ainsi que l'acceptabilité a été étudiée dans le cadre de l'ergonomie, de la psychologie sociale, de l'approche « *orientée vers la productivité* », de l'approche hédonique, ou encore de l'expérience utilisateur (UX). De nombreux modèles de l'acceptation et de l'acceptabilité ont vu le jour. [Distler et al., 2018], en se basant sur une revue des principaux modèles, retiennent ainsi les plus notables, issus de l'approche orientée vers la productivité, en particulier les modèles TAM [Davis, 1989] et UTAUT [Venkatesh et al., 2003], ou encore le CTAM proposé par [Osswald et al., 2012] en adaptant le UTAUT au domaine de l'automobile. Sur cette base, ils proposent un questionnaire pour étudier l'acceptabilité du véhicule autonome, regroupant certains items des questionnaires associés aux modèles précédemment identifiés avec d'autres issus de la méthodologie FoG-CoQS⁴ [Bellet et al., 2018]. Ce questionnaire (disponible à l'annexe B, p. 259) comporte 21 items regroupés sous les cinq dimensions suivantes :

- Utilité et adéquation aux besoins (4 items)
- Utilisabilité du véhicule autonome (2 items)
- Influence sociale (4 items)
- Intention d'utilisation (5 items)
- Attitudes envers le véhicule autonome et son utilisation (6 items)

Ce questionnaire, par son aspect synthétique et son adaptation particulière au véhicule autonome, nous apparaît comme très pertinent pour l'étude de l'acceptabilité des systèmes d'automatisation de la conduite.

Si nous envisageons une assistance à haut niveau d'automatisation (au minimum SAE niveau 3), la coopération avec celle-ci passera par l'utilisation appropriée qu'en fera le conducteur. Elle passera aussi par une bonne acceptation de celle-ci à l'usage. En effet, dans la mesure où ce système d'automatisation

⁴pour « *Focus Group based-on Collective Questionnaire Sessions* »

aura un niveau suffisant pour prendre des décisions et les exécuter (i.e. effectuer un changement de voie sur autoroute), une bonne coopération avec le conducteur passera par une bonne acceptation du système, des décisions et actions qu'il effectuera. Nous ne savons pas exactement comment la nouvelle position de passager / superviseur du conducteur, affectera la manière dont il vivra les décisions et actions de l'automate. Comme l'indiquent [Bellet et al., 2010a], dans les situations de coopération entre l'homme et la machine, les deux acteurs partagent un « *référentiel commun* ». Au cours de l'utilisation, « *l'opérateur humain se représente (mentalement) la machine (ses capacités, ses buts, voire, son fonctionnement) et interagit avec elle en conséquence* » ([Bellet et al., 2003]). Nous pouvons donc penser qu'il évaluera les décisions et actions de l'automate. Toutefois, nous ne savons pas en détail comment la sortie de la boucle de contrôle impactera l'évaluation des différents aspects de la manœuvre de CDV, en particulier concernant la décision, l'exécution et l'évaluation subjective du risque de la situation.

4.1.5 L'approche *Human - Like*

Nous l'avons évoqué lors des chapitres précédents, le risque associé à la conduite automobile peut être important et le conducteur l'évalue en permanence. Il a par ailleurs été montré que les dimensions en rapport avec la sécurité, jouaient un rôle dans l'acceptabilité et l'acceptation des technologies. Nous pouvons ainsi rapporter l'inclusion des facteurs *anxiété* et *sécurité perçue* dans le modèle CTAM. Les résultats obtenus par [Distler et al., 2018] lors d'évaluations de l'acceptabilité et de l'acceptation d'un service de navettes autonomes, indiquent que la sécurité se révèle également être la principale préoccupation des participants, avant l'utilisation de ce type de véhicule. Nous pouvons donc, d'ores et déjà, nous poser la question de l'évaluation du risque en situation de conduite automatisée. Par ailleurs, la dimension relative à l'anxiété peut être mise en lien avec l'évaluation subjective du risque, dans la mesure où, comme nous l'avons évoqué au chapitre 2 (p. 27), les ressentis sont reconnus comme intervenant dans l'évaluation subjective du risque ([Slovic et al., 2004]).

L'une des stratégies qui peut être envisagée pour rassurer les utilisateurs et accroître leur acceptation de l'automatisation, consiste à proposer des systèmes d'automatisation dits *Human-like*, c'est-à-dire produisant un comportement similaire à celui du conducteur humain. Ainsi, par exemple, dans un tout autre domaine, [Geoffrey Louie et al., 2014], lors du test d'un robot d'interaction sociale *Human-like* auprès de personnes âgées, montrent que la facilité d'utilisation et l'anxiété sont faibles. [Kim et al., 2017] montrent pour leur part, l'effet positif sur l'anxiété des étudiants, d'un assistant *Human-like* à l'apprentissage des mathématiques. Si nous trouvons des exemples d'étude et de modélisation du comportement humain pour la conception d'assistances et d'automatisations de la conduite, il s'agit la plupart du temps, de travaux dont l'objectif n'est pas de rendre le comportement de l'assistance plus proche de l'humain, mais plutôt de permettre à ces systèmes d'interpréter et de prédire le comportement des humains impliqués dans la situation à gérer (i.e. autres usagers de la route) [Ring et al., 2018].

Notons toutefois deux travaux s'approchant de notre démarche dans le domaine de l'automatisation de la conduite. Dans le premier [Bifulco et al., 2008] ont cherché à évaluer la faisabilité d'une assistance de type ACC *Human-like*. L'année suivante, cette même équipe de recherche a eu recours à des réseaux de neurones artificiels pour proposer un algorithme d'ACC capable de s'approcher du comportement humain [Simonelli et al., 2009]. Avec un objectif similaire, mais portant sur la reproduction du comportement humain dans le contrôle des commandes d'accélérateur et de frein en phase d'approche d'un

véhicule du trafic, [Wang et al., 2013] proposent un modèle d’auto-apprentissage capable de s’adapter aux particularités du conducteur. Ces quelques travaux ayant eu recours à des assistances *Human-like*, ou ayant essayé de s’approcher de comportements humains, tendent à montrer l’effet positif de cette approche sur l’acceptation d’une assistance ou d’une automatisation. Toutefois, lorsque ces travaux y parviennent, ils ne sont pas issus du domaine de la conception des ADAS. En effet, les travaux relatifs au développement d’ADAS human-like, semblent viser davantage à personnaliser l’assistance dans un but de confort (et donc indirectement d’acceptation). Nous devons également noter que les assistances *Human-like* prototypées et testées ne concernent que le contrôle longitudinal du véhicule et non le contrôle latéral ni les CDV. Nous nous trouvons donc en présence d’un double questionnement concernant les impacts de l’automatisation sur les évaluations subjectives du conducteur et de son acceptation de l’assistance.

Nous savons désormais que l’approche human-like dans le domaine de la création d’automatisation est régulièrement envisagée, mais encore peu étudiée dans le contexte d’une technologie automatisant la décision et l’exécution du CDV.

4.2 Conception d’un automate *Human-like* pour le changement de voie automatisé

Nous avons déjà exposé, dans la section 3.4.1 (p. 74) du chapitre 3, une situation d’intérêt pour l’étude du changement de voie en conduite manuelle. Nous pouvons donc envisager de concevoir un système d’automatisation du changement de voie capable de gérer cette même situation en s’approchant du comportement humain. Une telle démarche permettrait de répondre précisément aux questions qui émergent des constats que nous faisons dans la littérature, notamment concernant l’acceptation d’un tel système. Pour envisager d’y répondre, nous devons donc spécifier le fonctionnement d’un automate capable d’effectuer des changements de voie d’une manière proche de celle de l’humain. Les prochains paragraphes seront dédiés à l’exposition des prescriptions du fonctionnement d’un tel système.

4.2.1 Considérations pour l’aspect *Human-like* du système de changement de voie automatisé

Les technologies actuelles d’automatisation du CDV sont relativement inaccessibles (car relevant du secret industriel). Dans la mesure où nous avons identifié, dans le chapitre sur le CDV en conduite manuelle, qu’une étude des changements de voie en conduite sur simulateur présentait de nombreux avantages méthodologiques pour répondre à nos questions dans ce domaine, il est préférable de rester dans ce contexte pour spécifier et concevoir l’assistance human-like au CDV. Pour cela, il est nécessaire de diviser le problème en plusieurs étapes afin de déterminer, au sein de chacune d’entre elles, une bonne manière de concevoir un comportement de l’automate proche de celui de l’humain. À cette fin, nous pouvons nous appuyer sur ce que nous avons déjà exposé au chapitre concernant le CDV en conduite manuelle.

Le problème de la position d’insertion dans le gap

Considérons dans un premier temps la question de la position d’insertion du véhicule dans le gap. Les figures 34, 32 et 33 (p. 80) montrent qu’il est possible de choisir différentes positions d’insertion

dans l'espace proposé. Ne sachant pas avec précision s'il existera une position préférentielle pour les conducteurs humains, nous ne pouvons nous prononcer définitivement quant à une position Human-like certaine. Toutefois, la position d'insertion se rapporte à une certaine forme de compromis au niveau cognitif [Amalberti, 1996]. Les figures 32 (p. 79) et 33 (p. 79) représentent des stratégies maximisant respectivement, la distance de sécurité avec le véhicule arrière et avec le véhicule avant. Tandis que la figure 34 (p. 80) représente une stratégie de compromis visant à minimiser le risque vis-à-vis des deux véhicules encadrant le gap. Dans la section 3.4.4 (p. 79), nous évoquons que cette dernière solution devrait être celle recommandée par les modèles d'évaluation subjective du risque (i.e. [Summala, 1988] et [Wilde, 1982]). Nous pouvons nous appuyer sur cette base et la proposer pour notre fonction d'automatisation du CDV. De surcroît, l'utilisation des zones enveloppes pour déterminer la position d'insertion dans le gap durant le CDV, introduit une dimension human-like supplémentaire à cet aspect de la manœuvre. En nous appuyant sur le principe proposé dans le tableau 3 (p. 78), nous pouvons parvenir à déterminer la plage de taille de gaps à considérer dans notre recherche. Le tableau 4 (p. 91) nous montre les valeurs de TIV séparant le véhicule changeant de voie des véhicules ouvrant et fermant le gap, pour différentes valeurs de taille de gap (à une vitesse de 110 km/h et en ayant retiré la taille du véhicule procédant au CDV). Un code couleur associé à ces valeurs, traduit le conflit de zones enveloppes entre les véhicules concernés (rouge : zone de danger, jaune : zone de menace, vert : zone de sécurité).

Insertion au centre du gap		
Taille du Gap (s)	TIV(s) / Conflit véhicule fermant	TIV(s) / Conflit véhicule ouvrant
0.8	0.325	0.325
1.0	0.425	0.425
1.2	0.525	0.525
1.4	0.625	0.625
1.6	0.725	0.725
1.8	0.825	0.825
2.0	0.925	0.925
2.2	1.025	1.025
2.4	1.125	1.125
2.6	1.225	1.225
2.8	1.325	1.325
3.0	1.425	1.425

Tableau 4 – Tableau des valeurs de TIV et des types de conflits de ZE avec les véhicules définissant le gap suivant la taille de l'espace

Ce tableau nous permet donc de confirmer que pour les gaps de taille inférieure à 1.4 s, une insertion au centre de l'espace est associée à un conflit « rouge-rouge » pour laquelle nous pouvons supposer que les conducteurs attribuent une forte valeur de risque. Nous pouvons également nous attendre à une faible acceptation de la décision de l'automate. Il est probable que la confiance que les conducteurs lui accordent soit également impactée négativement. Nous constatons ensuite que pour des espaces

de taille supérieure à 2.6 s une insertion au centre du gap est associée à un conflit « vert-vert ». En conséquence, nous pouvons supposer que le conducteur acceptera bien ces décisions, évaluera un risque faible à nul et ne considérera pas que l'automate a commis une erreur de décision. Dans la plage intermédiaire, nous ne pouvons prédire précisément l'évolution des évaluations subjectives des conducteurs. Toutefois, cette plage est propice à l'émergence des différences de prédiction des modèles d'homéostasie du risque et du risque zéro. En effet, ce dernier proposera que le risque évalué par les conducteurs utilisant l'assistance soit toujours élevé, tandis que le modèle d'homéostasie du risque de Wilde permet de prévoir des niveaux de risque subjectivement estimés comme plus modérés dans cette plage. En choisissant des tailles de gap comprises entre 0.8 s et 3.0 s nous devrions couvrir une plage suffisante pour inclure à la fois des changements de voie « *non risqués* » et des changements de voie « *très risqués* ». Pour une parfaite comparaison, il sera intéressant d'étudier le comportement et les décisions des conducteurs sur cette même plage de gaps en conduite manuelle. Nous opterons donc pour cette solution concernant la position d'insertion dans le gap, dans l'attente de données plus complètes concernant les préférences réelles des conducteurs.

Le problème de la décision de changement de voie

Comme nous l'avons vu à partir du paragraphe 3.4.2 (p. 75) du chapitre 3, nous pouvons émettre quelques hypothèses concernant les décisions potentielles d'acceptation de gap par les conducteurs. De plus, l'examen du tableau 3 (p. 78) ainsi que du tableau 4 (p. 91), présenté au paragraphe précédent, révèle une divergence des prédictions des théories de l'évaluation subjective du risque sur les décisions de CDV de la part des conducteurs humains. Selon la ZRT ([Näätänen and Summala, 1974]), un système de CDV *Human-like* ne devrait pas s'engager pour un gap inférieur à 2.4s tandis que selon la RHT ([Wilde, 1982]), toutes les décisions sont potentiellement possibles suivant le niveau de risque cible des conducteurs. Dans le cadre de notre recherche, il serait intéressant, sur les plans technologique et scientifique, de voir ce qui se passe si l'automate engage un CDV pour des gaps plus petits que ceux prévus en se référant à la ZRT. Sur le plan technologique, cela permettrait une optimisation du trafic. Sur le plan scientifique, cela permettrait de voir si les humains acceptent une prise de risque de l'automate, supérieure à ce qu'ils feraient manuellement, et jusqu'à quel niveau de risque ils peuvent l'accepter. Il deviendrait ainsi possible de voir où se situe la « *rupture décisionnelle* », c'est-à-dire, à partir de quand le niveau de risque pris par l'automate n'est plus acceptable. Nous pourrions également par ce biais savoir si les humains font plus confiance à l'automate qu'à eux-même. Enfin, nous pourrions obtenir une mesure indirecte du caractère *Human-like* de l'automate. Nous faisons donc le choix d'imposer à notre automate d'effectuer un CDV pour toutes les tailles de gap étudiées.

Le problème de la trajectoire de changement de voie

Lors du changement de voie, il est nécessaire d'actionner le volant afin de modifier la composante latérale du déplacement du véhicule. La solution utilisée par le modèle COSMODRIVE pour gérer la trajectoire du changement de voie dans le cadre du projet HOLIDES [Bellet et al., 2016] [Bellet et al., 2019] visant à reproduire cette dimension de la manœuvre de CDV telle qu'elle est réalisée par un conducteur humain en calculant une trajectoire au moyen d'une courbe de Bézier. Nous reprendrons cette solution dans le cadre de notre automate *Human-like*. La figure 37 (p. 93) adaptée de [Bellet et al., 2019], illustre la procédure de calcul de la trajectoire de CDV telle que simulée avec COSMODRIVE dans le cadre de ce projet⁵.

⁵À noter que sur le plan décisionnel, COSMODRIVE s'appuyait ici sur la ZRT, c'est-à-dire qu'il n'engage pas de CDV en cas de conflit de ZE

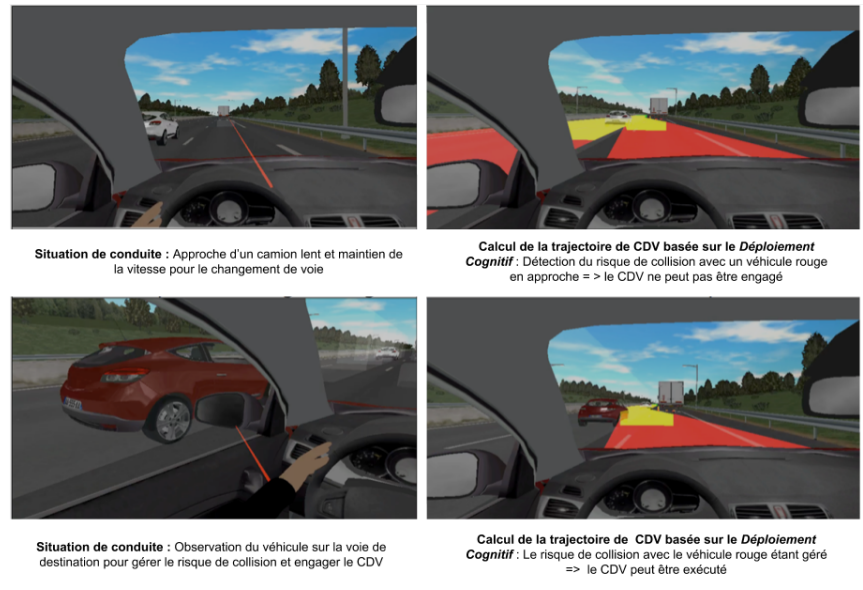


Figure 37 – Illustration des situations de changement de voie dans le projet HOLIDES ([Bellet et al., 2016])

Le problème de la gestion de la vitesse dans le changement de voie

Il nous faut en dernier lieu, déterminer la manière dont la vitesse sera gérée lors d'un changement de voie effectué par le système automatisé. Dans les situations de conduite manuelle évoquées plus haut, la voie de destination se trouve être la voie de gauche, dans laquelle les véhicules du trafic circulent à une vitesse supérieure à celle du véhicule automatisé. Les choix qui ont été faits pour les précédents aspects, ainsi que la configuration de la situation, nous amènent à opter pour une accélération et une atteinte de la vitesse cible avant d'engager le déplacement latéral. Cette méthode de gestion de la vitesse assure au véhicule changeant de voie d'être à la bonne vitesse, et donc de maîtriser sa position d'insertion dans l'espace. Elle garantit aussi un bon contrôle de la trajectoire et permet de calculer précisément le moment où l'accélération doit être appliquée par l'automate.

Bilan des prescriptions pour le changement de voie automatisé

Le système de CDV automatique, tel que nous venons de le spécifier, devra donc accepter tous les gaps de changement de voie qui lui seront présentés afin que nous puissions étudier l'impact de ses décisions sur l'acceptation et les évaluations subjectives du risque des conducteurs. Lorsqu'il procédera à un CDV, l'automate viendra se placer au centre du gap. Pour cela, il procédera dans un premier temps à une accélération dans sa voie d'origine dont l'aboutissement sera l'atteinte d'une vitesse égale à celle du trafic dans lequel le véhicule devra s'insérer. Cette vitesse cible sera atteinte au niveau du centre de l'espace dans la voie d'origine. Dans un second temps, l'automate effectuera le changement de voie en réalisant un déplacement latéral depuis la voie d'origine vers la voie de destination. Ce déplacement latéral respectera une trajectoire définie au moyen d'une courbe de Bézier, issue du modèle COSMODRIVE, dont les paramètres sont définis de sorte que les mouvements et accélérations latérale soient souples et que la brutalité de la manœuvre soit maîtrisée. Procédons maintenant à

un premier bilan des questionnements et interrogations que nous avons concernant le système de changement de voie automatisé.

4.2.2 Bilan des questions concernant le changement de voie automatisé

Nous pouvons à présent compléter les questionnements posés au chapitre précédent à propos du changement de voie en conduite manuelle, par de nouvelles interrogations à propos de l'automatisation de cette manœuvre. Nous avons relevé au début de ce chapitre que les niveaux d'automatisation sont variables et, qu'en conséquence, l'implication, l'engagement du conducteur dans l'activité et la situation de conduite sont impactés. Nous avons établi qu'il existait actuellement une phase de transition dans laquelle le conducteur coopère avec les assistances et automatisations. Le format de cette coopération est variable mais, à l'heure actuelle, le conducteur continue à minima à superviser l'automate. Nous avons également vu que l'introduction d'une assistance ou automatisation, était sanctionnée par une acceptation plus ou moins grande de la part de l'utilisateur. Les questions relatives à l'acceptation ont fait l'objet de nombreuses études mettant notamment en avant, la distinction entre l'acceptabilité avant l'utilisation et l'acceptation une fois l'assistance utilisée. La littérature apporte une forme d'éclairage concernant les grands paramètres pouvant influencer l'acceptabilité, mais ne fournit pas de détails précis concernant l'acceptation d'une assistance automatisant le CDV. Enfin nous avons vu que l'approche consistant à doter le système de conduite automatisé d'un comportement human-like, était régulièrement envisagée au moment de la conception, mais qu'à notre connaissance, il n'avait pas été réalisé de tests d'acceptation dans ce domaine. À partir de ces différents constats, nous avons établi qu'il serait intéressant de tester un système de changement de voie automatisé human-like pour comparer son accueil avec les comportements et évaluations de conducteurs lors de situations de conduite manuelles identiques. Nous pourrions ainsi tester l'acceptation de l'assistance de manière précise et la comparer à une acceptabilité mesurée avant utilisation. Nous pourrions aussi mesurer l'évolution des évaluations des conducteurs entre la conduite manuelle et la conduite automatisée. Nous pourrions, en particulier, mieux comprendre l'acceptation et l'évaluation des décisions de l'automate suivant les décisions propres du conducteur. Nous pourrions observer l'impact de la sortie de la boucle de contrôle sur les évaluations subjectives de risque. Enfin, nous pourrions effectuer des vérifications concernant les aspects human-like du système de changement de voie automatisé que nous avons spécifié.

En amenant des conducteurs à vivre les mêmes situations de CDV en conduite manuelle et en conduite automatisée, nous aurions donc l'opportunité d'obtenir des mesures précises concernant l'acceptation du système. Une telle démarche offrirait également des opportunités supplémentaires, relatives à des questionnements concernant l'impact à plus long terme, d'une utilisation d'un système d'automatisation de la conduite. La dernière partie de ce chapitre sera dédiée à l'exposition de ces questionnements et à la manière dont notre approche pourra tenter d'y apporter quelque éclairage.

4.3 Mesure des effets de l'automatisation sur la conscience et la gestion du risque en conduite manuelle

4.3.1 Contexte et motifs de l'étude de la conduite manuelle après expérience de l'automatisation

L'utilisation de systèmes d'assurances ou d'automatisation de la conduite n'est pas sans effet sur les conducteurs. Si, comme nous l'avons vu à la section 4.1.3 (p. 86), la sortie de la boucle de régulation entraîne des effets de détérioration de la qualité de la représentation mentale de la situation ([Sassman et al., 2018]), d'autres effets potentiellement néfastes, peuvent se manifester de manière plus discrète ou ultérieurement à l'utilisation de l'assistance. L'un des premiers exemples a été rapporté par [Wilde, 2014] sur l'effet de l'utilisation de l'ABS chez les chauffeurs de taxi munichois (c.f. section 2.2.4.4, p. 40).

D'autres effets associés à des assurances et automatisations de plus grande complexité, ont également été rapportés. Ainsi [Gouy et al., 2014] ont mené une étude sur l'effet de la présence adjacente d'un train de camions automatisés (« *platooning* ») sur les distances de suivi entre les véhicules non automatisés. Pour cela, ils ont procédé à une étude sur simulateur de conduite au cours de laquelle des participants étaient amenés à conduire dans une situation segmentée en trois phases : une tâche de suivi de véhicule simple sans trafic (base line), une tâche de suivi de véhicule avec un train de camions automatisés avec faible TIV de suivi (0.3 s), et enfin une tâche de suivi de véhicule avec un train de camions automatisés avec grand TIV (1.4 s). Afin d'éliminer d'éventuels effets d'ordre, les participants étaient séparés en deux groupes. Le premier était d'abord confronté au train de camions avec faible TIV de suivi, puis au train de camions avec grand TIV de suivi. Le second groupe était confronté à l'ordre inverse. Sur la base de ce protocole, [Gouy et al., 2014] montrent que la présence du train de camions, et en particulier de celui avec faible distance de suivi, était associé à une diminution significative de la distance de suivi des participants. Ils montrent donc que, même sans système d'automatisation de la conduite, des conducteurs peuvent être influencés par le comportement des véhicules automatisés aux alentours.

Dans une autre étude, [Skottke et al., 2014] ont testé l'effet spécifique de l'utilisation d'un système de conduite automatisé avec une distance de suivi équivalente à un TIV de 0.3 s. Pour cela, ils ont constitué deux groupes de participants. Le premier était défini comme un groupe contrôle dans lequel les participants n'effectuaient qu'une tâche de suivi de véhicule, sans aucune automatisation. Pour le second groupe, la tâche de conduite était divisée en trois phases : une phase de suivi de véhicule avant automatisation, une phase de conduite autonome, et enfin une phase de conduite manuelle post-automatisation. Les auteurs ont alors montré que l'utilisation du système de conduite autonome réduisait significativement, mais transitoirement, la distance de suivi en conduite manuelle post-automatisation.

Le système de changement de voie automatisé que nous avons précédemment spécifié pourrait également, comme pour les assurances étudiées dans la littérature, induire a posteriori des effets sur l'évaluation subjective du risque ou encore sur les décisions du conducteur lorsque celui-ci conduit manuellement après une phase d'utilisation de l'automate. Il est donc impératif de se préoccuper de l'existence de ces potentiels effets de l'expérience de CDV automatisés sur la conduite manuelle et de les étudier.

4.3.2 Situations d'étude de l'après utilisation du système de CDV automatisé

Comme nous l'avons spécifié, l'automate de CDV effectuera des changements de voie dans des espaces de petite taille, tout en maintenant des temps à la collision (TTC) infinis avec les véhicules ouvrant et fermant le gap. Il est donc possible que ces décisions soient hors des habitudes décisionnelles des conducteurs qui y seront exposés. Nous pouvons suspecter, comme dans les cas évoqués dans la littérature, que la confrontation des conducteurs à ces décisions et comportements automatisés, entraîne une modification (parfois qualifiée *d'adaptation comportementale*) des décisions, évaluations subjectives et comportements des conducteurs.

Notre protocole devra nous permettre de tester et d'étudier l'existence de tels effets. Pour ce faire, il suffirait simplement de placer des conducteurs dans les mêmes situations de conduite manuelle que celles proposées au chapitre 3 (p. 59) après les avoir exposés aux situations de conduite automatisées que nous avons décrites dans ce chapitre. Nous devons toutefois prêter attention à quelques contraintes et aspects spécifiques d'une telle procédure.

L'effet dont nous cherchons à tester l'existence est, s'il existe, susceptible de ne pas se maintenir pendant de nombreux essais de conduite manuelle ([Skottke et al., 2014]). Nous ne pouvons pas nous permettre de tester autant de situations de conduite manuelle avec autant de gaps différents que pour la partie de l'étude destinée à étudier en détail les CDV en conduite manuelle. En outre, il serait inutile par exemple, de présenter aux conducteurs, des espaces de CDV qu'ils acceptent déjà tous, car l'effet potentiel ne s'y manifesterait probablement pas. Pour tester l'existence et la nature d'un effet induit par l'expérience de l'automate, nous devons faire l'hypothèse qu'il est plus probable qu'il se manifeste de manière notable dans une zone particulière, pour chaque conducteur, du spectre des gaps testés. Nous avons par ailleurs fait l'hypothèse de l'existence pour chaque conducteur, d'au minimum une région particulière du spectre des tailles d'espace de changement de voie, dans laquelle sa décision de CDV passe de positive à négative. Nous pouvons donc supposer que, s'il existe un effet de l'automatisation du CDV, celui-ci se manifestera préférentiellement dans cette « zone » de changement de décision. Il serait alors intéressant de présenter au conducteur, des gaps appartenant à cette « zone » uniquement. En procédant de cette manière, nous visons directement les situations dans lesquelles sont susceptibles de se manifester préférentiellement, les effets d'adaptation comportementale potentiellement induits par l'automate, tout en contournant le problème du caractère potentiellement transitoire de l'effet que nous cherchons à observer. Cette démarche présente une particularité importante : les gaps de test de l'effet de post-automatisation seront éventuellement différents d'un conducteur à l'autre. Dans cette partie de l'étude, ce qui sera commun et comparé pour tous les conducteurs, ne sera pas un gap de taille définie, mais un ensemble de gaps dans lesquels se trouve le « *seuil de changement de décision* » propre à chacun. C'est donc le caractère de seuil personnel de changement de décision qui sera commun et non la taille absolue du gap.

4.3.3 Déterminer la zone de changement de décision

Pour parvenir à créer ces conditions expérimentales, il faut donc trouver un moyen d'estimer la position de ce seuil dans la plage des gaps présentés au conducteur. De surcroît, il faut également être en mesure de le faire suffisamment tôt pour proposer au conducteur, rapidement après son expérience de l'utilisation du système d'automatisation des CDV, une nouvelle présentation des gaps avoisinant ce seuil. En résumé, nous devons être capables d'adapter dynamiquement le protocole expérimental

à chaque participant. En parvenant à effectuer cette adaptation dynamique, il devient alors possible de procéder à une étude plus complète sur les mêmes conducteurs, dans trois phases expérimentales différentes. Nous reviendrons sur l'importance et l'intérêt d'un tel protocole en fin de chapitre.

Pour déterminer la zone seuil de changement de décision d'un conducteur en direct, il faut dans un premier temps être capable de déterminer si le conducteur a effectivement changé de voie ou non. Ensuite, il faut être en mesure de capitaliser les décisions suivant la taille des gaps, afin de retracer l'historique de celles-ci et estimer le gap seuil de changement de décision. Cette estimation peut, dans certains cas, sembler évidente, mais dans d'autres, être plus complexe. Si nous prenons l'exemple d'un conducteur ayant comme seuil de décision un gap de 2.2 s, la configuration la plus simple sera alors la suivante : tant que la taille du gap est inférieure à sa valeur du seuil, le conducteur refusera de changer de voie, et dès que cette valeur sera supérieure ou égale à la valeur seuil, le conducteur décidera de changer de voie. Dans ce type de configuration, il est relativement aisé de déterminer la valeur seuil du conducteur, puisque ses décisions effectives correspondent parfaitement à son seuil. Mais dans bien des cas, le comportement du conducteur présente une certaine variabilité. Il est donc nécessaire de pouvoir gérer cette variabilité au moyen d'une procédure adaptée. Pour ce faire, il faut que durant la phase de conduite manuelle dédiée à l'étude des CDV avant utilisation de l'automate, le conducteur soit amené à prendre plusieurs fois, une décision pour chaque taille d'espace étudié. Cette répétition des décisions permettra de mieux appréhender l'instabilité et la variabilité comportementale du conducteur. Ainsi, pour une taille de gap donnée, si celui-ci est accepté par erreur, les autres itérations du même espace ne seront probablement pas acceptées, ce qui minimisera le poids de cette erreur de décision locale dans les résultats et analyses. En dehors de ces erreurs locales qui peuvent occasionnellement se produire, il est tout à fait envisageable que le seuil de changement de décision du conducteur ne soit pas une marche brutale, mais une succession de phases passant d'un refus systématique à une phase d'acceptations plus ou moins régulières, puis enfin à une phase d'acceptation systématique. Cette « zone » de transition de décision peut être appréhendée au moyen de la répétition d'espaces identiques. Il nous faudra donc tenir compte et tirer parti de cette répétition des gaps de même taille, dans la conception de notre algorithme d'estimation du seuil de changement de décision. Nous détaillerons son fonctionnement dans la partie du protocole expérimental qui lui est dédiée, au chapitre 6 (6.4.1, p. 129).

Une fois la valeur de gap située dans la zone de changement de décision estimée, le conducteur pourra y être confronté en post-automatisation, afin de mesurer d'éventuels effets sur la décision, mais aussi pour recueillir ses évaluations subjectives relatives au risque, ou encore sur la procédure d'exécution du CDV, s'il l'a engagée. Dans la mesure où cet effet éventuel peut ne pas concerner uniquement l'espace calculé comme gap de changement de décision probable, il serait intéressant de proposer au conducteur un autre gap de taille légèrement inférieure, ainsi qu'un gap de taille légèrement supérieure. Il pourrait ensuite être utile de comparer les résultats et évaluations des participants en post-automatisation, aux évaluations et performances en conduite manuelle avant automatisation.

L'exposition de ce dernier aspect, relatif à nos questions et intérêts concernant le changement de voie manuel et le changement de voie automatisé, nous permet de noter quelques particularités dans notre approche et dans la manière dont nous devons envisager de répondre aux questionnements qui ont jusqu'ici été soulevés. L'examen de la littérature et du contexte scientifique dans lequel nous situons, nous amène à nous interroger sur la manœuvre de changement de voie, aussi bien dans son exécution manuelle qu'automatisée, voire même en post-automatisation. Pour répondre à ces différentes questions, nous pourrions décider de procéder à trois expérimentations distinctes sur simulateur de conduite. Cependant, nous estimons qu'il y a un intérêt évident à acquérir les données

Chapitre 4. Automatisation du changement de voie : conception et acceptation

utiles à l'étude de ces questions, sur les mêmes conducteurs. Cela permettra en effet, de limiter l'effet d'inter-individualité dans les résultats que nous obtiendrons en comparant la conduite manuelle à la conduite automatisée et la conduite post-automatisation. Pour satisfaire à ce besoin supplémentaire, il nous faudra donc concevoir un protocole expérimental adaptatif en trois volets. Un premier volet de conduite manuelle, un second volet de conduite automatisée, et enfin un dernier volet de conduite manuelle post-automatisation. Avant de présenter en détail le protocole expérimental qui a été mis en œuvre, il nous faut effectuer un bilan synthétique de notre problématique et des questionnements scientifiques qui lui sont associés.

Deuxième partie

Problématique et méthodologie

Synthèse de la problématique et des questions de recherches

Le présent chapitre propose une courte synthèse du contexte théorique et des questions de recherche élaborées dans les quatre chapitres précédents, et auxquelles nous allons chercher à apporter des réponses au moyen du protocole expérimental qui sera exposé dans le prochain chapitre.

5.1 Synthèse du contexte et de la problématique

Les quatre précédents chapitres abordaient chacun un aspect de la problématique générale sur la conscience du risque et l'automatisation de la conduite dans le cadre du CDV sur autoroute.

Ainsi, le premier chapitre a notamment permis de présenter l'approche de modélisation de la cognition du conducteur dans le cadre du modèle COSMODRIVE et les concepts de schéma de conduite et de zones enveloppes.

Le second chapitre avait comme objectif de dresser un aperçu de la littérature sur l'évaluation subjective du risque, puis de montrer comment cette évaluation est conçue dans le cadre de la conduite automobile et, enfin, d'introduire la notion de conscience du risque et le rôle des zones enveloppes dans l'évaluation subjective et la gestion du risque en situation de conduite.

Le troisième chapitre se focalisait, quant à lui, sur la thématique du CDV, les domaines d'étude de cette manœuvre et la manière dont nous pouvons la concevoir selon l'approche de COSMODRIVE (i.e. schéma tactique de CDV et zones enveloppes). Ce chapitre a également soulevé les premières questions en rapport avec le CDV en conduite manuelle, la prise de décision, l'évaluation subjective et la gestion du risque dans ces situations.

Enfin, le quatrième chapitre avait pour objectif de présenter la démarche d'automatisation de la conduite, les notions d'acceptabilité et d'acceptation, ainsi que la démarche de conception centrée sur l'humain et, plus particulièrement, la conception d'une assistance *Human-like* automatisant le CDV. Ce chapitre évoquait les questions relatives à cette démarche d'automatisation du CDV, en particulier en ce qui concerne l'acceptation et l'évaluation subjective du risque dans ce contexte. Une dernière partie de ce chapitre traitait de la question de l'influence à posteriori de l'usage d'un système d'automatisation du CDV, en proposant un moyen d'évaluer cet effet après adaptation du protocole d'étude à chaque conducteur.

L'articulation de ces quatre chapitres nous a donc amenés à considérer le CDV sous l'angle de la cognition et de la modélisation du conducteur, (1) en mettant un accent particulier sur la manière dont il prend conscience du risque dans cette situation spécifique, puis (2) en mettant cette approche en perspective avec le développement d'un automate prenant en charge, de manière autonome, cette manœuvre, et enfin, (3) en questionnant les effets à posteriori de l'utilisation de cet automate sur la conduite manuelle.

Prenons maintenant un moment pour exposer plus précisément les questions de recherche et hypothèses que ces premiers chapitres nous ont conduits à formuler.

5.2 Principales questions de recherche

Nos principales questions de recherche s'articulent donc autour de trois points :

- (1) les CDV en conduite manuelle ;
- (2) les CDV en conduite automatisée ;
- (3) l'impact d'une phase de conduite autonome avec CDV automatiques sur les CDV effectués, a posteriori, en conduite manuelle

Ces grandes lignes de questionnement présentent une forme de complémentarité dont nous tirerons parti pour concevoir un protocole expérimental en trois volets, destiné à impliquer les mêmes participants. Chaque volet répondra à nos questionnements spécifiques ; les résultats pourront néanmoins être mis en parallèle et comparés, afin d'obtenir une information supplémentaire. Cette méthodologie d'approche présente quelques particularités d'intérêt épistémologique pour la cognitive. Nous y consacrerons un temps à la fin de ce travail de thèse. Examinons maintenant le détail de nos questions de recherche et des hypothèses que nous pouvons y associer.

5.3 Questions et hypothèses relatives au changement de voie en conduite manuelle

Concernant les CDV en conduite manuelle, nous avons vu que la littérature se révèle relativement pauvre concernant les décisions de CDV avec insertion dans un gap. Il en est de même concernant la manière dont les conducteurs évaluent subjectivement le risque associé à cette manœuvre. Ce seront donc ici, nos deux principales questions. Compte tenu de ce que nous avons exposé au chapitre 3 (p. 59) concernant les zones enveloppes, lors du CDV, nous avons pu esquisser quelques hypothèses en utilisant les ZE pour tenter de prédire les possibles décisions de CDV des conducteurs. Le tableau 3 (p. 78), que nous reproduisons ici, nous permet de préciser les hypothèses concernant les décisions et évaluations de risques possibles par les conducteurs, suivant la taille des espaces proposés. Son examen détaillé, présenté en 3.4.3 (p. 76), permet des prédictions concernant les décisions et les évaluations de risque que sont susceptibles de faire les conducteurs. Il précise également les différences de prédictions avancées respectivement par le modèle du risque zéro de [Näätänen and Summala, 1974] et le modèle d'homéostasie du risque de [Wilde, 1982] suivant les gaps. À ce niveau, nos résultats en conduite manuelle devraient nous permettre de trancher entre ces deux théories.

Par ailleurs, la partie 3.4.4 (p. 79) expose les questions et inconnues concernant le mode d'insertion dans le gap lors du CDV. En effet, dans cette section, nous indiquions que la littérature ne nous permettait pas, actuellement, de savoir comment les conducteurs procédaient à cette insertion, et en particulier dans quelle zone de l'espace ils venaient se placer lors de l'exécution de la manœuvre. Les illustrations 34, 32 et 33 (p. 79) proposent plusieurs « stratégies » potentielles.

Nos questions se résument ainsi :

- Dans quelle taille de gap les conducteurs décident-ils de changer de voie, et à partir de quand renoncent-ils ?
- Quelle est l'évaluation subjective du risque que les conducteurs font pour les différentes tailles

Prévisions potentielles

Taille du Gap (s)	Conflits de ZE	Risque Zéro [Summala, 1988]	Homéostasie du risque [Wilde, 1982]
$gap < 1.4$		Refus - Risque élevé	Refus - Risque élevé / Acceptation éventuelle - prise de risque
$1.4 \leq gap \leq 2.4$		Refus - Risque élevé	Acceptation probable - Risque moyen - prise de risque
$2.4 < gap$		Acceptation - Risque nul	Acceptation - Risque nul

Tableau 5 – Tableau de prédictions potentielles concernant les décisions et évaluations du risque suivant la taille des gaps

de gap ?

- Dans quelle mesure les conflits de zones enveloppes nous permettent-ils de prédire et de comprendre les décisions de CDV, les évaluations subjectives de risque et les éventuelles erreurs commises ?
- Quelle est la stratégie de positionnement et d’insertion dans un gap choisie par les humains lors du CDV entre deux véhicules ?

Pour répondre à ces questions, nous supposons qu’il existe un lien entre la taille des gaps, l’évaluation subjective du risque et la décision de CDV. Nous supposons également que les conflits de zones enveloppes peuvent nous aider à prédire et à comprendre les risques évalués et les décisions prises par les conducteurs. Pour vérifier ces hypothèses, notre protocole expérimental devra donc placer les participants dans des situations de décision de CDV avec insertion dans des espaces tels, qu’ils respectent les valeurs proposées dans le tableau des hypothèses 5. Nous devons alors collecter leurs décisions, les éventuelles erreurs de décision qu’ils pourraient estimer avoir commises, mais également les interroger sur (1) leurs évaluations subjectives de la criticité de la situation et (2) le niveau de difficulté estimé concernant la réalisation de la manœuvre de CDV. Nous devons enfin enregistrer leurs comportements et performances de conduite (trajectoire, vitesse, TIV) pour déterminer leur position d’insertion dans le gap.

5.4 Questions et hypothèses relatives à la conception d’un système de CDV automatisé et à son acceptation

Pour ce qui est de l’automatisation de la conduite, dans le contexte du CDV sur autoroute, nous avons montré au chapitre 4 (p. 81) que plusieurs problématiques se posaient en rapport avec les notions d’acceptabilité et d’acceptation des assistances, mais également concernant l’intégration du facteur humain dans la conception même du système. Lorsqu’un automate est capable de décider lui-même d’effectuer un CDV, comment les utilisateurs l’acceptent-ils ? Comment-évaluent-ils le risque pris par cet automate ? Procèdent-ils à une évaluation similaire et dans les mêmes ordres de grandeur que lorsqu’ils étaient eux-mêmes en charge de réaliser cette manœuvre manuellement ? Par ailleurs,

nous avons montré que dans un objectif d'amélioration de l'acceptation de ce type de systèmes, nous pouvions envisager d'introduire des aspects *Human-like* dans le comportement de l'assistance. Pour investiguer de façon exhaustive l'acceptation et les évaluations subjectives du risque par le conducteur, il nous semble nécessaire que l'automate prenne toujours la décision d'effectuer le CDV (cf. 4.2, p. 90). En revanche, pour ce qui est de la manière dont ce changement de voie est effectué, nous proposons de nous baser sur les connaissances en notre possession concernant la manœuvre de CDV en conduite manuelle pour définir le comportement de l'automate (cf. section 4.2, p. 90). En ayant recours aux zones enveloppes, nous avons pu formuler quelques hypothèses concernant les possibles évaluations subjectives du risque et l'acceptation des décisions de l'automate. Le tableau 4 (p. 91), que nous reproduisons ci-après, en fait la synthèse. Nous supposons ainsi que pour un gap de taille égale ou supérieure à 2.4 s, les participants devraient évaluer la manœuvre automatique comme peu critique et très acceptable. Pour un gap de taille comprise entre 1.4 s et 2.4 s nous supposons que la manœuvre sera évaluée comme moyennement critique et moyennement acceptable. Enfin, pour un gap de taille strictement inférieure à 1.4 s, nous supposons que les participants évalueront la manœuvre comme très critique et la décision de l'automate comme inacceptable.

Insertion au centre du gap		
Taille du Gap (s)	TIV(s) / Conflit véhicule fermant	TIV(s) / Conflit véhicule ouvrant
0.8	0.325	0.325
1.0	0.425	0.425
1.2	0.525	0.525
1.4	0.625	0.625
1.6	0.725	0.725
1.8	0.825	0.825
2.0	0.925	0.925
2.2	1.025	1.025
2.4	1.125	1.125
2.6	1.225	1.225
2.8	1.325	1.325
3.0	1.425	1.425

Tableau 6 – Tableau des valeurs de TIV et des types de conflits de ZE avec les véhicules définissant le gap suivant la taille de l'espace

Les questions que nous nous posons à propos de l'automatisation du CDV sont résumées dans la liste suivante :

- Comment un système de CDV automatique sera-t-il accepté suivant la taille des espaces dans laquelle il procède à l'insertion ?
- L'évaluation subjective du risque effectuée par les conducteurs en conduite automatisée est-elle identique à celle que l'on peut attendre en conduite manuelle ?
- Comment la confiance des conducteurs en l'automate sera-t-elle impactée par la taille des espaces dans lesquels il s'insère et la manière dont il procède au CDV ?

- Hormis pour les choix d'insertion dans des gaps extrêmes, la procédure de CDV human-like est-elle fidèle au comportement réel des conducteurs en situation de conduite automatisée ?
- Les conflits de zones enveloppes permettent-ils de prévoir l'acceptation de l'assistance par les utilisateurs ?

Pour répondre à ces questions, il nous faudra placer les participants dans des situations de conduite comparables à celles présentées pour l'étude de la conduite manuelle, dans lesquelles le système de CDV automatisé procédera à des insertions. Nous devons aussi recueillir les évaluations subjectives des participants concernant le risque situationnel, la gestion du risque par l'automate et surtout mesurer leur niveau d'acceptation de ce système de CDV automatique.

5.5 Questions et hypothèses relatives à l'effet induit par l'expérience d'utilisation du système de CDV automatisé, sur la conscience et la gestion du risque en conduite manuelle

Nous avons également introduit en dernière partie du chapitre 4 (4.3, p. 95) la problématique de l'influence possible de l'utilisation d'un système d'automatisation de la conduite sur les décisions et comportements en conduite manuelle à posteriori. Nous avons ainsi évoqué quelques travaux issus de la littérature, témoignant de l'existence potentielle d'un tel effet dans le cadre de l'utilisation d'autres types d'assistances à la conduite (i.e. platooning, ACC). Nous avons par ailleurs, montré que, s'il existait, ce phénomène possiblement transitoire méritait d'être étudié dans la mesure où il pouvait impacter les décisions de CDV des conducteurs. Dans cet objectif nous avons montré qu'il nous fallait proposer aux conducteurs des situations de conduite manuelle avec CDV potentiel, après avoir utilisé une assistance de CDV automatique.

Nos principales questions concernant l'effet induit par l'utilisation d'un système d'automatisation du CDV sont :

- L'utilisation d'une assistance automatisant le CDV impacte-t-elle a posteriori les décisions prises par les conducteurs, lorsqu'ils conduisent manuellement ?
- Leurs évaluations subjectives de criticité et de difficulté de la manœuvre sont-elle différentes après utilisation de l'assistance ?

Étant donné que l'effet potentiel à posteriori de l'automate est possiblement transitoire, nous avons déterminé que les situations de CDV à proposer au conducteur pour répondre à ces questions étaient dépendantes de son seuil de décision habituel. Nous avons donc avancé la proposition d'utiliser une méthodologie impliquant un algorithme capable d'estimer dynamiquement ce seuil pour chaque conducteur, afin de ne proposer à chaque participant que des gaps proches de ses propres seuils / limites. Pour cela, il sera nécessaire de tenir compte de la variabilité naturelle des décisions humaines, et donc de s'appuyer sur l'analyse des décisions de CDV engagées par chaque participant lors de la phase précédente de conduite manuelle. Cette contrainte nous amène ainsi à proposer une méthodologie cognitive innovante dans l'élaboration du protocole expérimental.

5.6 Une démarche cognitive pour le protocole expérimental

Nous pouvons donc partir de ces questionnements et hypothèses pour élaborer un protocole expérimental destiné à y répondre. Les questions que nous posons concernant la conduite manuelle, puis

la conduite automatisée et enfin la conduite après utilisation de l'automatisation, pourraient faire l'objet de protocoles indépendants. Toutefois, ces questions peuvent être liées et imbriquées, de sorte qu'en les considérant ensemble, elles permettent un regard plus approfondi sur l'ensemble de la thématique du CDV. C'est dans cet objectif que nous avons conçu un protocole en trois phases impliquant les mêmes conducteurs. En procédant de la sorte, les résultats issus d'une première phase de conduite manuelle pourront être mis en relation avec les résultats issus d'une seconde phase de conduite automatisée. Puis, ces deux volets pourront eux-mêmes être mis en relation avec les résultats d'une troisième phase de conduite manuelle, après utilisation du système de CDV automatisé (conduite *post-automatisation*). Pour ce dernier volet, la structure expérimentale permettra non seulement une mise en regard des résultats, mais aussi et surtout une contribution à sa mise en place. En effet, l'évaluation des effets ultérieurs à l'automatisation implique une adaptation individuelle du protocole à chaque conducteur (cf. 4.3.3, p. 96). Cette structure en trois volets expérimentaux complémentaires et inter-dépendants, permettra de procéder à une analyse des données du premier volet (i.e. conduite manuelle) dans un objectif de paramétrage du troisième (i.e. conduite post-automatisation). Ici, l'ingénierie cognitive trouve donc une place particulière, en ce qu'elle permet d'utiliser les analyses relatives à la cognition du conducteur pour définir dynamiquement certains aspects du protocole. Cette démarche passe par le développement d'un algorithme permettant cette adaptation individuelle du protocole (présenté en 6.4.1, p. 129).

Cette procédure particulière permettra d'effectuer, lors de la phase de conduite post-automatisation, les mêmes mesures que celles effectuées lors des précédentes phases. Ces mesures étant comparables, nous pourrons alors vérifier l'existence d'un effet de l'expérience d'utilisation du système de CDV automatisé, sur les décisions et les évaluations subjectives de risque concernant le CDV auprès des mêmes participants.

Le prochain chapitre est donc consacré à la description détaillée du protocole expérimental qui a été conçu par nos soins et mis en place pour recueillir les données nécessaires à l'investigation de nos questions et hypothèses de recherche.

Protocole Expérimental

6.1 Protocole général

Afin de répondre aux objectifs scientifiques développés dans le chapitre précédent, un protocole expérimental en 3 volets a été conçu et mis en place. Ce protocole a pris la forme d'une expérimentation sur simulateur de conduite. Nous décrivons dans un premier temps (1) les aspects généraux du protocole, dans un second temps (2), la cabine de simulation de conduite, ensuite, (3) la plate-forme expérimentale V-HCD et enfin, (4) chacun des trois volets expérimentaux dans son déroulement comme dans les aspects techniques de sa composition.

6.1.1 Procédure globale

De manière très générale, les questionnements auxquels nous cherchons à répondre, nous guident vers la manipulation de deux grands facteurs expérimentaux : la taille de l'espace d'insertion inter-véhiculaire pour le CDV, et l'utilisation ou non d'un système de CDV automatisé *Human-like*. La première variable indépendante portant sur la taille des espaces (gaps) comprend 12 modalités, correspondant chacune à une taille d'espace (gap) définie. La seconde variable indépendante comprend, quant à elle, trois modalités : automate désactivé (conduite manuelle), automate activé (conduite automatisée) et enfin condition de conduite manuelle post-automatisation (i.e. automate désactivé).

6.1.1.1 Définition de la situation de conduite, contrôle et maîtrise de l'environnement

Pour correctement étudier l'impact de la taille des espaces d'insertion sur les décisions, comportements et jugements des conducteurs, nous devons contrôler différents paramètres cruciaux des situations de conduite dans lesquelles ils seront immergés. Le plus évident d'entre eux est, bien entendu, la taille des gaps en elle-même. Lors de notre étude de la littérature, nous avons pu identifier que l'indicateur de Temps Inter-Véhiculaire (TIV) était un moyen pertinent d'estimation de la distance entre véhicules et qu'il permettait de tenir compte de la vitesse. De plus, les Zones Enveloppes sur lesquelles nous nous appuyons dans le cadre de la modélisation de la cognition du conducteur, sont également exprimées en TIV. Nous choisirons donc d'exprimer la taille des espaces d'insertion en *secondes de TIV*.

Outre le contrôle de la taille des gaps, le contexte de conduite joue un rôle important. Nous avons donc choisi de le standardiser au maximum pour minimiser l'impact de ses variations. Une situation de conduite en ligne droite sur une autoroute à 2 x 2 voies est donc choisie. Cette maîtrise du contexte de conduite ne concerne pas seulement l'infrastructure routière, mais également l'état du trafic et la dynamique des véhicules impliqués dans la situation. Le nombre, le type et la vitesse des véhicules présents dans le trafic doivent donc demeurer identiques ; les modalités de leur contrôle sont exposées plus loin dans ce chapitre.

Chapitre 6. Protocole Expérimental

Un élément contextuel fondamental, directement en rapport avec la maîtrise requise des gaps, doit maintenant être évoqué : la visibilité du gap. En effet, pour nous assurer du fait que les décisions et évaluations du conducteur portent bien sur le gap manipulé, il nous faut le rendre clairement identifiable. Un moyen simple de le faire est de définir le gap entre deux véhicules toujours identiques et toujours clairement identifiables dans le trafic. Le conducteur peut alors être informé sur le gap d'intérêt via une simple consigne.

En l'état, la situation que nous souhaitons créer semble fort prévisible puisque l'infrastructure, les véhicules et l'identification même du gap restent toujours identiques. Cette prévisibilité, bien que nécessaire, peut s'avérer être un problème si elle permet au conducteur de pouvoir tout anticiper du déroulement de la situation de conduite. Si la plupart des anticipations du conducteur ne sont pas gênantes, et au contraire nous garantissent une bonne conscience de la situation de sa part, l'une d'entre elle doit absolument être évitée : l'identification prématurée de la taille de l'espace. Du point de vue de l'activité de conduite, évaluer la criticité d'une situation, prendre une décision et planifier son action plusieurs minutes à l'avance, n'est pas la même chose que devoir prendre une décision sur le moment. Sans contrôle de la prévisibilité de la taille des gaps, nous ne pourrions ni déterminer comment sont prises les décisions, ni estimer le rôle des informations localement disponibles. Nous devons donc faire en sorte que la taille des espaces soit non seulement distribuée aléatoirement au cours de la passation expérimentale, mais également qu'elle ne soit révélée qu'au moment où celui-ci se présente au conducteur. Le gap devra donc être masqué par le trafic.

Nous devons également déterminer le nombre et la taille des différents gaps à présenter, l'objectif idéal étant de couvrir un ensemble de tailles de gap tel que les plus petits espaces seront refusés par tous les conducteurs et que les plus grands seront acceptés par tous. Pour cela, nous pouvons nous appuyer sur les hypothèses et calculs posés dans les sections 3.4.3 (p. 76) (tableau 3, p. 78) et 4.2 (p. 90) (tableau 4, p. 91), ainsi que sur des résultats de pré-tests effectués par des volontaires, au cours desquels de nombreux espaces allant de 0.5 s à 3.5 s par pas de 0.1 s ont été examinés. De ces travaux préparatoires que nous avons réalisés pour finaliser et valider notre protocole, il est ressorti que les gaps de 0.8s devraient probablement toujours être refusés, tandis que les gaps de 3.0s toujours acceptés. Par ailleurs, ces procédures de pré-test ont également permis de déterminer qu'une échelle de variation de 0.2s était suffisante pour capturer finement la variabilité des comportements et décisions des conducteurs. Forts de ces analyses préparatoires, nous présenterons donc 12 espaces allant de 0.8s à 3.0s par pas de 0.2s. Le tableau 7 (p. 108) présente l'ensemble des tailles d'espace qui seront soumises aux conducteurs.

Taille des gaps	0.8s	1.0s	1.2s	1.4s	1.6s	1.8s	2.0s	2.2s	2.4s	2.6s	2.8s	3.0s
-----------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Tableau 7 – Répartition et taille des gaps présentés.

La situation de conduite pour le CDV étant maintenant clarifiée et contrôlée, il reste un écueil potentiel à lever. L'étude du comportement et de la cognition humaine implique de ne pas négliger leur variabilité potentielle. Il est tout à fait possible que des conditions de conduite identiques puissent produire, chez un même individu, des comportements et des décisions différentes. Un conducteur

peut très bien habituellement accepter de changer de voie en s'insérant dans un gap donné, mais le refuser dans un cas particulier, pour de nombreuses raisons hors de notre contrôle (e.g. mauvais positionnement dans la voie, mauvaise vitesse, erreur d'estimation perceptive, etc.). Réciproquement, il est également tout à fait possible qu'un conducteur prenne une décision de CDV par erreur, ou à l'encontre de sa tendance habituelle. Une négligence de cette variabilité intra-individuelle dans notre protocole nous amènerait possiblement à considérer une décision particulière comme représentative du comportement habituel de cet individu, alors qu'elle n'est que le fruit de cette variation, voire d'une erreur. Pour capter cette tendance et minimiser l'impact de cette variabilité, il est donc nécessaire de présenter plusieurs fois chaque gap aux participants : trois répétitions de chaque gap seront donc présentées à tous les conducteurs étudiés.

Chaque conducteur sera ainsi amené à prendre 36 décisions d'insertion et à effectuer les changements de voie si sa décision est positive. Ces 36 situations de conduite devront avoir lieu pour les deux premiers volets expérimentaux (i.e. conduite manuelle et conduite avec automatisation du CDV), afin de pouvoir procéder à des comparaisons exhaustives des données pour ces deux situations expérimentales.

6.1.1.2 Conduite manuelle et automatisée

Le second facteur expérimental, relatif à l'automatisation de la conduite, affecte la structure de notre expérimentation.

Afin de nous assurer une étude correcte des processus d'évaluation subjective du risque, de décision et des comportements de CDV, mais également pour garantir une conduite aussi naturelle que possible, une phase d'entraînement préalable est nécessaire pour permettre au participant de se familiariser avec la conduite en simulateur. Par ailleurs, il est impératif que la condition de conduite manuelle soit la première passée par le participant. Cet ordre permet de saisir le comportement et les évaluations du conducteur indépendamment de toute expérience d'une automatisation du CDV. En outre, cela nous permettra de recueillir l'acceptabilité a priori d'un système automatisant le CDV. L'expérimentation doit donc comporter, dans un premier temps, un entraînement puis un premier volet de conduite manuelle dans lequel le participant effectuera 36 scénarios de conduite. À l'issue de chacune de ces situations, des questions lui seront posées au travers d'échelles d'évaluation, dans le but de recueillir ses impressions et évaluations subjectives et ainsi d'enrichir les données comportementales et d'accéder aux aspects cognitifs de l'évaluation et de la gestion de la situation.

Le second volet correspondra à la seconde modalité du facteur expérimental, et consistera donc en des situations de changement de voie pour lesquelles le système de CDV automatisé sera activé. Dans cette condition, le participant n'aura pas à interagir avec le système et recevra simplement l'instruction d'observer les décisions et les comportements de l'automate. Afin de mieux comprendre comment la taille des gaps et la manière d'effectuer le CDV affectent l'acceptation, l'évaluation subjective du risque ainsi que l'évaluation des performances du système dans ses manœuvres et décisions, nous avons au préalable déterminé qu'il était nécessaire que le système procède systématiquement au CDV, quelle que soit la taille de l'espace présenté. Une seconde justification de ce choix expérimental s'appuie sur la potentialité de la technologie d'être plus performante que l'homme sur certains aspects. Dans cette condition, le participant verra donc le système effectuer 36 changements de voies successifs dans un ordre aléatoire. La consigne fournie indiquera simplement que le système automatisé est capable de prendre des décisions et d'effectuer les changements de voie, s'il estime que ceux-ci sont faisables. Le

participant n'est donc pas informé à l'avance du fait que l'automate effectuera systématiquement un CDV, quelle que soit la taille du gap. Comme lors du premier volet, à l'issue de chaque situation de conduite, des questions d'évaluation basées sur des échelles similaires lui sont proposées.

Le dernier volet dit de « *post-automatisation* » de cette expérimentation est particulier à plusieurs niveaux. D'une durée plus courte, il consiste simplement pour le participant, à effectuer de nouveau trois scénarios de CDV en conduite manuelle. Il s'agit donc de situations identiques à celles présentées lors du premier volet, le but de cette dernière modalité étant d'évaluer la potentielle influence d'une utilisation du système d'automatisation du CDV. Ce qui nous intéresse ici n'est pas le moment de la reprise en main lors de l'utilisation du système, mais bien l'étude d'un potentiel effet *a posteriori* de l'expérience d'un système de CDV. Dans la mesure où nous ne savons ni si un tel phénomène existe, ni s'il est intense et/ou durable, nous avons pris le parti de ne tester cet effet que sur quelques situations particulières. Nous avons fait l'hypothèse qu'il existe une probable plage « *seuil* » dans la gamme des tailles de gap, à partir de laquelle la décision d'un individu va passer du refus de changer de voie à la décision d'effectuer un CDV. Il est possible que cette plage soit restreinte (e.g. une taille de gap précise) ou plus large. Il est également possible que cette plage ne soit pas située au même endroit de la gamme pour tout les participants. Ainsi, un conducteur plus téméraire pourra très bien commencer à accepter des gaps dès que leur taille avoisine 1.0 s alors qu'un autre, plus prudent, attendra des gaps plus grands (e.g. 2.0 s) pour prendre sa décision. Nous présentons donc, lors de ce dernier volet, des gaps individualisés pour chaque participant, suivant la position de cette plage personnelle dans la table des taille de gaps. Pour parvenir à cette fin, un algorithme de détermination de la plage de décision a été élaboré et implémenté. Il sera présenté en détail dans la section consacrée au troisième volet expérimental (cf. 6.4.1, p. 129).

6.1.1.3 Participants

Une analyse de puissance préliminaire a été effectuée afin de déterminer la taille minimale de l'échantillon permettant une obtention de résultats statistiques robustes. À l'issue de cette analyse, nous avons fixé comme objectif minimal de recueillir des données pour 25 participants, l'idéal étant d'obtenir les données de 30 personnes, toutes titulaires du permis de conduire. Par ailleurs, un objectif de parité de sexe et de diversité de niveau d'expérience de conduite, est fixé pour l'échantillon.

6.1.2 Données à recueillir

La structure globale de l'expérimentation et la situation de conduite étant maintenant établies, il reste à définir les variables dépendantes et les mesures à effectuer pour obtenir les réponses à nos questions. Nous pouvons d'ores et déjà identifier quatre grands types de données à recueillir : les données de simulation de conduite, les données d'oculométrie, les données des questionnaires relatifs aux situations de conduite et enfin les données générales concernant les participants. Nous examinons chacun de ces grands types de données dans les sous-sections suivantes.

6.1.2.1 Données « simulateur »

Les données issues du logiciel de simulation sont aussi importantes que variées. Une grande partie du comportement effectif du conducteur pourra être recueilli par cette voie, car c'est en agissant sur les commandes du simulateur que le conducteur met en application une partie des fruits des ses

processus cognitifs, et c'est par ce biais qu'il atteint ou non ses objectifs. Le participant agira simplement sur les pédales, sur le volant et éventuellement sur le clignotant. Il faudra donc recueillir ces données brutes, car elles seront la traduction la plus proche de la mise en exécution du plan d'action du participant. Ces actions sur les commandes du véhicule se traduiront dans la situation simulée, par une modification constante de l'état du véhicule piloté; sa vitesse, sa direction et son positionnement dans l'environnement seront en perpétuelle évolution. Le recours à la simulation de conduite permet d'obtenir des informations relatives à la position, la vitesse et l'accélération. Celles-ci sont donc également enregistrées afin de pouvoir les retracer à posteriori. Cette modification permanente de l'état du véhicule dans l'environnement virtuel, s'accompagne également d'une modification des positionnements, vitesses et accélérations relatives aux autres objets mobiles dans l'environnement. Ces données relatives sont utiles, car nous savons par la littérature et le modèle COSMODRIVE sur lequel nous nous appuyons, qu'elles sont impliquées dans les processus cognitifs soutenant l'activité de conduite (cf. 1.3 p. 16, 3.3 p. 70). Dans notre cas, les choses sont d'autant plus évidentes que la décision de CDV par insertion dans un gap se fait nécessairement relativement aux véhicules encadrant cet espace. Nous calculerons et recueillerons donc ces indicateurs relatifs que sont les distances, vitesses relatives et les TIV. Dans le décours du traitement des données, certains indicateurs pourront être calculés sur la base d'autres indicateurs. Ces opérations seront décrites dans les sections concernées du chapitre 7 (p. 139).

6.1.2.2 Données oculométriques

Si une partie du comportement du conducteur se manifeste par une action effective sur les commandes du véhicule, cela n'en constitue pas pour autant la totalité du comportement qui nous intéresse. L'activité de conduite automobile comporte des étapes de prise d'information qui n'apparaissent pas dans les actions sur le véhicule. Le conducteur doit en permanence observer son environnement et diriger son attention dans des régions particulières de celui-ci, pour prélever les informations nécessaires à la prise de décisions et au contrôle de leurs mises en exécution. Comme l'indiquent les zones d'exploration visuelle du schéma de conduite (cf. 3.3.2.2 p. 72 figure 27 p. 72), l'information visuelle est fondamentale pour assurer le bon déroulement de l'activité et il est nécessaire pour nous de chercher à recueillir le comportement d'exploration de l'environnement par le conducteur [Finnegan and Green, 1990], [Salvucci et al., 2001] (cf. 3.2.2.3, p. 65). Pour cela, les dispositifs d'oculométrie sont d'une grande utilité et nous y aurons recours. Dans un contexte de décision de CDV et d'insertion dans un gap, les informations visuelles que le conducteur doit traiter sont à la fois liées à l'espace ouvert devant lui, mais aussi à l'espace derrière lui, et en particulier à celui de la voie de destination. La décision d'acceptation du gap reposant nécessairement sur une évaluation visuelle de la taille de celui-ci, nous porterons un intérêt particulier à la consultation des rétroviseurs.

6.1.2.3 Données des questionnaires post-situationnels

L'étude du comportement observable ne suffit pas à satisfaire les besoins pour la modélisation cognitive. Les processus cognitifs mis en œuvre dans l'activité de conduite, pour nombre d'entre eux, ne se traduisent pas directement en comportements explicites. Ainsi, par exemple, l'évaluation de la criticité d'une situation, ou encore la planification d'une trajectoire, renvoient à des processus qui restent potentiellement « muets » du point de vue comportemental (cf. 1.3.3 p. 19, figure 3 p. 20).

Leur étude nécessite donc de mettre en place des moyens de recueil, qui impliqueront la demande explicite au participant, de produire une réponse reflétant les résultats de ces processus sous-jacents. De plus, comme nous l'avons exposé précédemment dans la partie consacrée à la modélisation de la cognition du conducteur, seule une faible fraction des processus impliqués dans l'activité produisent un résultat conscient et explicite, le reste relevant de l'implicite. Pour un certain nombre d'entre eux, nous procédons donc à une explicitation au moyen des questionnaires. Nos besoins pour la modélisation et les traitements statistiques nous incitent à recueillir, autant que possible, des informations quantitatives sur des échelles assimilables à une mesure continue. Il en résulte qu'après chaque situation de conduite, les participants seront interrogés sur différents aspects en lien avec leur décision et leurs évaluations subjectives, via des échelles allant de 0 à 100 (à l'exception d'une question fermée portant sur l'erreur), communément utilisées au LESCOT dans le cadre de l'évaluation subjective de la criticité des situations ([Banet, 2010], [Georgeon, 2008], [Bornard, 2012]), et de l'acceptation d'assistances ([Bellet et al., 2018], [Distler et al., 2018])¹. Les questions qui leur seront posées dans le cadre de cette thèse portent sur 3 principaux domaines :

- **Criticité / Risque de la situation et du gap** : Il s'agit ici d'obtenir une information de la part du conducteur, sur le risque qu'il a évalué en lien avec le gap et la situation de conduite. Cette évaluation distingue la criticité qu'il estime pour cette situation et le risque qu'il estime avoir effectivement pris suivant sa décision. Trois questions sont relatives à cette dimension.
 - « *Quelle était la criticité de cette situation ?* » (0 - 100)(pas du tout critique - extrêmement critique)
 - « *Quelle aurait été la criticité de cette situation si elle s'était produite sur route réelle ?* » (0 - 100)
 - « *Quel est le niveau de risque que vous avez pris dans cette situation ?* » (0 - 100) (conduite manuelle uniquement)
 - « *À quel point avez-vous pris ce risque (évalué en question précédente) intentionnellement ?* » (0 - 100) (conduite manuelle uniquement)
- **Performance et difficulté à effectuer la manœuvre** : Il s'agit, concernant ce point, de permettre au participant d'évaluer sa propre performance de conduite, son éventuelle erreur ainsi que la difficulté de la manœuvre de CDV.
 - « *Auto-évaluez votre maîtrise de la situation et de son risque.* » (0 - 100) (pas du tout maîtrisé - parfaitement maîtrisé)
 - « *Avez-vous commis une erreur de décision ?* » (oui / non)
 - « *À quel point cette manœuvre de CDV a-t-elle été difficile à effectuer ?* » (0 - 100) (pas du tout difficile - extrêmement difficile)
- **Acceptabilité / acceptation d'une assistance à la conduite** : Il s'agit dans ce domaine, d'estimer à quel point le conducteur accepterait que le CDV soit effectué par une assistance automatisant cette manœuvre.
 - « *À quel point accepteriez-vous qu'un véhicule autonome effectue un CDV dans cette situation ?* » (0 - 100)(pas du tout acceptable - totalement acceptable)
 - « *Auriez-vous confiance en ce système de CDV automatisé s'il se comportait ainsi sur route réelle ?* » (0 - 100) (conduite autonome uniquement)

¹pour une justification théorique et statistique de cette méthodologie se référer à [Bellet et al., 2018] et à [Chimi and Russell, 2009]

Afin d'assurer une comparabilité des réponses aux questions entre les conditions de conduite manuelle et la condition de conduite automatisée, certaines questions sont reformulées pour tenir compte du mode de conduite ou de la décision prise par le conducteur. Par exemple, la question portant sur la difficulté de la manœuvre de CDV est formulée différemment suivant que le CDV a été effectué ou non, ou suivant qu'il s'agisse d'une situation en conduite manuelle, ou en mode autonome. Nous obtenons les formulations suivantes :

- « *A quel point cette manœuvre de CDV a-t-elle été difficile à effectuer ?* » (en conduite manuelle, si le CDV a été effectué)
- « *A quel point cette manœuvre de CDV aurait-elle été difficile à effectuer ?* » (par vous-même en conduite manuelle, si le CDV n'a pas été effectué, ou manuellement en condition d'automatisation du CDV)

Il est également à noter que certaines questions prenaient un sens différent suivant les actions effectuées par le conducteur. Par exemple pour la question : « *Pensez-vous avoir commis une erreur ?* ». En cas de réponse positive, l'erreur rapportée par le participant n'est pas du même type, suivant qu'il a décidé de s'insérer dans le gap ou qu'il a refusé. Dans le premier cas, l'erreur rapportée indique qu'il n'aurait pas dû effectuer la manœuvre, tandis que dans le second cas, elle indique qu'il aurait dû l'effectuer. En d'autres termes, dans le premier cas le conducteur estime avoir été trop téméraire (ou avoir sous évalué le risque), alors que de le second cas, il estime avoir été trop prudent (ou qu'il a surévalué le risque). Afin de ne pas alourdir le questionnaire, ces différences d'interprétation sont exposées aux participants au cours des entraînements afin qu'il puissent correctement répondre. Les réponses sont re-catégorisées en post-traitement (cf. 7.2.1.2 p. 143 et tableau 16 p. 144).

Ces données, recueillies après chaque situation de conduite, ont permis d'associer la particularité de la situation (i.e. taille de gap, etc.) aux évaluations subjectives « locales » du conducteur. D'autres éléments, plus permanents, et relatifs au profil, à la personnalité ou aux opinions du conducteur, peuvent également exercer une influence ou apporter un éclairage sur ses comportements et ses réponses. Ces données ont été collectées par l'intermédiaire de deux questionnaires proposés aux conducteurs au début de l'expérimentation, avant les entraînements à la conduite.

6.1.2.4 Données de questionnaires de profilage des participants

Les questionnaires plus généraux visent à collecter deux types d'informations à propos des conducteurs : des informations concernant leur expérience de conduite (en nombre d'années comme en distance parcourue) et des informations concernant leurs opinions et leurs attitudes envers l'automatisation des véhicules. Le premier questionnaire, relatif à l'expérience de conduite permettra notamment de connaître la démographie des participants à l'étude. Le second questionnaire permettra d'avoir une meilleure connaissance générale de l'acceptabilité à priori, de chaque participant concernant la voiture autonome, en général. Nous utiliserons pour cela une version adaptée au véhicule autonome, du questionnaire utilisé par [Distler et al., 2018], dont nous avons présenté les travaux à la section 4.1.4 (p. 88). Les données collectées grâce à ce questionnaire permettront d'apporter un éclairage supplémentaire aux résultats obtenus à l'issue des questionnaires post-situationnels, ainsi qu'aux analyses qui en seront faites. Ce questionnaire d'acceptabilité est présenté en annexe B (p. 259).

6.1.2.5 Verbalisations spontanées et débriefing

Enfin, l'expérimentateur dispose d'une fiche de passation, lui permettant de recueillir les verbalisations spontanées des participants, leurs remarques, leurs réponses aux questions de débriefing, mais également de recenser les dysfonctionnements ou anomalies pouvant avoir lieu lors des passations. Le nombre, l'heure et la durée des pauses y sont également consignées.

6.1.2.6 Tableau récapitulatif des données à recueillir

Catégories de données	Type de données
Données de conduite sur simulateur	- Actions sur les commandes du véhicule : <i>volant, pédales, clignotant</i> - Données de déplacement du véhicule du participant (Ego) : <i>position X, Y, vitesse, accélération</i> - Données des véhicules encadrant le gap (Gap Closer [GC] et Gap Opener[GO] : <i>position X, Y, vitesse, accélération</i> - Données relatives entre Ego et GC, GO : <i>vitesse relative, TIV</i>
Données de questionnaires post-situationnels	- Criticité / Risque pris / intentionnalité - Performance / Maîtrise de la situation / erreurs - Acceptabilité / Acceptation
Données oculométriques	- Position du regard - Consultation des aires d'intérêt : <i>temps passés, nombre de consultations</i>
Données de questionnaires généraux	- Expérience du participant : <i>âge, kilométrage, année d'obtention du permis, type de véhicule</i> - Opinions et attitudes envers le VA
Données de passation	- Verbalisations spontanées - Réponses aux questions verbales : <i>Nombre de gaps, influence du mode autonome</i>

Tableau 8 – Tableau récapitulatif des données à recueillir

Le protocole est à présent dessiné dans ses plus grandes lignes. Dans les prochaines sections, nous détaillons les aspects techniques et les détails de l'implémentation de celui-ci, avant de procéder à une

description plus précise de chaque volet expérimental.

6.1.3 Le simulateur de conduite

Notre protocole de recherche requérant un contrôle très fin de l’environnement de conduite, l’utilisation du simulateur de conduite s’est rapidement imposée comme la solution la plus adaptée pour la mise en œuvre de l’expérimentation.

Afin d’éclaircir davantage les aspects techniques de l’expérimentation sur simulateur de conduite, il convient avant tout, de préciser quelques éléments d’ordre très général à propos du simulateur, afin de permettre au lecteur de mieux appréhender les différentes terminologies employées.

6.1.3.1 Les simulateurs de conduite

Un simulateur de conduite peut être vu comme un équipement permettant à un utilisateur / conducteur, d’exercer une activité de conduite de véhicule dans un environnement virtuel (a minima visuel et sonore). En règle générale, une contrainte des expérimentations sur simulateur de conduite est de fournir une expérience la plus immersive possible, afin que les habitudes de l’utilisateur puissent se manifester et que son comportement s’approche du comportement naturel. Pour parvenir à cet objectif, les simulateurs de conduite sont constitués de 3 grands éléments : un logiciel de simulation, un moyen de diffusion et un moyen d’interaction.

Le logiciel de simulation représente le cœur du simulateur. Il est en charge de créer l’environnement virtuel et de calculer les images et sons à diffuser à l’utilisateur, via le système de diffusion. Les moyens de diffusion sont les dispositifs physiques qui vont permettre à l’utilisateur de percevoir l’environnement de conduite virtuel fourni par le logiciel de simulation. Les moyens d’interaction, quant à eux, sont les dispositifs physiques qui permettent à l’utilisateur d’agir (via un volant et des pédales) sur le véhicule qu’il conduit, et donc d’envoyer des informations au logiciel de simulation afin qu’il puisse, à chaque instant, faire évoluer l’environnement de conduite, en tenant compte des actions du conducteur. Dans ce manuscrit, nous distinguons le logiciel de simulation, de l’ensemble formé par les moyens de diffusion et d’interaction. Nous parlons ainsi de cabine de simulation pour désigner les systèmes physiques de diffusion et d’interaction, et nous conservons le terme de logiciel de simulation pour la partie restante.

Par ailleurs, d’autres dispositifs peuvent être ajoutés pour mesurer le comportement du conducteur. Ces dispositifs, qualifiés de systèmes d’acquisition, varient suivant les besoins expérimentaux et ne font pas partie, en soi, du simulateur de conduite.

6.1.3.2 La cabine SIMAX - 308

L’ISFTTAR dispose de cabines de simulation de conduite prévues pour l’expérimentation et l’étude du comportement humain. Parmi elles, nous avons choisi la cabine 308 fixe (SIMAX) mise à disposition et maintenue par le laboratoire LEPSIS². Cette cabine, par sa configuration et son équipement, permet de placer le conducteur dans un environnement de conduite proche de la réalité, tout en autorisant l’acquisition d’un grand nombre de données en provenance de multiples sources. Elle se compose d’un habitacle de véhicule entier (Peugeot 308) dans lequel le conducteur prend place, et ressemblant en tout point à un véhicule du marché. Des capteurs installés sur les organes de commande du véhicule, ainsi

²Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations

qu'une communication avec le bus de communication (CAN), permettent d'obtenir les informations en provenance du volant, des pédales, des feux et des clignotants. Cette configuration offre également la possibilité de contrôler le tableau de bord, afin de fournir au conducteur une information sur sa vitesse. Un moteur de retour d'effort sur le volant assure un feedback haptique au conducteur. Un système de sonorisation en quadriphonie permet la diffusion des différents sons de l'environnement (e.g. moteur, roulement, etc.). Autour de ce cockpit, sont disposés 5 écrans destinés à couvrir les 180° du champ visuel horizontal face au conducteur. Deux écrans additionnels sont disposés de sorte à couvrir la partie arrière droite et centrale arrière du champ visuel horizontal. La partie arrière gauche n'est pas couverte, elle permet au conducteur d'accéder au poste de conduite. Les écrans couvrent 40° du champ visuel vertical. Deux écrans sont également fixés à la carrosserie du véhicule pour permettre la diffusion spécifique d'images dans les rétroviseurs latéraux. Des miroirs plats ont été disposés dans les rétroviseurs extérieurs afin d'assurer un meilleur rendu des images. L'illustration 38 (p. 116) montre la configuration des écrans et donnent un aperçu de la cabine de simulation.



Figure 38 – Vue générale de la cabine SIMAX - 308

Cette cabine de simulation a été interfacée avec la plate-forme V-HCD (Virtual - Human Centered Design) que nous décrivons dans les sections suivantes.

6.1.4 La plate-forme V-HCD : Virtual - Human Centered Design

La plate-forme V-HCD est un ensemble d'outils visant à concevoir et tester des assistances virtuelles à la conduite, dans le cadre de la démarche de conception centrée sur l'Humain ([Bellet et al., 2019], [Deniel et al., 2019]). Ces différents outils peuvent être combinés suivant les besoins. La description qui en sera faite ici, représente une configuration particulière de cette plate-forme pour l'expérimentation qui nous concerne. Elle est composée du logiciel de simulation de capteurs et d'environnement Pro-SIVICTM, d'un système de passation expérimentale, d'un système de scénarios de conduite, d'un système d'enregistrement des données, d'un système de questionnaires et d'un système d'oculométrie.

Les prochaines sous sections en proposent une description.

6.1.4.1 Le logiciel de simulation Pro-Sivic

Le logiciel de simulation Pro-SIVICTM est produit et commercialisé par la Société ESI - Civitec avec laquelle l'IFSTTAR entretient une collaboration étroite. Historiquement développé par le LIVIC³, ce logiciel est à l'origine « *un outil de prototypage virtuel d'applications embarquées nécessitant un haut niveau de réalisme concernant la simulation des scènes routières* » [Bornard, 2012] (p.). Dédié à la simulation de capteurs et d'environnements, il a été adapté pour offrir toutes les fonctionnalités ordinaires d'un logiciel de simulation de conduite [Bornard, 2012].

A cette base logicielle, ont été ajoutés les développements additionnels que sont le système de scénarios de conduite et le système de passation expérimentale.

6.1.4.2 Le système de scénarios de conduite

Le système de scénarios de conduite a été développé dans le but de permettre la création et la gestion des situations de conduite par le logiciel de simulation. Il permet à l'expérimentateur de facilement définir l'environnement routier et les objets qu'il souhaite y intégrer (véhicules, panneaux, etc.). Il permet également, de facilement scénariser la disposition et le mouvement des véhicules qui constitueront la situation de conduite. Pour cela, l'implémentation du niveau opérationnel du modèle COSMO-DRIVE a été utilisée. Cette particularité offre la possibilité de contrôler n'importe quel véhicule sur la base d'instructions simples (e.g. se maintenir dans la voie à une vitesse donnée) et d'utiliser des commandes de haut niveau (e.g. suivre tel véhicule avec un TIV de n secondes). Le système de scénarios a ainsi pu permettre de préparer les situations de conduite que nous décrirons plus loin avec une grande précision et une grande flexibilité.

Dans notre expérimentation, chaque opportunité de décision de CDV offerte au participant était un scénario de conduite. Il en résulte, que pour les besoins de l'étude, un grand nombre de scénarios étaient nécessaires. Afin de faciliter la gestion de leur diffusion aux participants, un système de passation expérimentale a été développé.

6.1.4.3 Le système de passation expérimentale

Le système de passation expérimentale a pour but d'assurer l'ordre et la temporalité de la diffusion des scénarios de conduite, le déclenchement et l'arrêt des enregistrements, ainsi que la diffusion des questionnaires. Il repose sur le même principe que celui des scénarios de conduite et peut être vu comme un méta-scénario dont chaque étape est : un scénario de conduite, un lancement/arrêt d'enregistrement, le lancement d'un questionnaire, ou encore le lancement d'un programme particulier. L'expérimentateur supervise le passage d'une étape à une autre en appuyant sur des touches programmées dans ce but.

Le système de passation expérimentale étant en charge du déclenchement et de l'arrêt de l'enregistrement des différentes sources de données, il était interfacé avec un logiciel spécifique : RTMapsTM.

³Laboratoire sur les Interactions Véhicules-Infrastructure-Conducteurs

6.1.4.4 Le système d'enregistrement des données RTMaps

Pour assurer l'enregistrement des différentes sources de données, nous avons eu recours au logiciel RTMapsTM, qui offre la possibilité de le faire ainsi que celle d'assurer leur enregistrement dans un format unifié et horodaté, au moyen d'une horloge unique. Dans ce logiciel, les différentes sources sont représentées par des *boîtes* connectées à une *boîte* d'enregistrement et réunies dans un diagramme réutilisable. Ce procédé permet d'enregistrer les données produites par le logiciel de simulation de conduite pour les véhicules choisis (e.g. position, vitesse, TIV, flags, etc.) en même temps que les données issues de caméras placées dans le véhicule et que les données issues des lunettes d'eye tracking. Toutes les données sont enregistrées dans un fichier spécifique qui est utilisé lors du traitement des résultats. Le logiciel RTMapsTM n'est pas uniquement restreint à la possibilité de réception et d'enregistrement des données, il est également capable d'envoyer des commandes et des informations à d'autres logiciels. Cette fonctionnalité a été utilisée pour le contrôle des enregistrements de l'oculomètre.

Un tableau décrivant le détail des données enregistrées via RTMapsTM est disponible à l'annexe A (p. 257)

6.1.4.5 Le système d'oculométrie : Pupil-Labs

Pour la collecte des données oculométriques, la plate-forme V-HCD a été connectée au système Pupil-Labs. Il s'agit d'une solution d'eye tracking open source proposant un oculomètre binoculaire portatif se présentant sous la forme de lunettes. Ce matériel permet de pouvoir automatiquement créer des zones d'intérêt en disposant des marqueurs s'apparentant aux QR Codes dans l'environnement. Nous avons disposé des marqueurs au niveau des rétroviseurs interne et latéral gauche, dans le but de pouvoir rapidement identifier les regards dans ces zones d'intérêt. Le dispositif comprend un logiciel d'enregistrement des données pouvant être commandé à distance et recevoir des instructions d'horloge. Nous avons donc utilisé RTMapsTM pour piloter les enregistrements oculométriques suivant l'horloge maîtresse du diagramme d'enregistrement. Le tableau 9 (p. 119) suivant fournit un aperçu plus détaillé des données oculométriques enregistrées.

En ce qui concerne les questionnaires, ils étaient pilotés par le système de passation et diffusés sur un écran tactile spécifique.

6.1.4.6 Le système de questionnaire

La cabine 308 dispose d'un écran tactile positionné au niveau de la console *d'info-divertissement*. Cet écran a été réservé, dans notre étude, à la diffusion des questionnaires relatifs aux situations de conduite. Piloté par le système de passation, le questionnaire était lancé aux moments prévus et permettait au participant de répondre lui-même aux questions posées. Dans la plupart des cas, des échelles glissantes (*sliders*) étaient proposées, le participant fournissant sa réponse en ajustant la position du curseur selon ses souhaits.

Le tableau suivant récapitule des données de questionnaires enregistrées

Les éléments liés au simulateur de conduite ayant été présentés dans les points précédents, les sections suivantes seront dédiées à l'exposition détaillée des différentes parties du protocole expérimental. Pour chaque volet de l'expérimentation, une description des principes, des scénarios de conduite et des aspects techniques sera faite.

Source de Données	Données enregistrées
Pupil Labs Eye-tracker	- Time Stamp - Position regard X - Position regard Y - Position regard Z - Position regard X retro exterieur - Position regard Y retro exterieur - Position regard X retro interieur - Position regard Y retro interieur - Regard sur le retro exterieur - Regard sur le retro interieur - Nombre de marqueurs retro exterieur - Nombre de marqueurs retro interieur

Tableau 9 – Tableau de détail des données oculométriques enregistrées

Source de Données	Données enregistrées
Questionnaire post-situationnel	- Gap Accepté (oui / non) - Criticité de la situation (0 – 100) - Risque pris (0 – 100) - Risque volontaire (0 – 100) - Maîtrise de la situation (0 – 100) - Erreur commise (oui / non) - Difficulté de la manœuvre (0 – 100) - Acceptabilité / acceptation de l’automatisation (0 – 100) - Confiance en l’automatisation (0 – 100)

Tableau 10 – Détail des données de questionnaire post-situationnels

6.2 Volet 1 : Méthodologie pour l'analyse de la conduite manuelle

Comme indiqué dans la description générale du protocole, le premier volet de cette expérimentation vise à collecter des données relatives aux changements de voie en conduite manuelle. Pour rappel, notre objectif est de mieux comprendre comment les conducteurs prennent la décision de changer de voie en s'insérant dans un espace inter-véhiculaire, et comment ils évaluent le risque associé à ces situations, ainsi que l'acceptabilité d'un système qui devrait réaliser le CDV de façon automatisée. Nous avons établi qu'il était nécessaire de limiter la complexité des situations et d'optimiser leur maîtrise. Un choix de standardisation a donc été fait, aboutissant à la scénarisation de situations précises de conduite sur autoroute.

6.2.1 Situation de conduite

Le principe de la situation de conduite est simple. Le conducteur reçoit l'instruction de conduire à 90 *km/h* sur la voie de droite d'une autoroute en ligne droite. Devant lui, sur cette même voie, est placé au loin un poids lourd. Un important trafic composé de véhicules noirs (espacés d'un TIV variable entre 1.5 et 2.5 *s*) est mis en place sur la voie de gauche. Le conducteur est informé que parmi ces véhicules noirs, se trouvent deux véhicules blancs clairement identifiables. Une instruction est donnée au participant, de changer de voie pour se rendre sur la voie de gauche uniquement entre ces deux véhicules blancs, et seulement s'il estime la manœuvre possible. Pour cela, un espace d'une taille déterminée est créé entre les deux véhicules blancs. Le participant doit donc évaluer la faisabilité de la manœuvre de CDV et l'effectuer, s'il l'estime faisable et s'il estime qu'il aurait pris cette même décision en condition de conduite réelle. Le train de véhicules noirs (et blancs) circule à une vitesse de 110 *km/h* au moment où le CDV doit être effectué.

6.2.2 Déroulement technique des situations de conduite manuelle

Chaque scénario de conduite implique le véhicule du conducteur, un véhicule lièvre, un véhicule ouvrant le gap, un véhicule fermant le gap et des véhicules de trafic.

La convention de nommage des véhicules est la suivante :

- **Ego (E)** : Voiture conduite par le conducteur
- **Lead (L)** : Poids Lourd lièvre, dont la fonction principale est de rendre le scénario plus écologique, mais sans impact sur les décisions des participants compte tenu de son maintien à une distance lointaine.
- **Gap Opener (GO)** : Véhicule précédant / ouvrant le gap d'insertion
- **Gap Closer (GC)** : Véhicule suivant / fermant le gap d'insertion
- **Filler1 (F₁)** : Voiture de trafic 1
- **Filler2 (F₂)** : Voiture de trafic 2
- **Filler i (F_i)** : Voiture de trafic *i*
- **Etc.**

Les étapes scénaristiques du déroulement d'un scénario de conduite sont les suivantes :

1. **Étape de lancement** : Initialement, le train des véhicules positionnés sur la voie de gauche

est asservi à la vitesse du véhicule Ego. Cette étape permet de lancer la situation de conduite et d'assurer un positionnement maîtrisé des véhicules de trafic.

2. **Étape d'ouverture du gap** : une fois qu'Ego atteint 90 km/h (25 m/s) l'espace du gap s'ouvre entre Gap Opener et Gap Closer. A ce moment du scénario, les véhicules GO et GC ne sont pas visibles par le conducteur. La taille finale du gap détermine la durée de cette étape d'ouverture, ce qui engendre une durée variable des scénarios de conduite.
3. **Étape de dépassement** : Lorsque le gap est ouvert, l'ensemble des véhicules du train accélèrent pour atteindre une vitesse de 110 km/h (30.5 m/s) soit, en principe, 20 km/h de plus que le véhicule du participant.
4. **Étape d'arrivée du gap** : Le train de véhicules avançant, Gap Opener et Closer deviennent progressivement visibles et le conducteur se trouve en position de choisir ou non de s'insérer dans l'espace.
5. **Étapes alternatives** :
 - **Étape d'insertion** : Si le conducteur s'insère, la situation de conduite s'interrompt 1.5 s après que la roue arrière droite du véhicule Ego a franchi la ligne de séparation des voies de plus de 40 cm . Gap Closer n'adapte pas sa vitesse à Ego dans ce cas.
 - **Étape de non insertion** : Si le conducteur ne s'insère pas, la situation s'arrête au moment où Gap Closer a dépassé Ego de 30 m .
6. **Fin** : Lorsque la situation s'arrête, l'image se fige et reste affichée pendant toute la durée de l'étape de questionnaire qui la suit.

A chaque changement d'étape, un marqueur temporel est enregistré dans les données de simulation avec le nom de l'étape débutante.

La figure 39 (p. 121) propose une illustration de la situation de CDV.

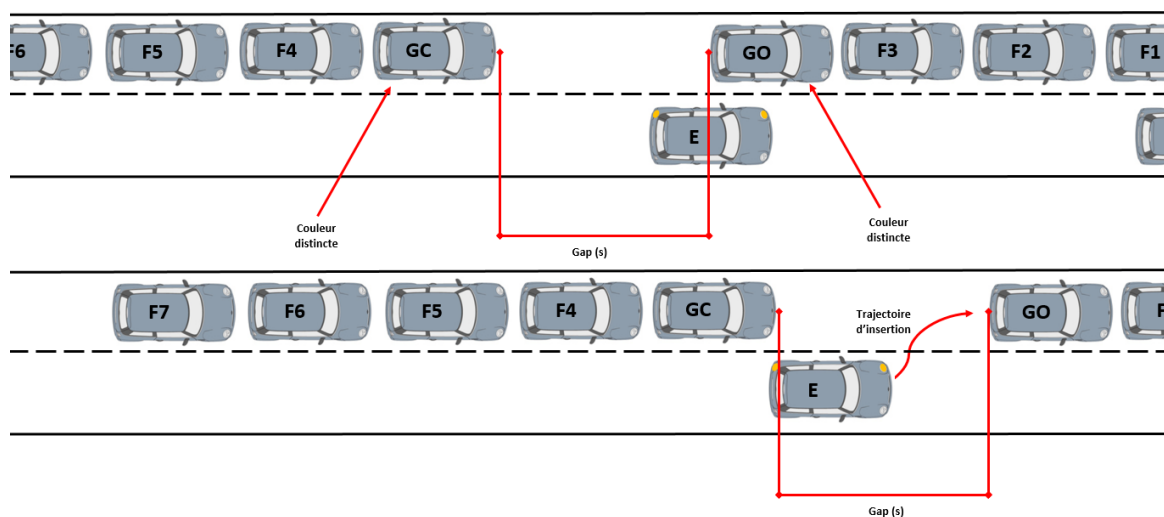


Figure 39 – Illustration de la situation de CDV

6.2.3 Questionnaire post-situationnel

À l'issue de chaque situation de conduite manuelle, le système de passation expérimentale affiche le questionnaire post-situationnel permettant de recueillir les évaluations subjectives des participants concernant leur décision, leur évaluation subjective du risque, leur auto-évaluation de la maîtrise de la situation, leurs éventuelles erreurs et enfin leur acceptabilité d'un potentiel système de CDV automatisé.

6.3 Volet 2 : Méthodologie de conception, de simulation et d'évaluation d'un système de changement de voie automatisé

Ce deuxième volet expérimental est dédié à la conception, la mise en œuvre sur simulateur et l'évaluation d'une fonctionnalité de CDV automatisé. Dans cette section du protocole, nous décrirons dans un premier temps, les pré-requis et spécifications pour la conception. Dans un second temps, nous exposerons de manière plus détaillée, les différents aspects du développement de l'algorithme de CDV automatique. Dans un troisième temps, nous détaillerons comment cet algorithme sera implanté dans le système de simulation en vue d'être évalué par les participants. Enfin, dans un dernier temps, nous décrirons la méthodologie d'évaluation de l'expérience d'utilisation de cette fonctionnalité par les participants à l'étude.

6.3.1 Conception de la fonction de CDV *Human-like*

Au cours des chapitres dédiés au CDV (cf. chapitre 3, p. 59) et à l'automatisation de la conduite (cf. chapitre 4, p. 81), nous avons pu identifier un certain nombre d'éléments nous permettant de spécifier plus précisément la manière dont doit être exécuté un CDV automatique pour qu'il s'approche de notre objectif *Human-like*. Si le premier volet expérimental est destiné à apporter des réponses aux questions scientifiques que nous avons soulevées concernant le CDV en conduite manuelle, nous pouvons tout de même nous appuyer sur ce que la littérature et les travaux antérieurs nous ont déjà apporté, pour spécifier et concevoir une fonctionnalité de CDV automatisé s'approchant autant que possible de l'existant des connaissances concernant la manœuvre de CDV exécutée par le conducteur humain.

Ainsi, nous savons d'après notre examen de la littérature sur le CDV que la durée de la manœuvre doit se situer entre 5s et 10s (cf. 3.2.2.1, p. 62); nous décidons de nous baser sur l'estimation produite par [Wang et al., 2018b] de 6s pour l'exécution du CDV. Nous devons donc concevoir notre algorithme de CDV pour qu'il exécute sa manœuvre dans un empan temporel de cet ordre.

Par ailleurs, nous savons également que certains aspects de l'ordre de séquençement des actions mises en œuvre lors d'un CDV manuel ne sont pas définis. Nous discutons ici plus précisément du séquençement des actions relatives à l'adaptation de la vitesse du véhicule (i.e. composante longitudinale) et à l'action sur le volant pour faire passer le véhicule de la voie d'origine à la voie de destination (i.e. composante latérale). Pour déterminer l'ordre des actions que notre fonctionnalité doit mettre en place pour effectuer un CDV, nous nous appuyons sur trois données principales. La première provient des travaux de [Nilsson et al., 2015] et [Nilsson et al., 2016] qui proposent un algorithme permettant d'effectuer des CDV sur autoroute. L'algorithme procède en 3 étapes :

1. Évaluer l'intérêt d'un CDV
2. Identifier un gap de CDV
3. Planifier la trajectoire :
 - (a) Gérer la dimension longitudinale du déplacement (i.e. vitesse).
 - (b) Gérer la dimension latérale du déplacement (i.e. passage de la voie d'origine à la voie de destination).
 - (c) L'ordre de gestion de ces deux aspect n'est pas absolu.

Dans notre cas, les deux premières étapes de l'algorithme ne sont pas pertinentes, car elles ne répondent pas à notre besoin (l'intérêt du CDV étant toujours présent et le gap étant toujours identifié). Ce qui

nous intéresse, dans cette proposition d'algorithme, concerne la phase de planification de la trajectoire. Ce séquençement est en accord avec celui déterminé par [Georgeon, 2008] dans le schéma de CDV *libre* qu'il définit sur la base des analyses de données acquises lors d'expérimentations en conduite réelle. Le schéma identifie ainsi une phase de décision (cf. Z1 de la figure 27, p.72) puis de préparation de la manœuvre et d'adaptation de la vitesse (cf. Z2 de la figure 27, p.72) et enfin de transition de la voie d'origine vers la voie de destination (cf. Z3a de la figure 27, p.72). Les travaux de [Mathern, 2012] ont par ailleurs montré, au travers du réseau de Petri qu'il a développé pour le CDV, que le séquençement des actions d'adaptation de la vitesse (i.e. « accélérer »), d'actionnement du clignotant et d'action sur le volant n'avaient pas d'ordre précis et qu'elles pouvaient être effectuées en parallèle (cf. figure 28, p. 73). Sur cette base, nous décidons que notre fonctionnalité de CDV automatique procédera dans un premier temps à l'adaptation de sa vitesse pour atteindre celle du trafic dans lequel le véhicule doit s'insérer, puis à l'actionnement du clignotant et enfin à l'action sur les commandes de direction pour faire passer le véhicule de la voie d'origine à la voie de destination.

Lors de la phase de déplacement latéral permettant de rejoindre la voie de destination, la trajectoire que doit emprunter notre véhicule muni de sa fonctionnalité de CDV automatique, devra également chercher à être *Human-like*. Pour cela, nous nous baserons sur les travaux déjà effectués dans le cadre du développement du modèle du conducteur COSMODRIVE qui propose l'utilisation des courbes de Bézier pour planifier la trajectoire telles que définies par [Bellet et al., 2016] et [Bellet et al., 2019](cf. figure 37, p. 93).

Concernant la position d'insertion dans le gap, ne sachant pas comment les conducteurs humain procèdent, nous pouvons nous baser sur la théorie relative à l'évaluation subjective du risque la plus conservatrice : la théorie du risque zéro ZRT. Nous avons vu précédemment que selon cette théorie, aucun CDV ne devrait être effectué par les conducteurs pour des gaps de taille inférieure à 2.4 s. Par ailleurs, du point de vue de cette théorie, la minimisation des risques suggère une insertion au centre du gap. Cette stratégie semble être la solution la plus sécuritaire. Aussi, nous l'adopterons lors de l'implémentation de notre fonctionnalité. En effet, s'insérer au centre du gap, c'est assurer un placement qui tient autant compte du risque associé au véhicule à l'avant qu'à celui associé au véhicule à l'arrière. Cet élément est d'autant plus important que, dans la mesure où le CDV sera réalisé par notre automate, il pourra être effectué avec un contrôle maximisé, y compris pour des gaps de taille inférieure aux gaps d'insertion habituels des conducteurs humains. Cette possibilité offerte par la technologie présente des avantages et des bénéfices potentiels en terme de fluidification du trafic. Encore faut-il que les utilisateurs l'acceptent. Pour ces raisons, nous prévoyons de programmer notre fonctionnalité de CDV automatisé pour qu'elle puisse procéder à un CDV au centre du gap pour tous les gaps, y compris les plus petits.

Ces éléments de spécification de la fonctionnalité à développer étant maintenant posés, nous pouvons passer au développement des solutions algorithmiques qui permettront d'y répondre et qui autoriseront son implémentation dans la plate-forme de simulation V-HCD

6.3.2 Présentation et développement de l'automate du CDV automatique pour une implémentation sur simulateur de conduite

A présent que la procédure de CDV automatisé *Human-like* est définie, la résolution de deux problèmes s'impose afin de pouvoir implémenter techniquement le CDV automatique, quelle que soit la taille du gap. Le premier concerne la phase de gestion longitudinale et le second la phase de gestion

latérale. Nous avons choisi de traiter la question en gérant la dimension longitudinale dans un premier temps, et la dimension latérale dans un second. Ainsi, pour respecter les spécifications définies plus haut, nous devons faire en sorte que le véhicule automatisé Ego commence par venir se placer au niveau du milieu du gap d'insertion à la vitesse du train de véhicule dans lequel il doit s'intégrer, tout en restant dans sa voie d'origine. Une fois dans cette position, Ego doit procéder au changement de voie en suivant une trajectoire planifiée au moyen d'une courbe de Bézier. Cette manière de procéder nous assure également une optimisation de la sécurité du CDV. En effet, au moment du passage dans la voie de destination, la vitesse du véhicule étant identique à celle des véhicules dans la voie de destination, les TTC avec GO et avec GC seront infinis, et les TIV avec GC et GO seront toujours identiques.

6.3.2.1 Gestion longitudinale

Le problème de la phase de gestion longitudinale peut être formulé de la manière suivante : compte tenu du fait qu'initialement Ego roule 20 km/h moins vite que le train de véhicule (état initial), il faut appliquer une accélération particulière à un instant précis, de sorte que celle-ci aboutisse au placement d'Ego au niveau du centre du gap à la vitesse cible de 110 km/h . Les actions qu'Ego doit effectuer sont donc dépendantes de la position du centre du gap ciblé. Nous posons donc les conventions de notation suivantes :

D : distance relative séparant le centre du gap d'Ego

Vr : vitesse relative d'Ego au centre du gap

L'objectif est donc de faire en sorte que Vr et D atteignent une valeur nulle en même temps, autrement dit, qu'Ego accélère de manière que la distance qui le sépare du point cible soit nulle au moment où sa vitesse égale celle du train de véhicules au milieu duquel il doit s'insérer : $Vr = 0 \text{ m/s}$. Les illustrations 40 (p. 125) et 41 (p. 125) illustrent le problème.

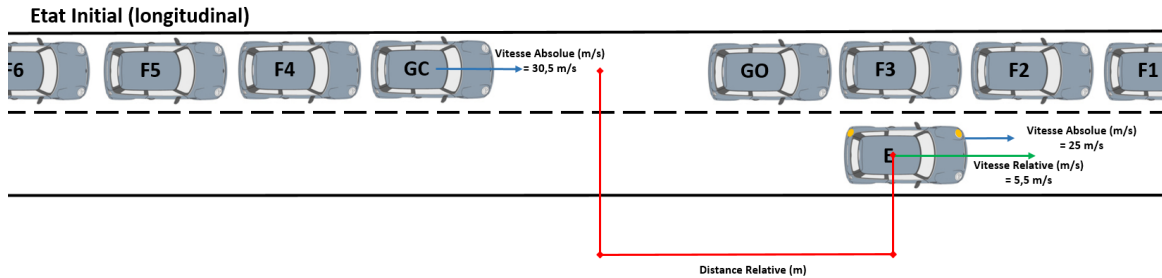


Figure 40 – CDV automatisé : État initial

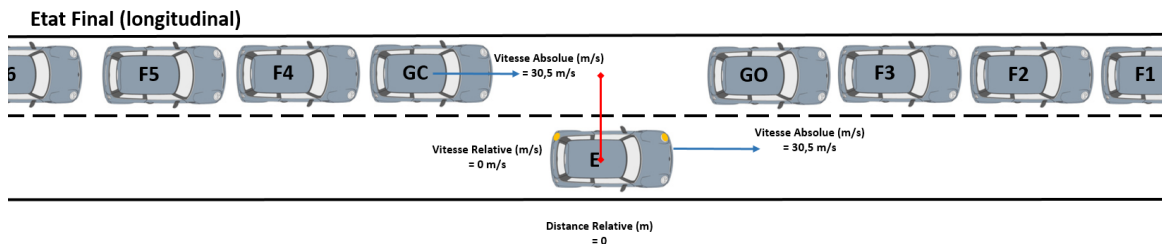


Figure 41 – CDV automatisé : État pré-insertion

Chapitre 6. Protocole Expérimental

En utilisant la formule liant la distance parcourue à l'accélération, nous obtenons :

$$D = Vr_0 \times T + \frac{1}{2} \times A \times T^2 \quad (1)$$

où :

D : distance relative à parcourir pour qu'Ego arrive au point cible à la vitesse cible

Vr_0 : vitesse relative initiale d'Ego par rapport au train de véhicule

T : temps nécessaire pour parcourir la distance

A : accélération à fournir par Ego

Par ailleurs, nous déterminons que :

$$Vr_t = A \times T + Vr_0 \quad (2)$$

où :

Vr_t : Vitesse finale relative d'Ego au train de véhicule

T : temps nécessaire pour parcourir la distance

A : accélération à fournir par Ego

Sachant que $Vr_t = 0 \text{ m/s}$ et que $Vr_0 = 5.5 \text{ m/s}$, nous obtenons :

$$A \times T + 5.5 = 0 \quad (3)$$

soit :

$$T = \frac{-5.5}{A} \quad (4)$$

Nous pouvons maintenant remplacer T dans la formule de calcul de D :

$$D = Vr_0 \times T + \frac{1}{2} \times A \times T^2 \quad (5)$$

$$= \frac{AT^2}{2} + Vr_0 \times T \quad (6)$$

$$= \frac{-15.25}{A} \quad (7)$$

En sachant A , nous pouvons donc déterminer la distance D à partir de laquelle nous devons déclencher l'accélération d'Ego pour qu'il atteigne le point cible à la vitesse cible.

Le logiciel Pro-SIVICTM simule le comportement du véhicule Ego de manière réaliste. Les informations provenant de celui-ci nous permettent de connaître la valeur de A , et donc d'appliquer la méthode exposée précédemment. L'accélération moyenne du modèle de véhicule est approximativement $A = 1.095 \text{ m/s}^2$. Dans le cadre d'un passage d'une vitesse de 25 m/s à 30.5 m/s , nous obtenons une distance de déclenchement de l'accélération $D = 13.915 \text{ m}$.

D'un point de vue pratique, le système de scénario développé dans le cadre de cette implémentation de la plate-forme V-HCD, permet de donner des consignes de vitesse aux véhicules. La consigne de vitesse fournie au véhicule Ego sera donc, dans un premier temps, d'atteindre 90 km/h puis, dans la première phase du CDV, une nouvelle consigne de vitesse de 110 km/h sera donnée, la formule précédente nous indiquant à quelle distance du point central du gap nous devons appliquer

l'accélération. Nous sommes maintenant en mesure de fournir au système de simulation de conduite, une condition permettant le déclenchement de la nouvelle consigne de vitesse à 110 *km/h*.

6.3.2.2 Gestion latérale

Nous avons à présent le moyen d'assurer que le véhicule sera au niveau du centre du gap à la vitesse cible.

Il nous faut donc définir la trajectoire qu'il devra adopter lors de la phase de déplacement latéral vers la voie de destination. Pour cela, le système de simulation propose une méthode permettant de programmer des changements de voie. Dans la mesure où il est basé sur le module opérationnel de COSMODRIVE, le véhicule est capable d'identifier la voie dans laquelle il se trouve. Afin que celui-ci change de voie, il faut alors fournir au contrôleur du véhicule cinq informations :

- a) l'identifiant de la voie de destination
- b) une consigne de vitesse à atteindre lors du CDV
- c) un temps à viser qui permettra au système de définir le point d'arrivée du CDV
- d) des valeurs d'ajustement de la courbe de Bézier
- e) des consignes pour effectuer le maintien dans la voie qui suivra immédiatement la fin du CDV

Ces valeurs permettent de contrôler plusieurs paramètres du CDV qui sera effectué. L'identifiant de la voie de destination permet d'indiquer si le CDV est effectué vers la voie de gauche ou vers la voie de droite (ce sera la voie de gauche dans notre expérimentation). La consigne de vitesse à atteindre lors du CDV permet dans notre cas d'assurer un maintien de la vitesse initiale lors du CDV. Le temps à viser permet de définir la « longueur » du CDV. Cette valeur impacte en particulier la distance qui sera parcourue sur la route pendant la durée du CDV. La vitesse étant donnée, elle impactera donc également la durée de la phase de déplacement latéral. Dans notre cas, après vérifications, le temps visé s'approche très fortement de la durée de la phase de déplacement latéral. Ce paramètre nous permet donc de contrôler la durée du CDV de sorte qu'elle respecte les 6s définies sur la base de la littérature. Les paramètres d'ajustement de la courbe de Bézier permettent quant à eux de contrôler plus finement la trajectoire, de sorte qu'elle conserve un aspect naturel et qu'elle ne subisse aucune variation d'un gap à l'autre. Nous avons ici repris ceux des travaux antérieurs évoqués à la section précédente ([Bellet et al., 2016], [Bellet et al., 2019]). Enfin, les consignes de régulation et de maintien dans la voie à l'issue du CDV offraient la possibilité de définir un TIV cible par rapport à GO à maintenir. Cette valeur de TIV nous assure par sa définition, que le véhicule se trouvera et se maintiendra bien au centre du gap à la fin du CDV.

Toutes ces dimensions sont vérifiées au moyen de tests et de mesures lors de l'implémentation des situations de conduite automatisées dans la plate-forme V-HCD.

6.3.3 Implémentation sur simulateur pour permettre une expérience utilisateur immersive de la fonction de CDV automatique

Le détail du fonctionnement de l'algorithme gérant la procédure de CDV automatisé étant établi, nous pouvons décrire le déroulement précis d'une situation de conduite gérée par cet automate, telle qu'elle est mise en place dans le simulateur V-HCD, pour faire vivre l'expérience d'utilisation aux participants. Pour chaque situation de conduite, et donc pour chaque taille de gap présentée, le contexte et la situation générale de conduite sont similaires à ceux des situations présentées lors du volet de

conduite manuelle. Ainsi, le véhicule automatisé démarre et accélère sur la voie de droite jusqu'à atteindre une vitesse de 90 Km/h. Une fois cette vitesse atteinte, un trafic composé de véhicules noirs est mis en place sur la voie de gauche à une vitesse de 110 Km/h. Au sein de ce trafic, se trouvent également 2 véhicules blancs (i.e. GO et GC), qui démarquent le gap d'insertion. Là encore, l'espace entre les 2 véhicules GO et GC est manipulé (i.e. 12 tailles possibles) et aléatorisé. À l'arrivée du gap, l'automate produit une accélération suivant l'algorithme exposé à la section précédente. À la fin de cette période d'accélération, le véhicule automatisé se trouve au niveau du centre du gap à 110 km/h. Le clignotant est alors activé dans la cabine de simulation, de sorte qu'il devienne visible et audible par le participant. Ensuite, l'automate entame le déplacement latéral du véhicule pour rejoindre la voie de destination. Lors de cette phase de la manœuvre, le volant de la cabine est contrôlé pour qu'il suive un mouvement visible dans la direction de la voie de destination, comme s'il était réellement actionné. Ce déroulement de la situation de conduite est mis en place pour chacune des 3 répétitions de chaque taille de gap. Les participants sont donc confrontés à des insertions automatiques ayant potentiellement lieu au delà de leur limite habituelle d'acceptation de CDV.

Pour évaluer l'automate, à l'issue de chaque situation de CDV, le questionnaire post-situationnel est proposé aux participants.

6.3.4 Méthodologie d'évaluation de l'acceptation de l'automate par l'utilisateur

Comme pour les situations de conduite manuelle, à la fin de chaque situation de CDV par le système automatisé, le système de passation diffuse le questionnaire post-situationnel permettant au participant de fournir ses évaluations d'acceptation du système, de maîtrise et de criticité de la situation. Ainsi, à l'image du volet 1, les évaluations se faisaient au moyen des questions suivantes :

- **Maîtrise de la situation par l'automate et jugement de faisabilité de la manœuvre manuellement** : Il s'agit, concernant ce point, de permettre au participant d'évaluer la manœuvre de CDV de l'automate, ainsi que la difficulté de la manœuvre de CDV s'ils devaient eux-mêmes l'effectuer.
 - « Auto-évaluez la maîtrise de la situation et de son risque par l'automate. » (0 - 100)
 - « À quel point cette manœuvre de CDV aurait-elle été difficile à effectuer si vous aviez dû la faire manuellement ? » (0 - 100)
- **Acceptabilité / acceptation d'une assistance à la conduite** : Il s'agit au travers de ces questions d'estimer à quel point le conducteur accepte que le CDV ait été effectué par l'automate, et à quel point il accorderait sa confiance en une telle fonctionnalité.
 - « À quel point acceptez-vous que le système de CDV effectue un CDV dans cette situation ? » (0 - 100)
 - « Auriez-vous confiance en ce système de CDV automatisé s'il se comportait ainsi sur route réelle ? » (0 - 100) (conduite autonome uniquement)
- **Criticité / Risque de la situation et du gap** : Il s'agit ici d'obtenir une information de la part du conducteur sur le risque qu'il a évalué en lien avec la manœuvre de CDV automatique.
 - « Quelle était la criticité de cette situation ? » (0 - 100)

Nous disposons maintenant d'une vision plus précise de la manière dont fonctionne l'automate, de son comportement et de la manière dont les participants vont l'évaluer. Il nous faut donc aborder le détail de la procédure mise en place pour le dernier volet de notre méthodologie.

6.4 Volet 3 : Méthodologie pour l'analyse des effets induits par l'utilisation du système de CDV automatisé

À la suite du volet de conduite avec CDV automatisé, intervient le volet de conduite manuelle *post-automatisation*. Comme indiqué dans la section dédiée au protocole général, cette phase de conduite manuelle est plus courte et ne comporte que trois situations de conduite manuelle. Celles-ci sont spécialement sélectionnées suivant les décisions et évaluations des participants, réalisées au cours du premier volet de l'étude, dans l'objectif de s'approcher du seuil de décision propre à chaque participant. Pour parvenir à identifier et programmer ces situations particulières, conformément aux analyses présentées en 4.3.3 (p. 96), le système de passation expérimentale lance, à la fin du second volet, un algorithme en charge de calculer le gap « *seuil de décision* » propre à chaque participant (sections 4.3.2, p. 96 et 4.3.3, p. 96). Le résultat de cet algorithme est alors utilisé pour présenter, dans l'ordre défini, les trois situations de conduite manuelle présentant les gaps sélectionnés. Ces situations de conduite sont également suivies du questionnaire post-situationnel, comme lors des deux précédentes phases expérimentales. Dans la sous-section suivante, nous décrivons en détail l'algorithme de détermination de la taille de gap cible ([Deniel et al., 2019]).

6.4.1 Algorithme de choix des situations de conduite post-automatisation

L'algorithme de choix du gap « *seuil* » pour chaque participant doit déterminer une valeur s'approchant de la valeur réelle supposée existante chez le participant, comme indiqué dans les sections 4.3.3 (p. 96) et 6.1.1.2 (p. 109), aux points consacrés à la problématique soulevée par la nécessité d'approximer le gap « *seuil* » de chaque personne. Le caractère fluctuant du comportement humain nous impose de concevoir l'algorithme de sorte qu'il puisse être en mesure de gérer cette variabilité. Autrement dit, l'algorithme ne doit pas nécessairement considérer la première décision positive du conducteur comme son « *seuil* » de décision. Pour appréhender cette variabilité, une méthode basée sur le principe de la fenêtre glissante est utilisée.

6.4.1.1 Algorithme à fenêtre glissante

Étape 1 : Pour chaque taille de gap, la somme des gaps acceptés est effectuée (chaque gap étant présenté 3 fois au participant). Ainsi, un gap toujours ignoré (pour les trois occurrences) aura une somme égale à 0, et un gap toujours accepté aura une somme égale à 3.

Étape 2 : Une somme sur fenêtre glissante des résultats calculés à l'étape précédente est effectuée. On additionne de cette manière le nombre de gaps acceptés pour le gap précédent (s'il existe), pour le gap courant et pour le gap suivant (s'il existe). Les premiers et derniers gaps seront des cas particuliers.

Exemple : soit les gaps 1.0 s ; 1.2 s et 1.4 s. Si le premier gap a été pris une fois, le second trois fois et le troisième 2 fois, alors la somme sur fenêtre glissante du gap 1.2 s sera $\Sigma = 1 + 3 + 2 = 6$

Étape 3 : Une sélection est effectuée en parcourant les résultats des sommes à fenêtre glissante du plus petit gap au plus grand. Les critères de sélection sont les suivants :

- le dernier gap ayant obtenu une somme $\Sigma \leq 1$ sera retenu comme borne minimale B_{min}
- *Cas particulier* : si le second plus petit gap (1.0 s) obtient déjà un score de fenêtre

glissante $\Sigma > 1$, alors B_{min} vaudra 0.8 s (plus petit gap présenté)

- le premier gap ayant obtenu une somme $\Sigma \geq 8$ sera retenu comme borne maximale B_{max}
 - *Cas particulier* : si l'avant dernier plus grand gap (2.8 s) n'obtient pas encore un score de fenêtre glissante $\Sigma \geq 8$, alors la B_{max} vaudra 3.0 s (plus grand gap présenté)

Étape 4 : La borne centrale B_{cent} sera obtenue en effectuant une moyenne de B_{min} et B_{max} . Ainsi, une valeur centrale s'approchant théoriquement de la valeur de gap « *seuil* » sera obtenue.

Étape 5 : Une fois la borne centrale obtenue, deux cas peuvent se présenter :

- a) La borne centrale correspond à une valeur de gap déjà présente dans le volet de conduite manuelle. Dans ce cas, cette valeur sera conservée comme premier gap présenté dans ce troisième volet expérimental.
- b) La borne centrale ne correspond à aucun gap présenté lors du volet de conduite manuelle, du fait de sa situation entre 2 valeurs de gap (e.g. 1.3 s), dans ce cas, *l'algorithme de criticité moyenne* est exécuté.

6.4.1.2 Algorithme de criticité moyenne

L'algorithme de criticité moyenne est un algorithme utilisant les réponses du participant aux questions post-situationnelles, pour déterminer quel est le gap « *seuil de décision* » recherché pour le participant, dans les cas où la valeur de borne centrale B_{cent} ne correspond à aucune taille de gap définie dans le protocole. Les étapes de cet algorithme sont les suivantes :

Étape 1 : Calcul de la valeur moyenne de criticité fournie par le participant pour chaque taille de gap lors du premier volet de l'expérimentation (conduite manuelle).

Étape 2 : Détermination du gap à présenter selon les cas suivants :

Cas 1 : Si $Crit_{moyB_{cent}-0.1s} \geq 50$ ET $Crit_{moyB_{cent}+0.1s} \geq 50$

Alors $Taille_{gap} = B_{cent} + 0.1 s$

Cas 2 : Si $Crit_{moyB_{cent}-0.1s} < 50$ ET $Crit_{moyB_{cent}+0.1s} < 50$

Alors $Taille_{gap} = B_{cent} - 0.1 s$

Cas 3 : Si $Crit_{moyB_{cent}-0.1s} \geq 50$ ET $Crit_{moyB_{cent}+0.1s} < 50$

Alors $Taille_{gap} = B_{cent} - 0.1 s$

Cas 4 : Si $Crit_{moyB_{cent}-0.1s} < 50$ ET $Crit_{moyB_{cent}+0.1s} \geq 50$

Alors $Taille_{gap} = B_{cent} + 0.1 s$

6.4.2 Situations présentées

Cet algorithme permet donc d'estimer le gap « *seuil de décision* » du participant. Ce gap sera le premier qui lui sera présenté lors de ce troisième volet. Le second sera le gap de la taille immédiatement supérieure dans l'échelle des gaps expérimentaux ($Gap_{seuil} + 0.2 s$). Enfin, le troisième gap présenté sera celui de taille immédiatement inférieure au gap « *seuil* » ($Gap_{seuil} - 0.2 s$). De cette manière, nous pouvons estimer l'impact de la phase de conduite avec l'automate, sur les décisions et évaluations de chaque participant au niveau de son seuil de décision calculé, mais aussi sur les gaps entourant ce seuil. Cet ultime volet expérimental possède donc la particularité d'être adapté au participant. En ce sens, le protocole expérimental peut être qualifié d'adaptatif ou de dynamique [Deniel et al., 2019]. À la fin de chaque situation présentée dans ce volet expérimental, le participant répond, là encore, au questionnaire post-situationnel.

6.4.2.1 Illustration du fonctionnement de l'algorithme

Illustrons le fonctionnement de l'algorithme au moyen d'un exemple fictif. Le tableau 11 (p. 131) fournit pour chaque taille de gap : le nombre de fois où chaque gap a été accepté par le participant, la criticité moyenne évaluée, le score calculé par l'algorithme à fenêtre glissante et la localisation des bornes B_{min} et B_{max} .

Exemple				
Taille du Gap (s)	Nombre de gaps pris	Criticité	Score fenêtre glissante	Bornes
0.8	0	100		
1.0	0	100	0	
1.2	0	90	0	
1.4	0	75	1	Bmin
1.6	1	50	3	
1.8	2	40	6	
2.0	3	20	8	Bmax
2.2	3	10	9	
2.4	3	0	9	
2.6	3	0	9	
2.8	3	0	9	
3.0	3	0		

Tableau 11 – Exemple de données fictives pour l'algorithme à fenêtre glissante

Les bornes sont donc : $B_{min} = 1.4$ s, $B_{max} = 2.0$ s et $B_{cent} = 1.7$ s, nous sommes dans le cas de figure où la valeur de B_{cent} ne correspond à aucun gap effectivement présenté. L'algorithme de criticité moyenne doit donc être employé afin de déterminer la bonne valeur de B_{cent} . Les gaps encadrant B_{cent} sont 1.6 s et 1.8 s. Pour ce participant imaginaire, le gap 1.6 s a une valeur de criticité moyenne de 50 et le gap 1.8 s a une valeur de criticité moyenne de 40, ce qui correspond au *cas 3* de l'algorithme de criticité moyenne. La valeur du gap seuil pour l'expérimentation sera donc $B_{cent} = 1.6$ s. Dans le troisième volet de l'expérimentation, les gaps présentés à ce participant seront donc 1.6 s puis 1.8 s et enfin 1.4 s.

6.5 Déroulement d'une passation et instructions aux participants

Le protocole est dorénavant établi dans les détails, à l'exception de la description de son déroulement. La durée totale de la passation oscille entre quatre et cinq heures, cette variabilité étant liée aux temps mis par les participants pour répondre aux questionnaires, pour réaliser les entraînements, et fonction des durées des pauses effectuées.

6.5.1 Consentement, informations générales et questionnaires généraux

Avant chaque passation, le participant est invité à signer un formulaire de consentement après avoir lu une fiche d'informations sur l'étude. Avant de s'installer dans le simulateur, il reçoit également une information sur la conduite en simulateur et ses éventuels effets secondaires (i.e. mal du simulateur), puis prend place dans la cabine de simulation et effectue les réglages du poste de conduite. L'écran tactile d'info-divertissement propose alors les questionnaires généraux sur l'expérience du conducteur ainsi que sur ses attitudes envers les véhicules autonomes et leur acceptabilité. Une fois ces questionnaires terminés, l'expérimentateur procède à l'installation et à la calibration des lunettes d'oculométrie.

6.5.2 Entraînements et consignes

Vient ensuite la phase d'entraînement à la conduite. Généralement divisée en 5 situations d'entraînement, cette phase ne comporte pas de durée précise.

6.5.2.1 Premier entraînement

Pour la première situation d'entraînement, le conducteur reçoit simplement l'instruction de conduire comme bon lui semble, sur la portion d'autoroute où se dérouleront les situations expérimentales. L'expérimentateur incite tout de même le participant à effectuer des changements de voie et à modifier régulièrement sa vitesse. Le but de cet entraînement est de permettre au participant de prendre en main le véhicule et de se sentir à l'aise avec la direction et les comportements d'accélération et de freinage du véhicule. L'expérimentateur porte une attention particulière au fait que le participant ne souffre pas du mal du simulateur et reste en interaction régulière avec lui afin d'estimer son niveau d'aisance avec la conduite du véhicule simulé. Lorsque le participant indique avoir le sentiment de maîtriser correctement le simulateur, une nouvelle situation d'entraînement est lancée.

6.5.2.2 Second entraînement

Cette situation introduit au participant les consignes principales de la tâche à effectuer pour les situations de CDV. Pour ce premier entraînement au CDV, le gap proposé est de 3.0 s. Les instructions fournies par l'expérimentateur indiquent au participant qu'il doit accélérer jusqu'à atteindre la vitesse de 90 km/h, en restant sur la voie de droite de l'autoroute. On lui indique ensuite qu'il doit se maintenir à cette vitesse et se laisser dépasser par les véhicules noirs du trafic. Les véhicules blancs (GO et GC) lui sont présentés et on lui explique alors, que la décision concernant l'éventuelle prise de gap ne doit être faite que pour ces véhicules identifiés. L'expérimentateur insiste auprès du participant quant au fait que la prise de gap n'est pas une obligation, mais simplement une opportunité qu'il peut éventuellement saisir, s'il estime qu'il la saisirait sur route réelle. Afin de crédibiliser la situation, l'expérimentateur indique au participant que les deux voies de l'autoroute sur laquelle il se trouve vont se séparer dans quelques temps, et que la direction qu'il doit suivre implique qu'il se situe sur la voie de gauche au moment de la bifurcation. Cette consigne permet au conducteur d'intégrer la situation au niveau stratégique et donc de mieux comprendre la nature non obligatoire du CDV. Une précision est ajoutée concernant la consigne de vitesse. En effet, si la consigne de vitesse est de 90 km/h pour la mise en place de la situation de conduite, la vitesse des véhicules dans la voie de destination est telle que, pour correctement effectuer le CDV, le participant doit accélérer. Aussi, il est explicitement indiqué

au participant que les 90 *km/h* ne sont pas une limite et que s'il le juge nécessaire, il peut adapter sa vitesse en accélérant ou en ralentissant pour effectuer le CDV. De cette manière, le participant ne se sent pas limité par une éventuelle possibilité d'infraction.

6.5.2.3 Troisième entraînement

Une fois cette seconde situation d'entraînement effectuée, l'expérimentateur en propose une nouvelle au participant. Cette fois, l'espace d'insertion est de 2.5 *s*. Comme pour le précédent entraînement, le participant est invité à conduire et les consignes lui sont répétées. L'expérimentateur apporte des instructions complémentaires au participant en cas de besoin, et répond à ses éventuelles questions concernant la tâche à effectuer. A l'issue de cet entraînement, le questionnaire post-situationnel est proposé au participant. Chaque question lui est exposée et expliquée. La manière de fournir la réponse, via l'écran tactile, est expliquée, et le participant est alors invité à répondre pour se familiariser avec le système de passation des questionnaires. Une nouvelle fois, l'expérimentateur répond aux éventuelles questions du participant. Il peut arriver que le participant pose une question dont la réponse compromet le protocole (e.g. « quelle est la vitesse des véhicules sur la voie de gauche ? »). Dans ce cas, l'expérimentateur indique au participant qu'il ne peut répondre à sa question, car dans une situation réelle, cette information ne serait pas disponible (e.g. dans une situation réelle de CDV, nous ne connaissons pas la vitesse exacte des véhicules du trafic environnant). L'expérimentateur ajoute qu'il répondra à cette question à l'issue de la passation.

6.5.2.4 Quatrième entraînement

Une quatrième situation d'entraînement est alors proposée au participant, identique aux deux entraînements précédents, mais avec la particularité de proposer un gap de 0.5 *s*, impossible à prendre. Cette situation, systématiquement refusée, permet aux participants de prendre connaissance de l'interprétation des questions, en cas de refus de prise de gap.

6.5.2.5 Cinquième entraînement

Une cinquième et dernière situation de conduite est présentée au participant pour achever l'entraînement. Cette situation particulière vise à permettre au conducteur de connaître les réactions du simulateur en cas de collision. Dans cette expérimentation, les collisions sont possibles, un véhicule percutant Ego le poussera simplement et il en sera de même si Ego percute un véhicule. Cet entraînement permet au participant de ne pas subir de traumatisme trop impactant s'il vit une collision pendant les phases expérimentales. Une fois ces entraînements achevés, une pause est proposée au participant avant d'entamer le premier volet expérimental. En règle générale, à l'issue de cet entraînement, les participants avaient conduit sur le simulateur pendant une durée supérieure à 25 minutes⁴.

6.5.3 Volet 1 : Conduite manuelle

Ce volet expérimental ayant déjà été décrit dans une section précédente (section 6.2, p. 120), nous rappelons simplement ici, qu'il comporte 36 situations de conduite constituées de 3 répétitions de

⁴en incluant les temps d'explications, de consignes et d'entraînement aux réponses aux questions, la durée totale de l'entraînement oscillait entre 40 et 50 minutes.

chacun des 12 espaces définis et ordonnés aléatoirement. Une attention particulière a été portée afin d'éviter que des ordres immédiatement croissants se succèdent sur plus de 3 situations. De plus, dans le but d'éviter une trop forte impression de difficulté de la tâche, à l'entrée dans le protocole, les premières situations ne peuvent contenir de très petits espaces. Chaque situation de conduite suivie des questions post-situationnelles dure environ trois minutes. Les recommandations de circulation sur les autoroutes françaises suggèrent une pause toutes les deux heures. Nos situations étant particulièrement répétitives, nous proposons au participant une pause toute les heures, et imposons celle-ci toutes les deux heures en cas de pause horaire refusée. Les pauses sont également accordées à la demande du participant.

6.5.4 Volet 2 : Utilisation du système de changement de voie automatisé

Avant de débiter les situations de conduite automatisée, une explication du système d'automatisation est fournie au participant. L'expérimentateur indique au conducteur que, pour ce volet expérimental, un automate sera en charge de gérer la conduite et de prendre les décisions de CDV. Nous fournissons au participant des consignes stipulant que l'automate est capable de détecter les véhicules blancs dans l'environnement et de décider si le CDV est réalisable ou non. Si l'automate estime que le CDV est possible, alors il l'exécute (bien qu'en réalité nous sachions que l'automate s'insérera dans tous les gaps, nous n'en informons pas le volontaire). Le participant reçoit l'instruction de simplement regarder ce qu'effectue l'automate, puis de répondre aux questions d'évaluation post-situationnelles. Afin de le familiariser avec le comportement du véhicule automatisé, une unique situation d'entraînement est mise en place. Cet entraînement offre aussi l'occasion de présenter au participant les questions post-situationnelles (adaptées au fait que la conduite est gérée par l'automate). Comme pour le volet de conduite manuelle, les 12 tailles de gaps sont présentées trois fois au participant dans un ordre aléatorisé, soit un total de 36 situations de CDV automatisé. La conduite automatisée pouvant être plus fastidieuse pour le participant, une pause est proposée toutes les demi-heures, et imposée toute les heures.

6.5.5 Volet 3 : Conduite manuelle après utilisation du système d'automatisation du changement de voie

Une fois le volet 2 achevé, le participant est invité à effectuer les trois situations de conduite manuelle déterminées par l'algorithme de sélection du gap « *seuil de décision* » (cf.6.4.1, p. 129). Ses réponses sont enregistrées et mises à part pour pouvoir être comparées aux situations identiques enregistrées lors du premier volet.

6.5.6 Entretien de fin d'expérimentation

A l'issue du dernier volet expérimental, le participant est invité à une discussion informelle à propos du déroulement de l'expérimentation. Le but de cette discussion est, dans un premier temps, de poser deux ultimes questions au participant. La première porte sur le nombre de tailles de gap différents auxquels le participant pense avoir été confronté. La seconde vise à demander au participant s'il estime avoir été influencé lors de ce dernier volet expérimental par la manière dont l'automatisation procédait pour changer de voie. Lors de cette discussion, le participant est également invité à fournir ses impressions et sentiments à propos de l'automate qu'il a utilisé, mais aussi plus généralement, à propos de l'expérimentation. Enfin, l'expérimentateur répond aux éventuelles questions, y compris

celles pour lesquelles la réponse n'était pas possible au cours des phases d'entraînement.

Troisième partie

Résultats

Résultats

7.1 Description générale des données

Notre expérimentation réalisée, nous disposons désormais de données collectées que nous allons soumettre à l'analyse. Nous procédons, dans un premier temps, à une description générale des données recueillies puis nous analysons successivement les résultats, pour nos trois volets expérimentaux. Nous procéderons ensuite à une analyse croisée de certains résultats liant ces différents volets.

7.1.1 Préambule aux analyses

Les analyses que nous exposons sont nombreuses. Certaines concernent l'ensemble des données brutes recueillies, tandis que d'autres sont effectuées sur des sous-ensembles des données brutes, ou encore sur des ensembles d'indicateurs calculés sur la base des données brutes. Des indications sur les données utilisées seront fournies pour chaque analyse particulière, et des représentations graphiques associées afin de faciliter la lecture des résultats.

Pour chaque analyse exposée, un rappel de la question de recherche particulière est effectué ainsi que de l'hypothèse, quand elle existe.

Les représentations graphiques ont été choisies pour illustrer les résultats ou permettre au lecteur de disposer d'un support de visualisation des données. Dans certains cas, des couleurs sont utilisées. Si le graphique ne dispose pas d'une légende spécifique décrivant les couleurs, trois cas de figure existent : le graphique compare deux modes de conduite (i.e. manuel, autonome), le graphique présente des TIV, le graphique ne compare ni deux modes de conduite, ni ne présente de TIV. Dans le premier cas, la couleur bleue sera toujours associée à la conduite manuelle (i.e. volet 1), la couleur associée à la conduite autonome sera quant à elle rose ou ocre. Dans le second cas (i.e. graphiques présentant des TIV), les couleurs utilisées renvoient aux couleurs utilisées lors des illustrations des zones enveloppes. Ainsi, la couleur verte indiquera la zone de sécurité, la jaune la zone de menace, et la rouge la zone de danger (c.f. figure 5 p. 25). Enfin, pour certains graphiques en boîte à moustache, la valeur de la moyenne a été ajoutée sous la forme d'un trait pointillé vert ou d'un point rouge.

Les analyses effectuées et les graphiques présentés ont été produits avec le langage Python et/ou le langage R.

7.1.2 Méthodes statistiques employées

Pour la plupart des résultats qui seront présentés dans les sous-sections suivantes, les méthodes statistiques employées tiennent compte du fait que les données sont issues de mesures répétées pour les mêmes participants entre les différentes conditions expérimentales. De plus, compte tenu du fait que les évaluations subjectives des participants étaient fournies sur des échelles allant de 0 à 100, et que la répartition des réponses atteignait régulièrement les bornes minimales et maximales des

échelles, les données ne peuvent pas toujours suivre une distribution normale. Cette contrainte nous a conduits à procéder à des analyses statistiques basées sur l'estimation d'un modèle linéaire généralisé mixte, de type binomial (GLMM) [Bolker et al., 2008], [Harrison et al., 2018]¹. Dans chaque cas, les modèles mixtes ont été estimés² et un test de surdispersion a été effectué au moyen de la fonction proposée par Bolker³. En cas de surdispersion, un nouveau modèle quasi-binomial a été estimé⁴. Les tests d'hypothèses effectués sur ces modèles sont des χ^2 de Wald⁵. Les coefficients pseudo- R^2 ont également été calculés dans le but d'estimer la variance expliquée par les prédicteurs fixes⁶. Les modèles GLMM ne se prêtant pas au calcul de coefficient de corrélation, nous ne fournissons pas cet indicateur lorsque ce type de modèle est estimé. Enfin, la puissance des tests a été estimée au moyen d'un test adapté à cette typologie de modèles [Green and MacLeod, 2016], [Brysbaert and Stevens, 2018]⁷. Lors du calcul des puissances, le seuil α était fixé suivant le niveau de significativité obtenu (ainsi, pour un test dont le résultat est significatif au seuil $p < .05$, ce même seuil est choisi pour le test de puissance).

Dans les autres cas, des modèles linéaires mixtes ont été estimés [Koerner and Zhang, 2017]⁸. Les coefficients pseudo- R^2 ont également été calculés suivant cette contrainte [Chang and Lane, 2016]⁹. Ce type de modèles pouvant permettre le calcul d'une corrélation, une fonction de calcul de coefficient de corrélation pour mesures répétées a été utilisée [Bakdash and Marusich, 2017]¹⁰ et les tests d'hypothèses ont été effectués au moyen de la même fonction que pour les GLMM.

7.1.3 Note concernant les données d'oculométrie

Comme indiqué dans les sections, 6.1.2.2 (p. 111) et 6.1.4.5 (p. 118) du chapitre 6, nous avons procédé à la collecte des données oculométriques au moyen d'un eye tracker. Malheureusement, nous n'avons pu procéder au traitement de ces données, en raison d'une incertitude trop forte à propos de leur qualité. Compte tenu de la quantité de données, un recodage manuel n'a pu être effectué.

7.1.4 Participants

Dans cette section nous décrivons les caractéristiques générales de l'échantillon des conducteurs s'étant portés volontaires pour participer à l'étude. Lorsque des sous-groupes de participants seront créés, la description de ces sous-ensembles sera associée à la section de l'analyse portant sur ces groupes.

7.1.4.1 Nombre de participants

Un total de 33 conducteurs volontaires ont pris part à l'expérimentation. Trois d'entre eux ont souffert du mal du simulateur et n'ont pas pu effectuer la totalité de l'expérimentation. Un autre participant n'a pas pu compléter la totalité de l'expérimentation, en raison d'un incident technique

¹<https://statistique-et-logiciel-r.com/introduction-aux-glmm-avec-donnees-de-proportion/>

²Fonction `glmer()` du package `lme4` pour le langage R

³<https://bbolker.github.io/mixedmodels-misc/glmmFAQ.html#overdispersion>

⁴Fonction `glmmPQL()` du package `MASS` pour le langage R

⁵Fonction `Anova()` du package `car` pour le langage R

⁶Fonction `r2beta()` du package `r2glmm` pour le langage R

⁷Fonction `powerSim()` du package `simr` pour le langage R

⁸Fonction `lmer` du package `lme4` pour le langage R

⁹Fonction `r.squaredGLMM` du package `MuMIn` pour le langage R

¹⁰Fonction `rmcorr` du package `rmcorr` pour le langage R

majeur. Les données de ces quatre participants ont donc été exclues d'emblée. Parmi les 29 participants restants, on dénombre 13 femmes et 16 hommes. Il a pu arriver, dans certains cas, que les enregistrements n'aient pas correctement fonctionné pour toutes les sources de données. Il est donc possible que certaines analyses ne portent pas sur 29 participants mais sur un nombre plus restreint d'entre eux (19 au minimum). Ces cas seront indiqués en préambule des analyses concernées.

7.1.4.2 Distribution des âges

La distribution de l'âge des participants est détaillée dans le tableau 12 (p. 141). On notera que l'âge moyen est de 32 *ans*, la médiane de 29 *ans* et l'écart type d'environ 12 *ans*. Le participant le plus jeune avait 18 *ans* et le plus âgé, 63 *ans*.

	Min	Q1	Médiane	Q3	Max	Moyenne	Écart-type	Nb
Âge	18	24	29	35	63	32.65	11.98	29

Tableau 12 – Distribution de l'âge des participants

Nous constatons que la distribution de l'âge des participants est plutôt centrée entre 25 et 35 ans et que quelques participants de plus de 50 ans élèvent légèrement la moyenne d'âge. Notre distribution ne semble que partiellement normale, nous devons en tenir compte lors de l'interprétation des résultats.

7.1.4.3 Distribution de l'expérience des participants

L'expérience des participants est ici décrite, suivant deux indicateurs : le nombre d'années depuis l'obtention du permis de conduire et le nombre de kilomètres annuellement parcourus.

Le tableau 13 (p. 141) présente les indicateurs décrivant la distribution des participants suivant ces deux critères.

	Min	Q1	Médiane	Q3	Max	Moyenne	Écart-type	Nb
Expérience (an)	0	3	7	18	44	12.59	12.28	29
Km par an	12	4000	10000	20000	50000	14060.76	12326.10	29

Tableau 13 – Distribution de l'expérience des participants en années d'expérience et en nombre de kilomètres par an

Les caractéristiques générales de la distribution des participants indiquent donc que notre échantillon semble plutôt centré entre 25 et 35 ans avec une légère tendance à la sur-représentation des conducteurs modérément expérimentés, quelque peu compensée par la présence de quelques conducteurs plus âgés et plus expérimentés.

7.1.4.4 Réponses au questionnaire d'acceptabilité générale des voitures autonomes

Afin de mieux caractériser l'échantillon de participants ayant pris part à l'expérimentation en terme de rapport à priori au véhicule autonome (VA) et à l'automatisation de la conduite, nous avons

recueilli leurs réponses au questionnaire issu de [Distler et al., 2018] et adapté pour notre étude (cf. 6.1.2.4 p. 113 et annexe B p. 259) .

Au sein de ce questionnaire, trois questions concernaient plus particulièrement la thématique de notre étude. Il s’agissait des questions :

- « *Je pense que les voitures autonomes seraient plus sûres que la manière dont je me déplace actuellement* »
- « *Je pense que j’aurais une grande confiance en une voiture autonome* »
- « *Utiliser une voiture autonome pourrait être une source d’inquiétude ou de risque pour moi* »

En effet, ces trois questions nous apportent une information sur les questions de risque, de confiance et de sécurité à propos des véhicule autonome. Ces trois notions sont en lien direct avec notre questionnement scientifique à propos de l’évaluation subjective du risque et de l’acceptabilité / acceptation d’une assistance automatisant le changement de voie. Lorsqu’il répondait à ce questionnaire, le participant devait fournir une valeur de réponse entre 0 et 10 (0 : pas du tout d’accord ; 10 : totalement d’accord). Le tableau 14 (p. 142) produit les statistiques descriptives des réponses fournies pour ces trois questions.

Statistiques descriptives

	Min	Q1	Médiane	Q3	Max	Moyenne	Écart-type	Nb
VA plus sûres	0	3	6	9	10	5.76	3.54	29
Confiance VA	0	3	5	7	10	4.72	2.82	29
Inquiétude	0	2	5	7	10	4.69	2.97	29

Tableau 14 – statistiques descriptives des réponses fournies pour les trois questions d’intérêt du questionnaire général d’acceptabilité a priori (cf. annexe B, p. 259)

Nous notons que de manière générale, les données sont distribuées autour d’une valeur moyenne proche de 5, et obtiennent toutes au moins une réponse maximale de 10 et une réponse minimale de 0. Cette distribution des réponses sera analysée plus en détail, dans la section 7.3.6.2 p. 187 qui lui est dédiée, au sein de la partie de ce chapitre consacrée aux résultats du volet expérimental de conduite automatisée.

7.2 Volet 1 : Résultats concernant les changements de voie en conduite manuelle

Cette section est dédiée aux principaux résultats obtenus à partir des données issues du premier volet de l'expérimentation. Nous présentons d'abord les données concernant les décisions de changement de voie. Nous nous intéressons dans un second temps aux réponses des participants aux questionnaires post-situationnels, en particulier aux données relatives aux évaluations de criticité. Dans un troisième temps, nous présenterons les données relatives à la position d'insertion dans l'espace de CDV et à leur lien avec les scores de criticité. Dans un dernier temps, nous nous consacrerons aux résultats portant sur l'acceptabilité d'une assistance automatisant le changement de voie.

7.2.1 Décisions de changement de voie

7.2.1.1 Rappel des hypothèses

Nous avons formulé une première partie de nos hypothèses concernant les décisions dans le tableau 3 (p. 78) de la partie 3.4.3 (p. 76) du chapitre 3 (que nous reproduisons ici). Nous avons ainsi établi, en nous basant sur les ZE, que suivant la théorie du risque zéro (ZRT), les gaps de taille inférieure à 1.4 s devraient être refusés, sauf erreur. Suivant la théorie de l'homéostasie du risque (RHT), ces gaps peuvent éventuellement être acceptés, mais avec une prise de risque délibérée. Pour les gaps compris entre 1.6 s et 2.4 s, la ZRT postule un refus probable de changement de voie et un risque élevé estimé, tandis que la RHT postule une acceptation probable, associée à un risque moyen ou une prise de risque volontaire. Enfin, pour les gaps de taille supérieure à 2.4 s, les deux théories prédisent une décision de CDV sans risque subjectif élevé.

Prévisions potentielles			
Taille du Gap (s)	Conflits de ZE	Risque Zéro [Summala, 1988]	Homéostasie du risque [Wilde, 1982]
$gap < 1.4$		Refus - Risque élevé	Refus - Risque élevé / Acceptation éventuelle - prise de risque
$1.6 \leq gap \leq 2.4$		Refus - Risque élevé	Acceptation probable - Risque moyen - prise de risque
$2.4 < gap$		Acceptation - Risque nul	Acceptation - Risque nul

Tableau 15 – Tableau de prédictions potentielles concernant les décisions et évaluations du risque suivant la taille des gaps

7.2.1.2 Décisions positives, négatives et erreurs

Pour chaque situation de conduite de chaque participant, la décision de changement de voie était enregistrée. Nous nous intéressons dans un premier temps au nombre de décisions prises pour tous les

Chapitre 7. Résultats

participants pour chaque taille de gap. Toutefois, les données brutes ne sont pas exploitables comme telles. En effet, dans certains cas, la décision prise peut être la résultante d’une erreur. Nous ne pouvons ignorer cet élément qui conduirait à mettre au même niveau des décisions qui n’ont que l’apparence d’être identiques. Comme nous l’avons déjà indiqué au point 6.1.2.3 (p. 111), plusieurs types d’erreurs peuvent être identifiées suivant qu’elles concernent un changement de voie effectué ou un changement de voie refusé. Dans tous les cas, il s’agit d’erreurs rapportées par le participant lui-même. Les données brutes de décision de changement de voie sont donc mises en relation avec les erreurs rapportées, ce qui a permis d’établir quatre cas de décision. Le tableau 16 (p. 144) les détaille et indique leur convention de nommage dans les résultats traités.

Décision / Erreur	Catégorie	Convention
Gap Non Pris / Pas d’erreur	Refusé à raison	[d] not taken
Gap Pris / Pas d’erreur	Pris à raison	[a] taken
Gap Non Pris / Erreur	Refusé à tort	[c] not taken but should have been
Gap Pris / Erreur	Pris à tort	[b] should not have been taken

Tableau 16 – Détail des différents types de décisions

Cette convention établie, nous pouvons produire le diagramme en barres empilées 42 (p. 144), représentant les données converties en pourcentages.

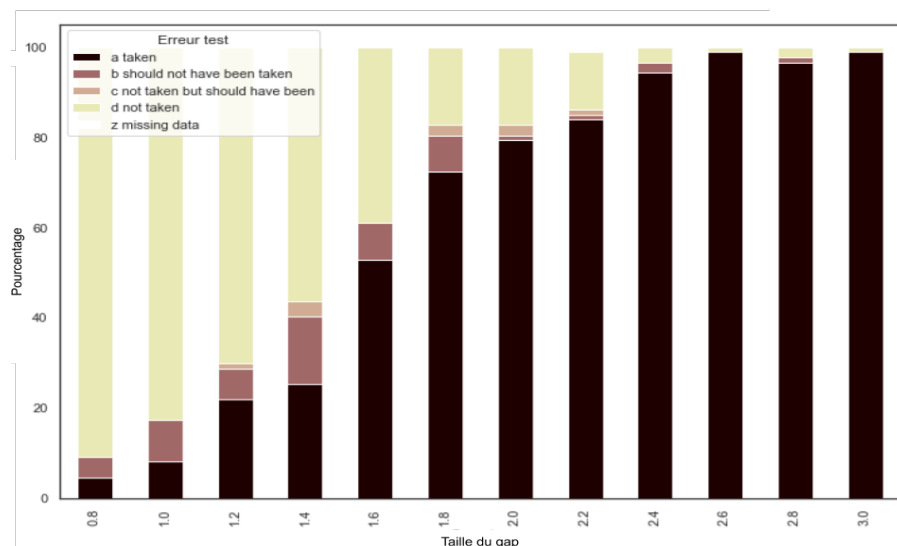


Figure 42 – Distribution des pourcentages des prises de gaps et des erreurs

Les tableaux suivants retranscrivent les pourcentages compilés dans le diagramme en séparant chaque cas référencé dans le tableau 16 (p. 144). Nous séparons les cas sans erreurs des cas d’erreurs.

Sans Erreurs				
Taille du Gap (s)	[a] Gaps Pris		[d] Gaps Refusés	
	Nombre brut	Pourcentage	Nombre brut	Pourcentage
0.8	4	4.59 %	79	90.80 %
1.0	7	8.04 %	72	82.76 %
1.2	19	21.84 %	61	70.11 %
1.4	22	25.29 %	49	56.32 %
1.6	46	52.87 %	34	39.08 %
1.8	63	72.41 %	15	17.24 %
2.0	69	79.31 %	15	17.24 %
2.2	73	83.91 %	11	12.64 %
2.4	82	94.25 %	3	3.45 %
2.6	86	98.85 %	1	1.15 %
2.8	84	96.55 %	2	2.30 %
3.0	86	98.85 %	1	1.15 %

Tableau 17 – Répartition des gaps pris et refusés sans erreur

7.2.1.3 Gaps pris et refusés sans erreur rapportée

Comme l'indiquent le graphique 42 (p. 144) et le tableau 17 (p. 145), il semble exister une relation forte entre la taille des gaps et la décision d'accepter ou de refuser le changement de voie. Si nous reprenons plus en détail nos hypothèses, nous pouvons procéder à l'examen des trois plages de gaps évoquées dans le tableau des hypothèses. Nous constatons alors que certaines prédictions ne sont pas parfaitement vérifiées. En effet, si les gaps de taille supérieure ou égale à 2.4 s sont acceptés à plus de 98%, certains espaces de tailles inférieures (i.e. 2.0 s, 2.2 s) sont également très souvent acceptés (i.e. près de 80% de décisions de CDV). Lorsque nous examinons les gaps de taille inférieure à 1.4 s, nous constatons également que, bien qu'ils soient beaucoup moins acceptés, le gap de 1.2 s est tout de même accepté sans erreur rapportée dans environ 20 % des cas. Les suppositions basées sur la ZRT sont ici particulièrement mises en défaut. Nous pouvons également constater que les gaps de 1.2 s et 2.0 s sont respectivement, très proches de 20 % et 80 % d'acceptation. Nous reviendrons sur ce constat ultérieurement au cours de nos analyses. Enfin, nous pouvons noter que les espaces de taille 1.0 s ou inférieurs sont refusés dans plus de 80 % des cas. Avant d'aller plus en détail sur l'exploration des liens entre la taille des gaps et les décisions de changement de voie, regardons les pourcentages et la répartition des erreurs rapportées.

7.2.1.4 Les gaps pris et refusés par erreur

Le tableau suivant répertorie les erreurs et leurs proportions respectives (en pourcentage) sur le nombre total d'espaces présentés aux conducteurs 18 (p. 146).

Les gaps pris par erreur représentent 84.75 % du nombre total d'erreurs rapportées. Nous commencerons donc par cette catégorie d'erreurs. Au total, toutes tailles de gap confondues, 50 erreurs de ce type ont été rapportées par les participants, ce qui représente une faible proportion des 691

Avec Erreurs				
Taille du Gap (s)	[a] Gaps Pris par erreur		[d] Gaps Refusés par erreur	
	Nombre brut	Pourcentage	Nombre brut	Pourcentage
0.8	4	4.60 %	0	0.0 %
1.0	8	9.20 %	0	0.0 %
1.2	6	6.90 %	1	1.15 %
1.4	13	14.94 %	3	3.45 %
1.6	7	8.05 %	0	0.0 %
1.8	7	8.05 %	2	2.30 %
2.0	1	1.15 %	2	2.30 %
2.2	1	1.15 %	1	1.15 %
2.4	2	2.30 %	0	0.0 %
2.6	0	0.0 %	0	0.0 %
2.8	1	1.15 %	0	0.0 %
3.0	0	0.0 %	0	0.0 %

Tableau 18 – Répartition des gaps pris et refusés par erreur

gaps acceptés par les participants au total (i.e. 7.23%). Il semble donc que les erreurs de décision de changement de voie identifiées comme telles par les participants soient relativement rares. Notons ensuite que le pic d'erreurs rapportées se situe au niveau du gap de taille 1.4 s, ce que nous pouvons éventuellement mettre en rapport avec la limite de décision indiquée dans le tableau des hypothèses. Toutefois, nous constatons que de nombreuses erreurs existent sur la plage des gaps compris entre 0.8 s et 2.0 s (seules 4 erreurs sont rapportées en dehors de cette plage).

Le tableau 19 (p. 147) produit le pourcentage d'erreurs d'acceptation sur le nombre total de gaps acceptés pour chaque taille de gap.

Nous notons un échelonnement des proportions d'erreurs. Pour les deux plus faibles tailles de gap (i.e. 0.8 s et 1.0 s), les erreurs représentent au moins 50 % des acceptations. Pour les gaps compris entre 1.2 s et 1.8 s, les proportions d'erreurs diminuent graduellement entre 24 % et 10 %, à l'exception du gap de 1.4s pour lequel la proportion d'erreurs avoisine les 40 %, ce qui le rapproche des gaps de très faible taille. Enfin, pour les gaps de taille supérieure ou égale à 2.0 s, les proportions d'erreurs deviennent faibles (i.e. inférieures à 3 %). Les hypothèses du tableau 15 (p. 143) ne sont donc pas parfaitement confirmées, qu'il s'agisse de celles concernant la ZRT ou de celles déduites de la RHT, bien que cette dernière n'exclue pas la possibilité que les conducteurs décident de changer de voie en prenant un risque.

Concernant les gaps pris par erreur, nous devons également considérer les collisions ayant eu lieu avec les autres véhicules. Sur la totalité des 691 CDV effectués, 7 collisions ont eu lieu. Toutes les collisions ont eu lieu avec le véhicule GC (i.e. véhicule fermant le gap, arrivant à l'arrière). Les collisions concernent les gaps : 0.8s, 1.0s, 1.2s, 1.4s, 1.6s et 1.8s (deux collisions ont eu lieu pour le gap de 1.6s). Toutes les collisions ont eu lieu avec des participants différents, à l'exception du participant 33 qui a eu deux collisions (0.8s et 1.4s). Toutes les situations où les collisions ont eu lieu ont été identifiées comme des erreurs par les participants. Les collisions ont donc représenté environ 1% de

Acceptés	Erreurs	Total	Proportion d'erreurs
Taille du Gap (s)	Nombre brut	Nombre total	Pourcentage
0.8	4	8	50 %
1.0	8	15	53.33 %
1.2	6	25	24 %
1.4	13	35	37.14 %
1.6	7	53	13.21 %
1.8	7	70	10 %
2.0	1	70	1.43 %
2.2	1	74	1.35 %
2.4	2	84	2.38 %
2.6	0	86	0 %
2.8	1	85	1.18 %
3.0	0	86	0 %

Tableau 19 – Proportions de gaps acceptés par erreur sur l'ensemble des gaps acceptés

tous les changements de voie effectués, ce qui est très faible, voire négligeable.

Le tableau 20 (p. 148) produit les résultats suivant le même principe que le tableau précédent pour les gaps refusés par erreur.

Nous constatons ici que le nombre et la proportion de ce type d'erreurs est plus faible que celui des erreurs d'acceptation de CDV. De plus, nous remarquons que ces erreurs s'étalent sur la plage de gaps allant de 1.2 s et 2.2 s. Concernant la proportion d'erreurs rapportées sur le nombre total de gaps refusés, on constate que cette proportion, bien que généralement faible, semble s'accroître progressivement depuis la première borne de la plage (i.e. 1.2 s) jusqu'à atteindre un maximum aux gaps 1.8 s et 2.0 s, avant de redescendre jusqu'à la dernière borne de la plage (i.e. 2.2 s). Logiquement, plus la taille du gap est importante, plus le refus de CDV est rapporté comme une erreur.

Ces résultats sur les erreurs rapportées ayant été exposés, nous pouvons maintenant porter notre attention sur l'examen de la relation entre la taille des gaps et la décision de changement de voie.

7.2.1.5 Relation entre taille des gaps et décisions de changement de voie

Les tableaux 17 (p. 145) et 18 (p. 146), ainsi que le graphique 42 (p. 144), incitent clairement à confirmer l'existence supposée d'une relation entre la taille des espaces et les décisions de changement de voie. Si cette relation semble relativement évidente visuellement, nous devons tout de même chercher à la quantifier, la valider et l'explorer plus en détail. Pour cela, nous avons exclu les situations rapportées par les participants comme des erreurs car, comme nous l'avons indiqué précédemment, ces erreurs sont involontaires et renvoient à une prise de décision jugée erronée par le participant lui-même. Les résultats suivants ont donc été obtenus à partir des données pour lesquelles les participants affirment avoir pris la bonne décision.

Pour cette analyse, nous avons considéré le pourcentage de décision de changement de voie pour chaque participant et chaque taille de gap. Ainsi, un participant qui pour une taille de gap donnée,

Refusés	Erreurs	Total	Proportion d'erreurs
Taille du Gap (s)	Nombre brut	Nombre total	Pourcentage
0.8	0	79	0 %
1.0	0	72	0 %
1.2	1	62	1.61 %
1.4	3	52	5.77 %
1.6	0	34	0 %
1.8	2	17	11.76 %
2.0	2	17	11.76 %
2.2	1	12	8.33 %
2.4	0	3	0 %
2.6	0	1	0 %
2.8	0	2	0 %
3.0	0	1	0 %

Tableau 20 – Proportions de gaps refusés par erreur sur l'ensemble des gaps refusés

aura procédé à deux changements de voie sur les trois situations proposées, aura un pourcentage de décision de 66%. En procédant ainsi, nous obtenons 29 pourcentages de décisions positives par taille de gap. Nous avons donc pu procéder à l'estimation d'un modèle linéaire généralisé fournissant les résultats suivants : $\chi^2(1) = 210.23, p < .001$. Le calcul des pseudo- R^2 indique que la taille du gap explique 46 % de la variance. La puissance du test est de 99.8% avec l'intervalle de confiance suivant : 95%IC [99.28, 99.98]. La représentation graphique 43 (p. 149) illustre le modèle d'association entre le pourcentage de décisions de changement de voie et la taille du gap (les points représentent les données réelles auxquelles un léger bruit a été ajouté pour faciliter la lecture).

Nous constatons au travers des données fournies dans les tableaux et les représentations graphiques, qu'un lien clair associe la proportion des décisions de CDV et la taille des gaps. Plus la taille du gap augmente, plus la proportion de décisions de CDV augmente. Nous notons également le fait que, pour les plus petits gaps, la proportion d'erreurs de décision de CDV est très marquée. Enfin deux régions particulières de la plage des gaps semblent ressortir au niveau des gaps de 1.2 s et 2.0 s.

7.2.1.6 Distribution des seuils de décision de changement de voie

Nous avons jusqu'à présent supposé qu'il existait pour chaque participant, un seuil de décision en dessous duquel un gap aura une grande probabilité d'être refusé, et au dessus duquel il sera très probablement accepté. Nous savions toutefois que ce seuil était théorique et que la réalité des décisions humaines était sensible à un grand nombre de facteurs contextuels aboutissant à une probable importante variabilité inter et intra-individuelle.

Pour étudier l'existence de ce seuil de décision théorique, nous pouvons dans un premier temps chercher à estimer la taille de la plage de gaps sur laquelle s'étale le changement de décision pour chaque participant. Pour cela, nous nous concentrons sur les données de CDV effectués sans erreurs

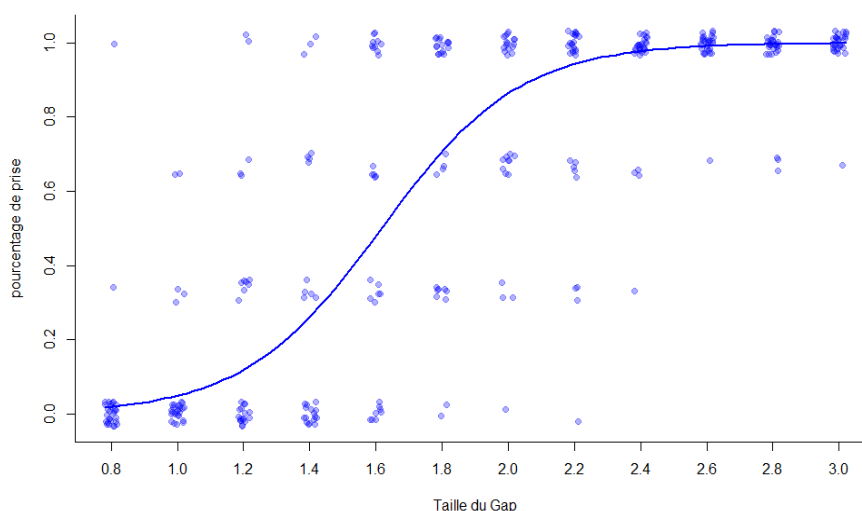


Figure 43 – Modèle d’association entre le pourcentage de décision de changement de voie et la taille du gap

rapportées. Le principe du calcul de l’étalement du changement de décision est simple. Pour chaque participant et chaque taille de gap, le nombre de décisions de CDV est comptabilisé. Puis, pour chaque participant, lorsque les gaps sont considérés en ordre croissant, le dernier gap pour lequel 3 refus ont été enregistrés est noté, ainsi que le premier gap pour lequel 3 acceptations ont été enregistrées. On obtient alors deux gaps « *limite* » pour chaque participant. La taille de l’étalement est alors estimée en comptant le nombre de gaps séparant les deux limites (incluses). Prenons par exemple un participant pour qui la limite de refus est 1.4 s et la limite d’acceptation est 2.0 s, l’étalement de sa décision sera alors de 4 gaps. Lorsque nous procédons à cette estimation pour tous les participants, nous pouvons établir la distribution de l’étalement des décisions de changement de voie. La figure 44 (p. 150) représente cette distribution.

Nous confirmons alors, que le seuil de changement de décision n’est pas immédiatement manifeste et que la réalité des décisions est relativement variable. Ainsi, le mode et la médiane de cette distribution se trouve à 4 gaps, ce qui signifie qu’en règle générale le changement complet de décision des participants, s’effectuait sur un empan de 4 gaps, en incluant le dernier gap toujours refusé et le premier gap toujours accepté. **Ce résultat est de toute première importance car il justifie pleinement les choix effectués dans notre algorithme de détermination des seuils de CDV (c.f. 6.4.1, p. 129), en particulier celui consistant à déterminer des bornes à partir desquelles est estimé le seuil individuel.** Nous traiterons davantage de cet aspect au moment de la présentation des résultats issus des données du troisième volet expérimental (section 7.4.1, p. 195).

Nous pouvons poursuivre cette analyse, en examinant les valeurs de gap pour chaque seuil de décision des participants. Nous pouvons les compiler afin d’en étudier la distribution. Le tableau 21 (p. 150) et la figure 45 (p. 150) fournissent cette description.

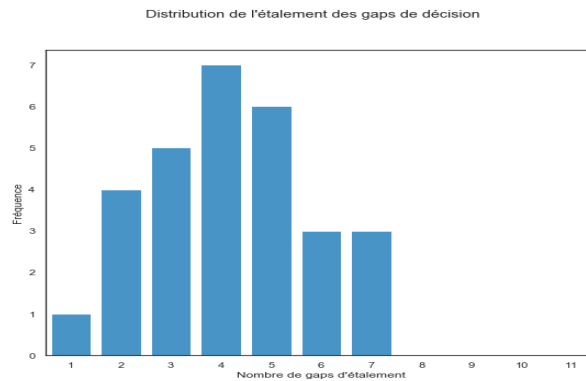


Figure 44 – Distribution de la taille des plages de changement de décision

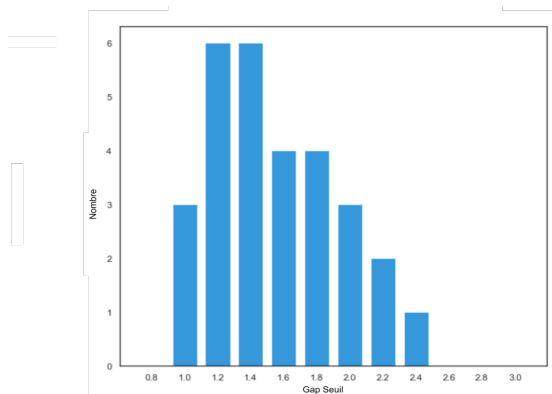


Figure 45 – Diagramme de fréquence d'occurrence des gaps seuils

Seuils	
Taille du Gap (s)	Nombre d'occurrence
0.8	0
1.0	3
1.2	6
1.4	6
1.6	4
1.8	4
2.0	3
2.2	2
2.4	1
2.6	0
2.8	0
3.0	0

Tableau 21 – Tableau de répartition des seuils estimés

Nous constatons cette fois que la fourchette de répartition des seuils se situe dans l'intervalle $[1.0\text{ s}; 2.4\text{ s}]$. Nous observons également que plus de 50 % des participants ont un seuil de décision de changement de voie inférieur ou égal à un gap de 1.4 s. Par ailleurs, environ 10 % des participants ont un seuil de décision inférieur ou égal au gap de 1.0 s, et près de 90 % des participants un seuil de décision inférieur ou égal au gap de 2.0 s. Les seuils de décision les plus fréquents étant 1.2 s et 1.4 s, le gap correspondant au seuil de décision moyen est, quant à lui, de 1.53s. **Ces nouvelles données, lorsqu'on les associe aux données précédemment présentées concernant les décisions effectives, semblent là encore indiquer une « zone de décision » préférentielle dans une plage de tailles de gaps allant de 1.0 s à 2.0 s. Ceci est une nouvelle fois, en relatif désaccord avec nos prédictions d'une plage préférentielle de $[1.4\text{ s}; 2.4\text{ s}]$, basées sur la ZRT. Cette**

zone particulière, dans laquelle la plupart des participants vont entamer une migration de la décision négative vers la décision positive, semble présenter un pic aux alentours de 1.2 s ou 1.4 s (une quantité plus importante de participants serait probablement nécessaire pour « affiner » la distribution). Les données convergent au niveau des pourcentages de décisions effectives, mais également au niveau des seuils de changement de décision estimés.

Nous possédons à présent, une description convenable de la structure des décisions de changement de voie dans leur rapport avec la taille du gap. Nous avons identifié une liaison forte entre ces deux éléments ainsi qu'une zone particulière dans la plage des gaps proposés. Nous avons enfin constaté que nos hypothèses basées sur la ZRT ne prédisaient pas avec exactitude, les données obtenues concernant les décisions de CDV. Intéressons-nous maintenant à la relation entre la taille des gaps et les évaluations subjectives fournies par les participants lors des questionnaires post-situationnels.

7.2.2 Données d'évaluations subjectives issues des questionnaires post-situationnels

Cette section est consacrée à l'analyse des données subjectives fournies par les participants après chacune des situations de conduite. Cette fois encore, nous excluons les évaluations pour lesquelles les participants ont rapporté une erreur de décision, afin de ne considérer les jugements des participants que pour les situations dans lesquelles ils ont effectué délibérément, « en pleine conscience » le CDV. Nous examinons prioritairement les réponses aux questions portant sur la criticité de la situation, la difficulté de la manœuvre et l'acceptabilité d'un système d'automatisation du changement de voie. Avant de procéder à la présentation de ces résultats, nous devons apporter quelques précisions sur les procédures de calcul employées.

7.2.2.1 Moyennes de moyennes et moyennes d'écart-types

Les données brutes comprennent toutes les réponses aux questionnaires post-situationnels, soit trois réponses par gap et par participant. Ce qui nous intéresse ici, ce sont les valeurs moyennes des réponses par gap et par participant.

Nous procédons donc en deux étapes : calcul des moyennes et écart-types des trois réponses pour chaque gap et chaque participant, puis moyenne de ces valeurs. Nous obtenons ainsi une moyenne des moyennes et une moyenne des écarts types. Cette procédure, bien que n'impactant pas valeurs générales de moyennes, est importante pour l'interprétation des écart-types. En effet, si nous nous contentons de prendre l'ensemble des réponses brutes et d'en calculer l'écart-type, l'information portée par celui-ci sera un « mélange » de variabilité intra-individuelle et de variabilité inter-individuelle, ce qui rendra difficile l'interprétation. En revanche, la moyenne des écart-types est interprétable, car elle informe sur la variabilité intra-individuelle uniquement. L'information sur la variabilité intra-individuelle est très importante dans la mesure où elle témoigne de la stabilité de l'évaluation subjective du participant, dans des conditions expérimentales identiques. La variabilité interindividuelle fournit une information sur l'étendue des évaluations moyennes des participants pour un gap donné. Elle est donnée par l'écart-type des moyennes de moyennes. Nous considérerons donc ces deux informations distinctement. Cette précision étant établie, nous pouvons à présent nous consacrer aux résultats concernant l'évaluation de la criticité des situations de conduite manuelle.

7.2.2.2 Criticité de la situation

Rappel des questions et hypothèses

Concernant l'évaluation de la criticité situationnelle en situation de changement de voie, nous nous posons la question de l'association entre la taille des gaps et l'évaluation subjective du risque qui en est faite. Nous devons donc tester l'existence de cette association dans nos données. De plus, nous souhaitons savoir si le tableau de conflits de zones enveloppes 15 p. 143 nous permet de prévoir les éventuelles particularités de cette association (e.g. paliers, seuils, etc.).

Moyenne des criticités

La criticité moyenne des trois itérations de chaque gap a été calculée, puis la moyenne de ces moyennes a été faite pour chaque gap. Le diagramme en barre 46 (p. 152) illustre les résultats obtenus, et le tableau 22 (p. 152) les détaille¹¹.

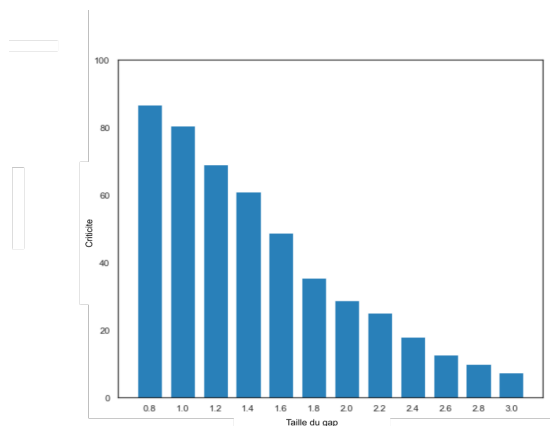


Figure 46 – Moyenne de criticité par gap en conduite manuelle

Criticité	
Taille du Gap (s)	Moyenne
0.8	85.80
1.0	79.63
1.2	69.36
1.4	60.11
1.6	48.46
1.8	36.09
2.0	28.59
2.2	25.22
2.4	18.03
2.6	12.79
2.8	9.93
3.0	7.52

Tableau 22 – Tableau de répartition des moyennes de criticité

Ces données semblent indiquer l'existence d'un lien entre la taille du gap et la criticité moyenne évaluée par les participants. Plus la taille du gap augmente plus la valeur de criticité moyenne descend.

Moyenne des écarts types de criticité

Ce paragraphe est consacré à la moyenne des écarts types de criticité, donc à la variabilité intra-individuelle des évaluations de criticité des participants, pour chaque taille de gap. Comme pour les valeurs moyennes de criticité, le tableau 23 (p. 153) et le diagramme 47 (p. 153) présentent le détail des données.

¹¹Compte tenu des précisions calculatoires que nous avons développées à la section 7.2.2.1 (p. 151), l'objectif de clarté nous impose de ne pas présenter les écart-types sous forme de barres d'erreurs sur ce diagramme. Les moyennes d'écart-types font l'objet d'une présentation détaillée.

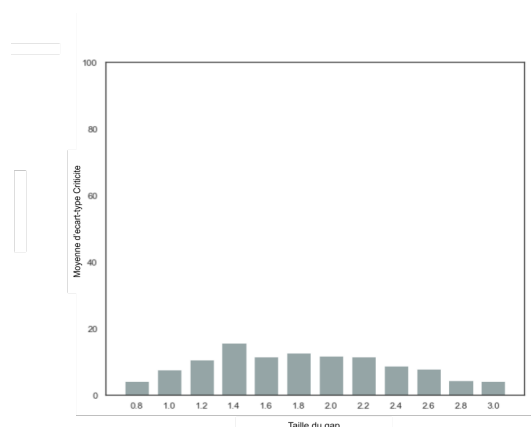


Figure 47 – Moyenne des écarts types de criticité par gap en conduite manuelle

Criticité	
Taille du Gap (s)	Moyenne des Ecart-types
0.8	4.30
1.0	7.61
1.2	10.72
1.4	15.62
1.6	11.50
1.8	12.62
2.0	11.73
2.2	11.47
2.4	8.92
2.6	7.79
2.8	4.47
3.0	4.24

Tableau 23 – Tableau de répartition des moyennes des écart-types de criticité

Une première observation évidente concerne la relative faiblesse générale de la variabilité intra-individuelle. **Ceci témoigne d'une tendance des participants à la consistance avec eux-mêmes, dans leurs évaluations de la criticité des situations de conduite.** En d'autres termes, malgré la présentation aléatoire des tailles d'espaces, les participants fournissaient des évaluations de criticité similaires pour des espaces similaires. Regardons à présent plus en détail ces résultats.

Nous observons d'un côté, de faibles écart-types moyens pour les tailles de gaps les plus extrêmes, et de l'autre des écarts-types moyens plus élevés dans la fourchette des gaps allant de 1.2 s à 2.4 s, avec un maximum pour le gap 1.4 s. **Cela traduit une forte consistance des évaluations des participants avec eux-mêmes pour les gaps de taille très faible et très grande, et une plus grande variabilité intra-individuelle des évaluations subjectives de criticité pour les espaces de taille intermédiaire.** Ces données vont dans le sens de l'existence d'un **statut particulier de la plage des gaps centrée autour du gap 1.4 s.** Précisons ici que nous ne retrouvons pas la plage particulière (i.e. [1.2 s ; 2.0 s]) que nous avons identifiée lors de l'examen des données de décisions.

Notons que cette méthode de présentation des résultats ne sera pas répétée pour les autres mesures subjectives effectuées. En effet, les analyses qui suivent tiendront automatiquement compte des moyennes de moyennes. Par ailleurs, dans la très grande majorité des cas, les moyennes d'écart-type (traduisant la variabilité intra-individuelle) présentaient le même profil que pour les données de criticité. Il ne sera donc pas pertinent d'en présenter le détail.

Distribution générale des moyennes de criticité

Nous avons vu que les moyennes de criticité semblent corrélées à la taille des gaps, et que la variabilité intra-individuelle de ces évaluations de criticité était globalement faible, à l'exception d'une zone particulière de gaps autour de 1.4 s. Qu'en est-il de la variabilité interindividuelle des évaluations

de criticité, et plus généralement, comment sont distribuées les moyennes de criticité ? La figure 48 (p. 154) est très riche d'informations à ce sujet.

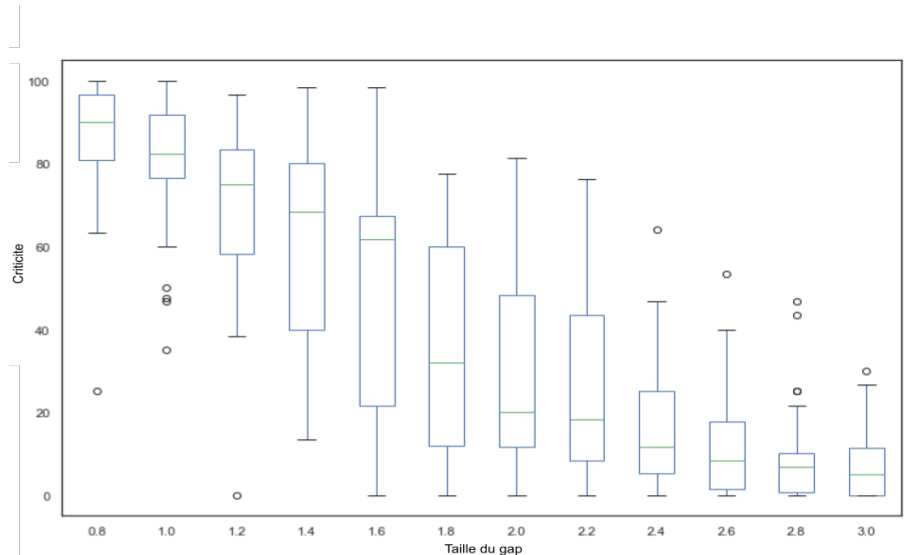


Figure 48 – Distribution des moyennes de criticité par taille de gap

Ce graphique en boîtes à moustaches de Tukey présente les données séparées en quartiles. La ligne verte continue représente la médiane, la « boîte » représente les deux quartiles centraux, et les « moustaches » sont d'une longueur égale à 1.5 fois la distance interquartile. La fin des « moustaches » est donc calculée de sorte à approcher les 1^{er} et 99^{ème} centiles théoriques. Les cercles représentent les données extrêmes.

On constate ici également que pour les gaps extrêmes, les moyennes de criticité sont à la fois plus élevées/faibles, mais également peu dispersées. Ainsi, par exemple, pour les espaces inférieurs ou égaux à 1.0 s, la très grande majorité des moyennes de criticité sont supérieures à 60. Il en va de même pour les espaces de taille supérieure ou égale à 2.4 s. En revanche, pour les espaces situés dans la plage entre 1.2 s et 2.2 s, les variabilités interindividuelles peuvent être très grandes, en particulier pour le gap de 1.6 s pour lequel les moyennes de criticité couvrent tout le spectre de valeurs entre 0 et 100. Ces changements de pattern dans la variabilité interindividuelle des évaluations de criticité, semblent de nouveau faire apparaître **une première « frontière » localisée entre les gaps 1.0 s et 1.2 s, frontière en dessous de laquelle les participants semblent « d'accord entre eux » et considèrent ces espaces comme très critiques. Une seconde « frontière », dont la localisation est moins distincte, semble apparaître dans la zone de la plage des gaps située aux alentours de 2.2 s. Au-delà de cette limite, les participants semblent également s'accorder entre eux pour considérer la criticité des gaps comme faible.** L'augmentation importante de la variabilité interindividuelle dans l'évaluation de la criticité des gaps situés dans la plage comprise entre 1.0 s et 2.2 s traduit probablement le fait que la criticité estimée par les participants pour ces espaces change progressivement pour passer d'une valeur élevée à une valeur faible de manière différentielle, suivant les participants. Ces données semblent en accord avec les données de répartition de décisions de CDV et de distribution des seuils de changement de décision.

Pour approfondir l'étude de la relation entre la taille des gaps et les évaluations de criticité, un

modèle linéaire généralisé mixte a été estimé à partir des données. Le test d'hypothèse du lien entre la taille du gap et la criticité de la situation nous indique une relation très significative : $\chi^2(1, 315) = 910.81, p < .001$, le calcul des pseudo- R^2 indique que la taille du gap explique 77 % de la variance. La puissance du test est de 100% avec l'intervalle de confiance suivant : 95%IC [99.63, 100]. La représentation graphique 49 (p. 155) illustre le modèle d'association entre la criticité et la taille du gap (les points représentent les données réelles auxquelles un léger bruit a été ajouté pour faciliter la lecture)

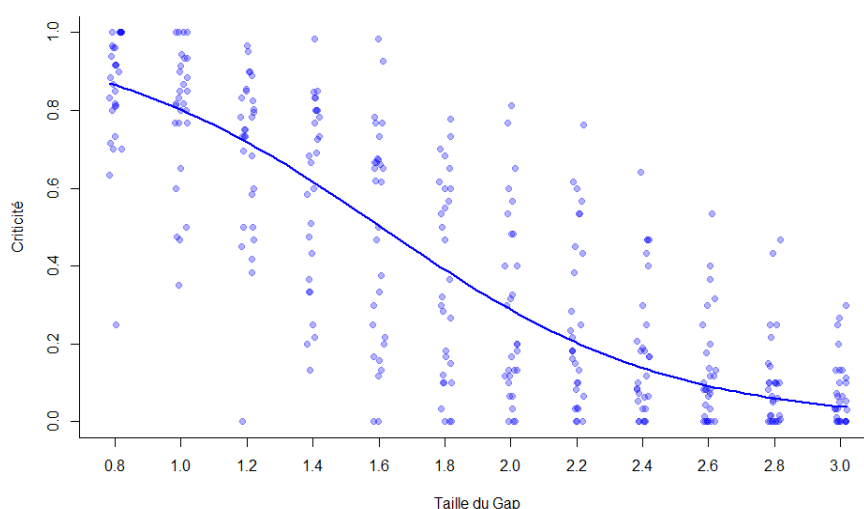


Figure 49 – Modèle d'association entre la criticité et la taille du gap

Il existe donc un lien d'association significatif entre la taille des gaps et la criticité subjective évaluée en conduite manuelle, et il semble exister, tout comme pour les décisions de changement de voie, différentes plages dans l'éventail des gaps proposés. Les plages de gaps extrêmes sont caractérisées par des évaluations de criticité également extrêmes, ainsi que par une faible variabilité intra comme interindividuelle. En d'autres termes, lorsque les espaces sont très grands ou très petits, les participants ont généralement tendance à évaluer la criticité associée comme très élevée ou très faible, et ceci de manière consistante, à la fois pour un même individu et pour des individus différents. La plage centrale des gaps [1.2 s; 2.4 s] est quant à elle, caractérisée par des évaluations présentant une variabilité intra-individuelle légèrement plus élevée, une variabilité inter-individuelle nettement supérieure, et une valeur moyenne descendante avec l'augmentation de la taille de l'espace. Il apparaît donc une relative cohérence entre la taille des gaps, les décisions de CDV prises par les participants et l'évaluation subjective de criticité qui en est faite.

Criticité au gap seuil

Qu'en est-il des valeurs de criticité au niveau du gap seuil des participants ? Nous avons déjà établi que la proportion de décisions de CDV entre le gap seuil et le gap immédiatement supérieur (i.e. +0.2s) était significativement différente. Nous pouvons donc examiner l'évolution des valeurs de criticité entre ces deux gaps ainsi qu'entre le gap seuil et le gap de taille inférieure. La figure 50 (p. 156) présente ces résultats.

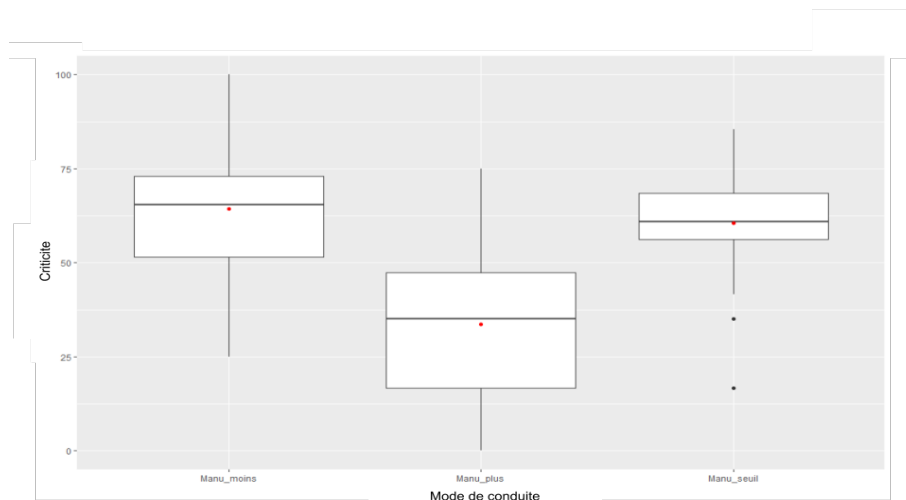


Figure 50 – Diagramme de comparaison des distributions de criticité entre le gap seuil et les gaps supérieurs et inférieurs

Nous constatons que, comme pour les décisions de CDV, les distributions de valeurs de criticité semblent similaires pour le gap seuil (« manu seuil ») et le gap immédiatement inférieur (« manu moins »), mais qu’elles sont généralement plus élevées pour le gap supérieur (« manu plus »). Les tests statistiques fournissent des résultats en accord avec cette impression visuelle ($F(2, 42) = 53.67, p < .001$). Cette même différence est retrouvée entre le gap inférieur et le gap supérieur, tandis qu’aucune différence significative n’est montrée entre le gap seuil et le gap inférieur.

Lors du questionnaire post-situationnel, une question additionnelle était posée concernant la criticité de la situation « si elle avait été réelle ». Nous ne présentons pas ces résultats dans la mesure où les résultats obtenus sont similaires à ceux précédemment présentés (les valeurs moyennes de criticité réelle étaient en moyenne de 2.56 points supérieures ce qui est donc très négligeable). Un constat identique a été fait pour les moyennes d’écart-types. Une troisième question, concernant le risque effectivement pris, était posée aux participants. Voyons les données qui en résultent.

7.2.2.3 Évaluation du risque pris par les participants

Pour rappel, nous étudions les évaluations subjectives de risque pris car, sur ce point, la ZRT et la RHT s’opposent. La première prévoit que pour tous les CDV effectués sans erreur rapportée, le risque pris estimé par le participant devrait être nul. Par opposition, la seconde prévoit une prise de risque possible et intentionnelle.

Comme pour les données relatives à la criticité, nous procédons aux calculs de moyenne des valeurs moyennes de risque pris, pour les gaps pris sans erreur rapportée uniquement. Le diagramme en boîte à moustaches 51 (p. 157) présente la distribution des moyennes de risque pris par taille de gap.

Pour permettre une meilleure lecture des données, ce graphique présente des indicateurs supplémentaires. Les lignes vertes en pointillé illustrent les moyennes. Les valeurs chiffrées indiquent le nombre de participants ayant au moins une fois effectué un CDV pour le gap concerné (sans estimer avoir fait d’erreur) et dont les moyennes ont été utilisées pour établir cette représentation graphique. Cette information

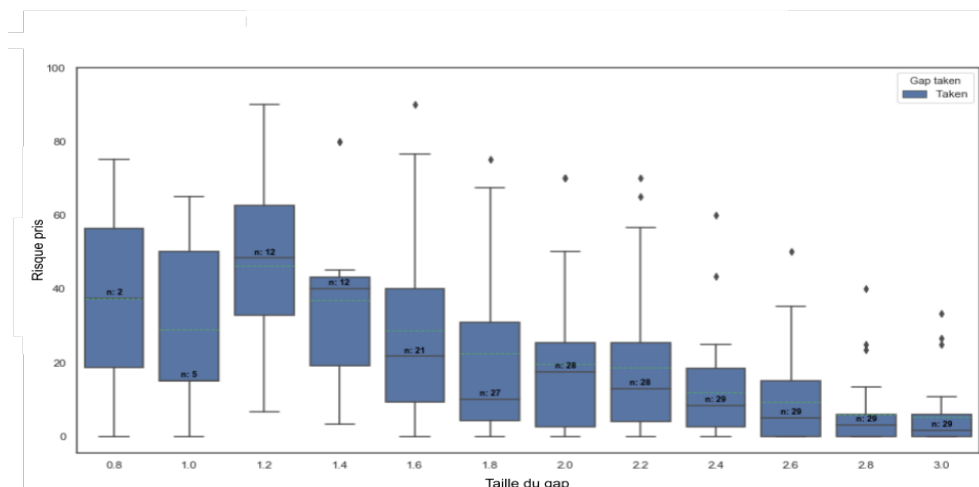


Figure 51 – Diagramme de distribution des moyennes de risques pris suivant la taille des gaps pour les gaps acceptés uniquement

est importante, car pour certains gaps, peu de valeurs ont été utilisées du fait que peu de participants ont décidé de changer de voie. Ainsi, par exemple, pour le gap de taille 2.0 s, seules deux valeurs ont été utilisées, ce qui signifie que parmi les 4 CDV effectués sans erreur pour cette taille de gap, 2 participants seulement en sont à l'origine. Il en va de même pour le gap de 1.0 s, pour lequel seuls 5 participants ont effectué au moins un changement de voie en considérant leur décision comme non erronée.

Le premier constat concerne le fait que la moyenne de risque pris la plus élevée n'excède pas 50 sur une échelle pouvant aller jusqu'à 100¹². Nous ne présentons pas ici le détail des résultats concernant les moyennes d'écart-types des estimations de risque pris (i.e. variabilité intra-individuelle), considérant que celles-ci sont généralement inférieures à 10, et qu'on ne constate pas de configuration particulièrement différente de celles observées pour les autres dimensions déjà présentées (i.e. criticité).

Un élément intéressant de ce graphique concerne la limite que nous avons identifiée précédemment entre les gaps de 1.0 s et 1.2 s. Non seulement très peu de gens acceptent de changer de voie pour un espace inférieur, mais nous pouvons constater que le nombre de participants décidant de changer de voie pour le gap de taille immédiatement supérieur (i.e. 1.2 s) double. De plus, un autre élément remarquable de ce graphique est le « saut » dans les valeurs moyennes et médianes des estimations de risque pris au passage de cette limite. Compte tenu du très faible nombre de participants ayant décidé de changer de voie pour le gap de 1.0 s, nous devons nous montrer très prudents quant aux valeurs de risque pris qui y sont associées. En revanche, à partir du gap de 1.2 s, le nombre de participants sur lequel se basent les données devient suffisamment important pour que nous puissions y porter notre attention et procéder à des tests statistiques. Nous constatons alors une réduction graduelle de la moyenne des valeurs de risque pris avec l'augmentation de la taille des gaps. Nous avons donc effectué des tests sur l'association entre la taille du gap et les moyennes d'évaluation de risque pris. Un GLMM a été estimé et le test d'association entre les deux variables n'a pas atteint le seuil de significativité.

¹²Il faut rappeler qu'aucun gain particulier associé à la décision de changer de voie n'était proposé aux participants, ce qui n'incitait pas à la prise de risque dans le cadre de notre protocole.

Nous ne pouvons donc pas nous prononcer formellement concernant cette association.

Toutefois, la simple possibilité que le risque pris soit supérieur à zéro semble aller à l'encontre des prévisions de la ZRT. En conséquence, il semble que les prédictions de la RHT soient plus en accord avec nos données. L'évolution de l'évaluation du risque pris en fonction de la taille du gap demanderait donc une étude plus approfondie, en particulier pour les gaps de taille inférieure ou égale à 1.0 s.

7.2.2.4 Intentionnalité de la prise de risque

Un point important, différenciant la théorie du risque zéro de la théorie de l'homéostasie du risque, concerne l'intentionnalité de la prise de risque. En effet, la ZRT postule que le risque réel pris par le conducteur n'est pas intentionnel dans la mesure où, lorsqu'il est pris, il s'agit d'une erreur dans son évaluation subjective. À l'opposé, la RHT n'exclut pas que le conducteur puisse prendre des risques intentionnellement. C'est la raison d'être de la question « *À quel point avez-vous pris ce risque (évalué en question précédente) intentionnellement ?* » posée aux participants, et qui avait donc pour objectif d'évaluer l'intentionnalité du risque effectivement pris. Le tableau 24 (p. 158) décrit le niveau d'intentionnalité des prises de risque pour les CDV effectués par nos participants.

Intentionnalité	
Taille du Gap (s)	Moyenne
0.8	98.33
1.0	96.0
1.2	92.91
1.4	97.43
1.6	93.17
1.8	96.39
2.0	94.61
2.2	93.69
2.4	96.37
2.6	97.51
2.8	98.02
3.0	97.01

Tableau 24 – Tableau de répartition des moyennes de moyennes d'intentionnalité de risque pris

Comme le tableau des données en atteste, les valeurs moyennes d'intentionnalité de la prise de risque, quand le CDV a été effectué, sont très élevées. Bien que nous ne rapportions pas ici ces données, les variabilités inter et intra-individuelles concernant cette dimension sont très faibles, quel que soit le gap concerné. **Ces données vont donc dans le sens des prévisions de la théorie de l'homéostasie du risque dans la mesure où, pour les gaps de faible taille pour lesquels le risque pris est subjectivement estimé comme non nul, l'intentionnalité de cette prise de risque est toujours supérieure à 90, sur une échelle de 0 à 100.**

Concernant le risque pris au gap seuil de décision, ainsi que son intentionnalité, nous ne le traitons pas ici car son analyse ne repose que sur les gaps pris sans erreur rapportée. Or, dans le cas du gap

seuil et du gap inférieur, seulement un tiers des décisions de changement de voie ont été positives, ce qui rend difficile la comparaison avec les 75% de gaps acceptés au gap immédiatement supérieur au seuil, considérant que les tests sont appliqués suivant l'appariement des données.

7.2.2.5 Évaluation de la difficulté de la manœuvre de CDV

Concernant la question portant sur la difficulté de la manœuvre¹³, nous avons vu en 2.3.1 (p. 51) que la prise en compte par le conducteur de ses propres capacités de conduite, intervient dans l'évaluation de la criticité d'une situation de conduite. La question de la difficulté estimée par les participants concernant le CDV est en rapport avec cet aspect. Le graphique 52 (p. 159) présente la distribution des moyennes de difficulté subjectivement estimée, en fonction de la taille du gap.

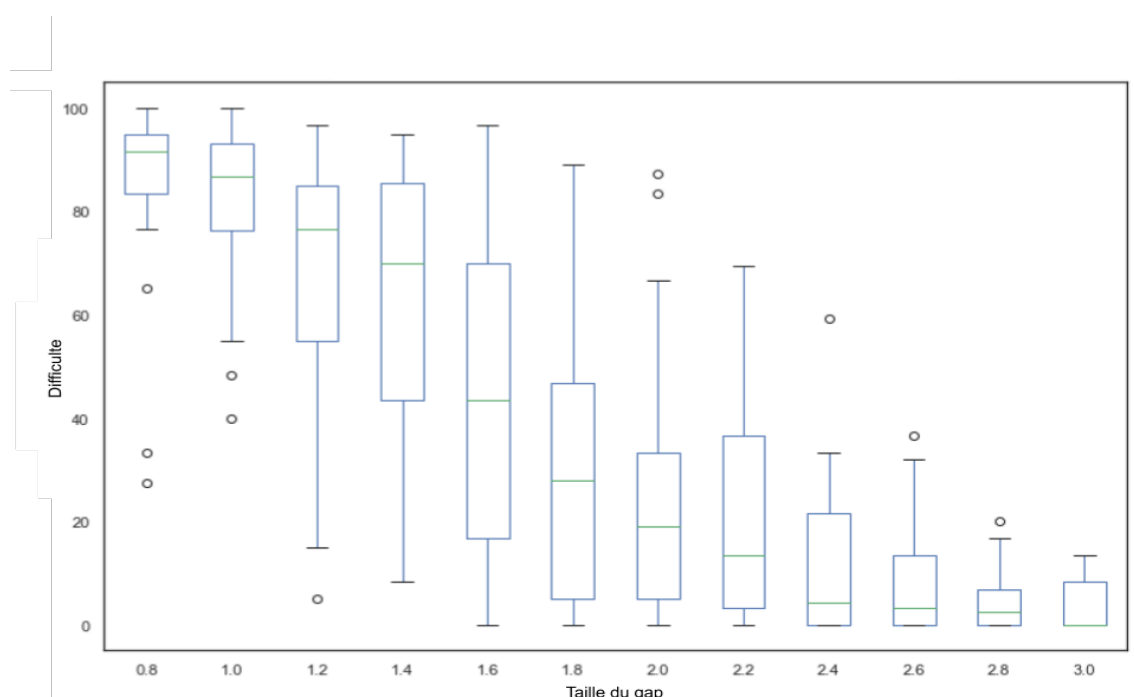


Figure 52 – Distribution des moyennes de difficulté suivant la taille des gaps

Les analyses statistiques indiquent un lien très significatif entre la taille du gap et les valeurs d'estimation de la difficulté de la manœuvre de CDV : $\chi^2(1, 316) = 861.50, p < .001$. Le pseudo- R^2 fournit une valeur de variance expliquée de 77%, et la puissance du test est de 100% avec l'intervalle de confiance suivant : 95%IC [99.63, 100]. La représentation graphique 53 (p. 160) illustre le modèle d'association entre la difficulté et la taille du gap.

La distribution des données de difficulté prend la même apparence que celle des données de criticité. Si nous testons l'association entre ces deux variables, nous obtenons un lien très significatif entre la difficulté estimée et les jugements de criticité : $(\chi^2(1) = 1398.97, p < .001)$. Le pseudo- R^2 fournit une valeur de variance expliquée de 86%, et la puissance du test est de 100% avec l'intervalle de confiance suivant : 95%IC [99.63, 100]. La représentation graphique 54 (p. 160) illustre le modèle d'association entre la difficulté du CDV et la taille du gap.

¹³ « À quel point cette manœuvre de changement de voie a-t-elle été difficile à effectuer ? »

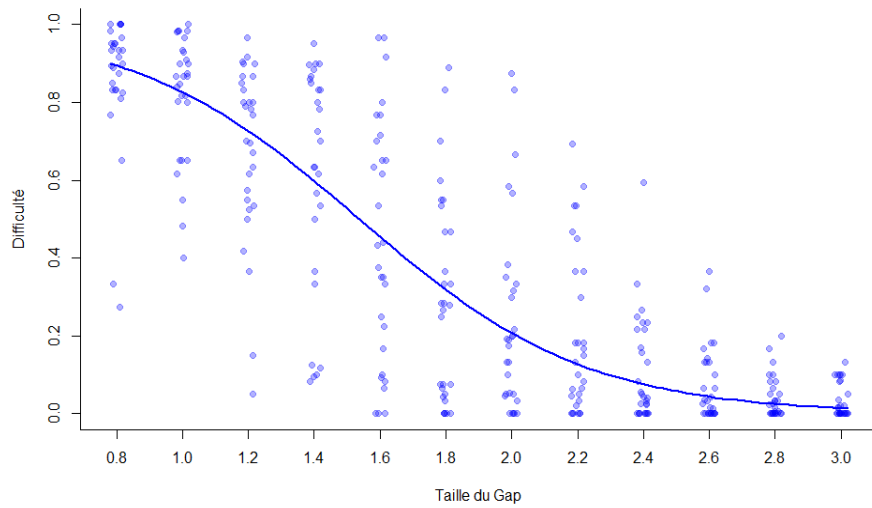


Figure 53 – Modèle d'association entre la difficulté et la taille du gap

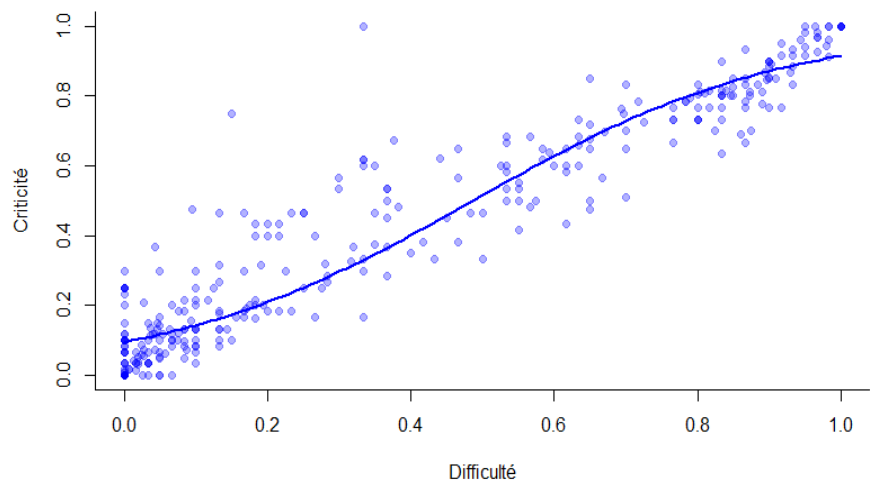


Figure 54 – Modèle d'association entre la difficulté et criticité

Concernant les données de difficulté au gap seuil, là encore, nous observons une différence significative entre le gap seuil et le gap immédiatement supérieur (« manu plus »), ($F(2, 42) = 56.63, p < .001$). Cette différence est également présente entre le gap inférieur et le gap supérieur (i.e. « manu moins » vs « manu plus »). En revanche, aucune différence significative n'est mise en évidence entre le gap seuil et le gap immédiatement inférieur. La figure 55 (p. 161) illustre ces résultats.

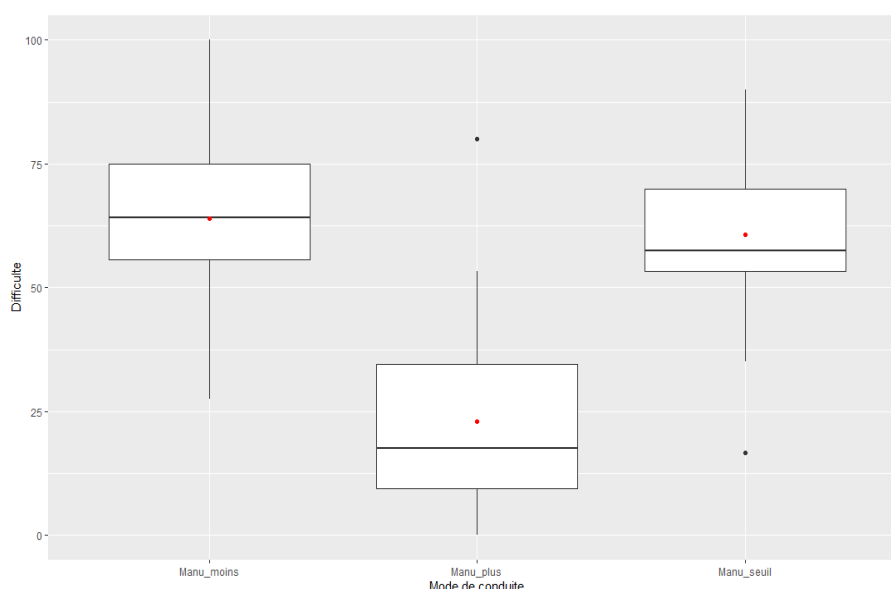


Figure 55 – Diagramme de comparaison des distributions de difficulté entre le gap seuil et le gap supérieur et inférieur

7.2.2.6 Acceptabilité d'un potentiel système de CDV automatisé

Intéressons-nous maintenant aux réponses concernant l'acceptabilité d'un hypothétique système d'automatisation du changement de voie. Pour rappel, le questionnaire post-situationnel proposait au participant, à chaque situation de conduite, d'indiquer à quel point il accepterait qu'un système de conduite autonome prenne la décision de changer de voie et la mette en œuvre dans cette même situation. Nous supposons que l'acceptabilité sera associée à la taille du gap et nous souhaitons également étudier les relations éventuelles qu'entretient l'acceptabilité avec les autres dimensions subjectives mesurées. Pour l'analyse des données relatives à cette question, nous avons également, pour les mêmes raisons que précédemment, retiré les situations pour lesquelles les participants ont estimé avoir commis une erreur.

Le diagramme 56 (p. 162) en boîte à moustaches présente la distribution des moyennes des évaluations d'acceptabilité pour chaque taille de gap.

Un lien entre l'acceptabilité et la taille des espaces semble également exister : plus la taille du gap augmente et plus l'acceptabilité d'un système décidant d'effectuer un changement de voie augmente. Ce lien très significatif entre la taille du gap et les valeurs d'acceptabilité est établi par les statistiques suivantes : $\chi^2(1) = 712.24, p < .001$. Le pseudo- R^2 fournit une valeur de variance expliquée de 71% et la puissance du test est de 100% avec l'intervalle de confiance suivant : 95%IC [99.63, 100]. La représentation graphique 57 (p. 163) illustre le modèle d'association

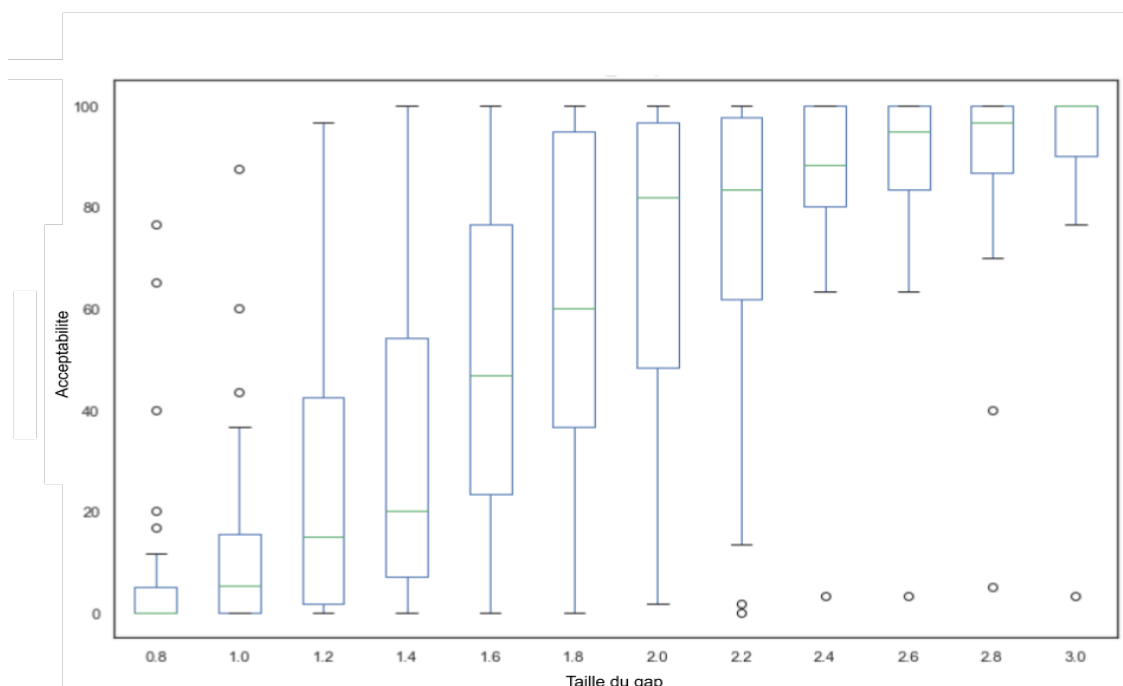


Figure 56 – Distribution des moyennes d’acceptabilité suivant la taille des gaps

entre la l’acceptabilité et la taille du gap.

De plus, nous observons, ici encore, une claire diminution de la variabilité interindividuelle des moyennes d’acceptabilité pour les gaps de taille extrême, et une très forte variabilité interindividuelle pour les gaps de taille moyenne, en particulier pour les gaps compris dans la fourchette [1.2 s; 2.2 s]

Dans la mesure où ces différentes plages de gaps sont caractérisées par des criticités particulières, nous examinons également l’association entre la criticité et l’acceptabilité d’un automate potentiel. **Cet examen nous révèle, là encore, un lien très significatif entre la criticité et les valeurs de d’acceptabilité** : $\chi^2(1) = 755.72, p < .001$. Le pseudo- R^2 fournit une valeur de variance expliquée de 78% et la puissance du test est de 100% avec l’intervalle de confiance suivant : 95%IC [99.63, 100]. La représentation graphique 58 (p. 163) illustre le modèle d’association entre la criticité et l’acceptabilité.

Pour ce qui est des données d’acceptabilité au niveau du gap seuil, nous pouvons, comme pour la criticité et la difficulté, comparer les distributions de valeurs fournies avec le gap supérieur et le gap inférieur. La figure 59 (p. 164) représente ces distributions.

Nous constatons là encore une différence significative entre les valeurs d’acceptabilité au gap seuil et les valeurs au gap supérieur ($F(1, 42) = 28.18, p < .001$). Cette différence est bien évidemment retrouvée à la comparaison du gap inférieur (« manu moins ») au gap supérieur (« manu plus »), tandis qu’aucune différence significative ne peut être mise en évidence entre le gap inférieur et le gap seuil.

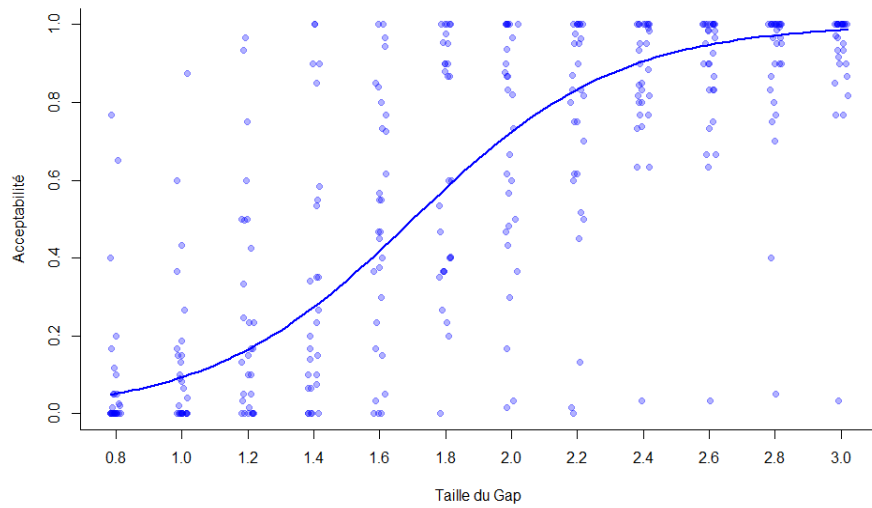


Figure 57 – Modèle d'association entre l'acceptation et la taille du gap

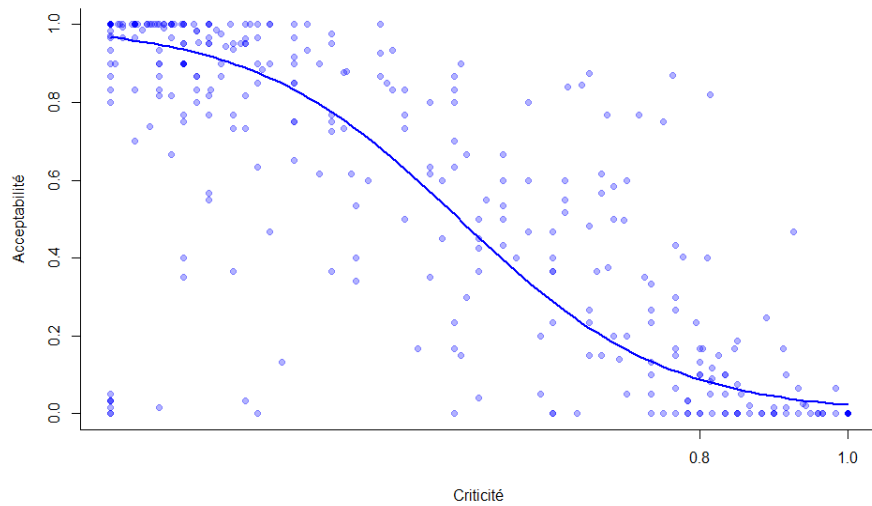


Figure 58 – Modèle d'association entre la criticité et l'acceptabilité d'un potentiel système de CDV automatique

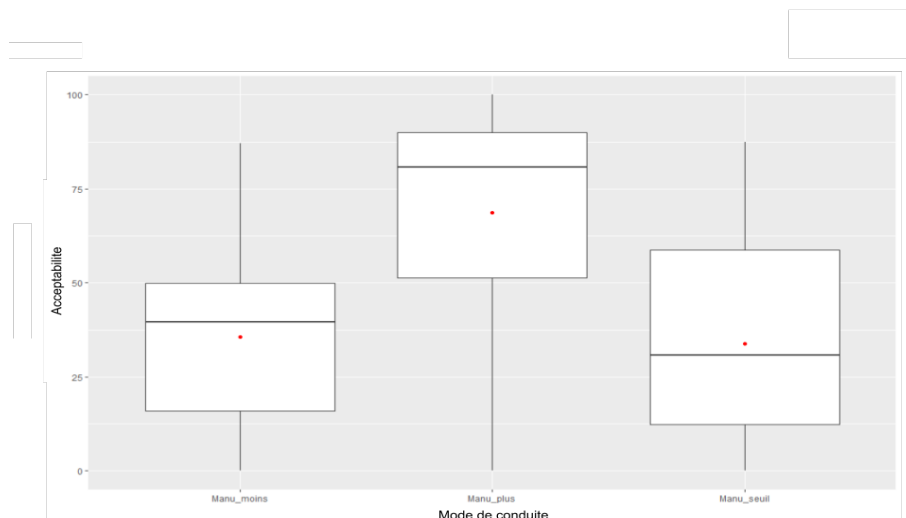


Figure 59 – Diagramme de comparaison des distributions d’acceptabilité entre le gap seuil et le gap supérieur et inférieur

7.2.3 Exécution de la manœuvre et insertion dans le gap

Outres ces résultats issus des questionnaires post-situationnels, les données relatives au comportement routier du conducteur et au déplacement du véhicule nous intéressent fortement. En effet, nous nous posons la question de la stratégie d’insertion dans le gap ainsi que de la gestion des zones enveloppes avec les autres véhicules. Nos hypothèses vont en faveur d’un compromis d’insertion au centre du gap.

7.2.3.1 Temps inter-véhiculaires et conflits de zones enveloppes

Parmi nos principales questions de recherche, se trouve celle concernant la position d’insertion dans l’espace de changement de voie. Nous nous intéressons prioritairement au TIV entre le véhicule Ego et les véhicules GO et GC. Cette valeur nous informe à la fois sur la position d’insertion dans le gap, mais elle nous permet également une lecture des comportements dans le cadre des Zones Enveloppes. Dans un premier temps, nous nous intéressons aux valeurs de TIV au moment où le véhicule du participant entre dans la voie de destination. Cet instant revêt un statut particulier, car il représente le premier moment où une collision est effectivement possible. Les graphiques et valeurs utilisées ici excluent les CDV pour lesquels le participant a rapporté avoir commis une erreur.

Le graphique 60 (p. 165) présente la distribution des TIV entre le véhicule du participant et le véhicule ouvrant le gap, au moment où le véhicule Ego entre dans la voie de destination.

Les bandes de couleurs de ce graphique retranscrivent le positionnement des zones enveloppes du véhicule du participant (i.e. Ego). Les boîtes à moustaches retranscrivent la distribution des valeurs de TIV entre le véhicule Ego et le véhicule ouvrant le gap (i.e. GO). **Le constat principal que nous pouvons faire ici est que, pour la plupart des gaps, le véhicule ouvrant se trouve au moins dans la zone de menace (i.e. zone jaune) du véhicule du participant, si ce n’est dans la zone de danger (i.e. zone rouge).** Nous constatons également qu’il faut attendre

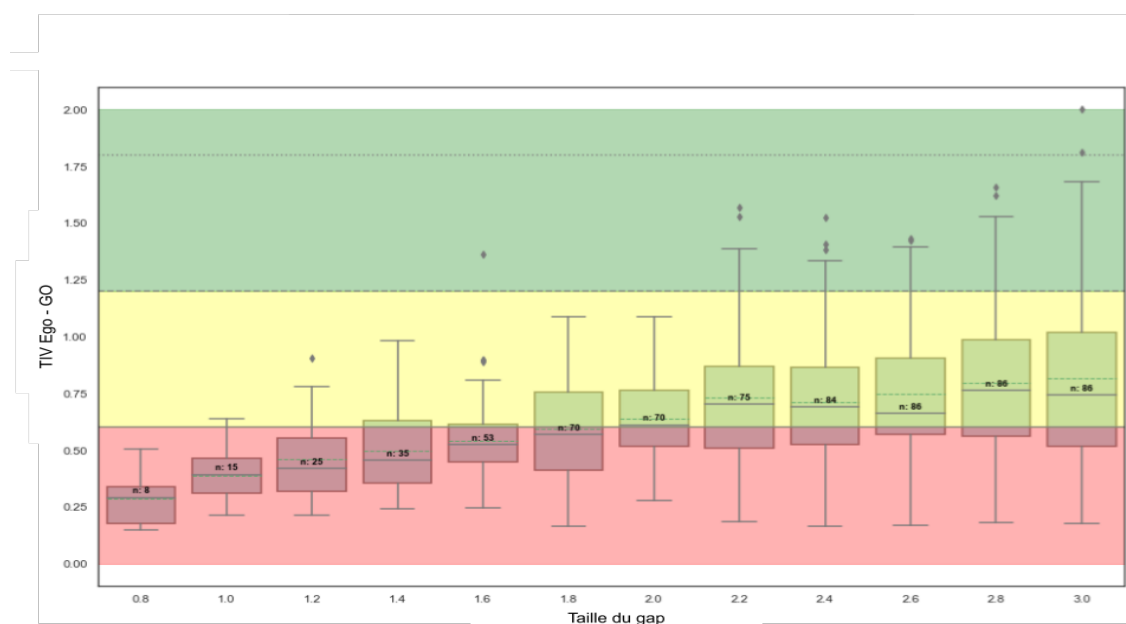


Figure 60 – Distribution TIV entre Ego et GO au moment du CDV suivant la taille des gaps

un gap de 2.0s pour que 50% des cas de CDV s'effectuent avec le véhicule GO dans la zone de menace du véhicule Ego, et non plus dans sa zone de danger. Enfin, nous constatons que même pour les espaces de grandes tailles, tels que les gaps de plus de 2.4s, moins de 75% des TIV sont supérieurs à 1.2s.

Considérons à présent le graphique de la figure 61 (p. 166) qui repose sur le même principe mais qui, cette fois, retranscrit la distribution des valeurs de TIV entre le véhicule fermant le gap (i.e. GC) et le véhicule Ego au moment de l'entrée dans la voie de destination. Ce nouveau graphique révèle une première information d'importance : le TIV entre GC et Ego au moment de l'entrée dans la voie de destination est croissant avec la taille du gap.

Lorsque nous observons la répartition des distributions suivant la taille des espaces, on constate que les participants ont, de manière générale, choisi de s'insérer avec un faible TIV avec le véhicule ouvrant le gap et un TIV croissant avec la taille de l'espace.

Dans la mesure où les TIV ne sont pas des valeurs bornées, nous avons procédé à l'estimation de modèles linéaires mixtes pour étudier l'association statistique entre les TIV au moment du franchissement de la ligne de séparation des voies et la taille des gaps. Concernant le TIV entre Ego et GO, nous obtenons une corrélation pour mesures répétées de ($r(221) = .64, p < .001$) dont l'intervalle de confiance à 95 % est : [0.55; 0.71]. La corrélation est donc significativement différente de 0, positive et moyenne. Le test de l'effet de la taille du gap sur la valeur de TIV entre le véhicule du participant et le véhicule ouvrant le gap aboutit également à un résultat significatif ($F(1, 224) = 158.58, p < .001$). Le test Kolmogorov-Smirnov (KS) de normalité des résidus se révèle proche de la significativité ($D = 0.08, p \approx 0.07$). Nous devons donc être prudents sur nos conclusions. Par ailleurs, le pseudo- R^2 fournit une valeur de variance expliquée de 19% ce qui est faible.

Concernant le TIV entre GC et Ego, nous obtenons une corrélation pour mesures répétées de ($r(221) = .97, p < .001$) dont l'intervalle de confiance à 95 % est : [0.96; 0.98]. La corrélation est

donc significativement différente de 0, positive et très élevée. Le test de l'effet de la taille du gap sur la valeur de TIV entre le véhicule du participant et le véhicule ouvrant le gap fournit un résultat confirmant un effet très significatif $F(1, 224) = 4112.9, p < .001$. Le test Kolmogorov-Smirnov (KS) de normalité des résidus se révèle non significatif ($D = 0.07, NS$). Par ailleurs, le pseudo- R^2 fournit une valeur de variance expliquée de 84%, ce qui est élevé.

Si les deux valeurs de TIV sont statistiquement significativement liées à la taille du gap, on constate toutefois clairement que le TIV entre le véhicule du conducteur et le véhicule ouvrant le gap est bien moins associé à la taille du gap que ne l'est le TIV entre le véhicule du participant et le véhicule fermant le gap. Cette tendance est confirmée par les données de distribution de position d'insertion dans le gap.

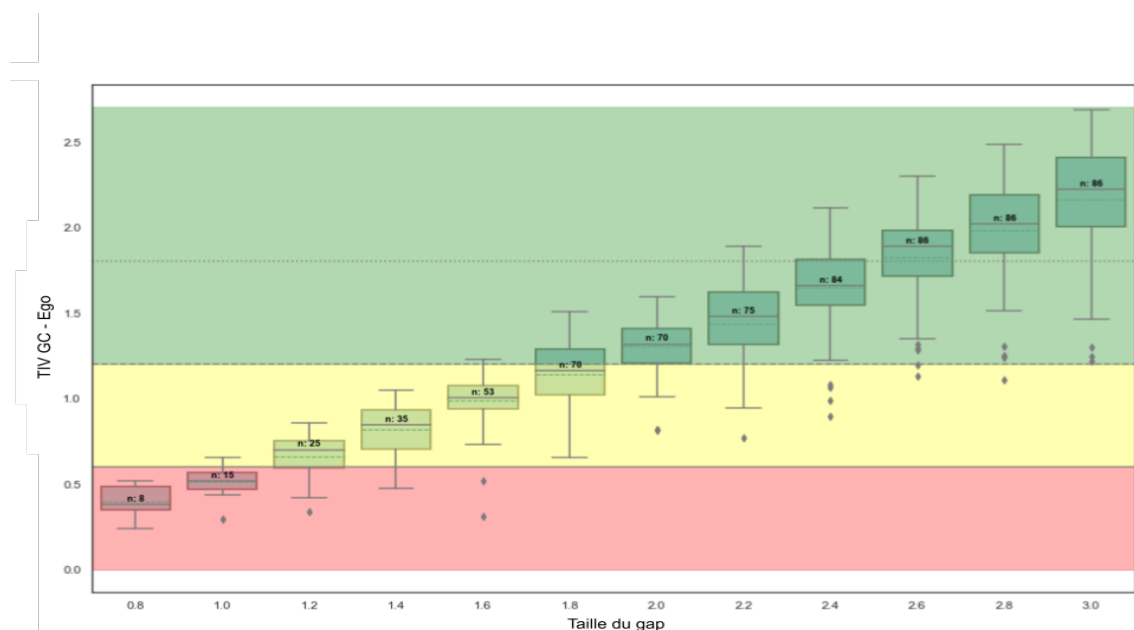


Figure 61 – Distribution des TIV entre GC et Ego au moment du CDV suivant la taille des gaps

Les représentations graphiques 62 (p. 167) et 63 (p. 167) montrent les modèles d'association entre la taille du gap et les TIV.

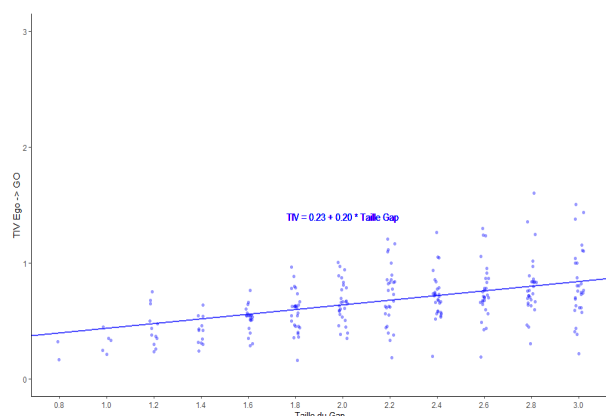


Figure 62 – modèle d’association entre la taille du gap et le TIV entre Ego et GO

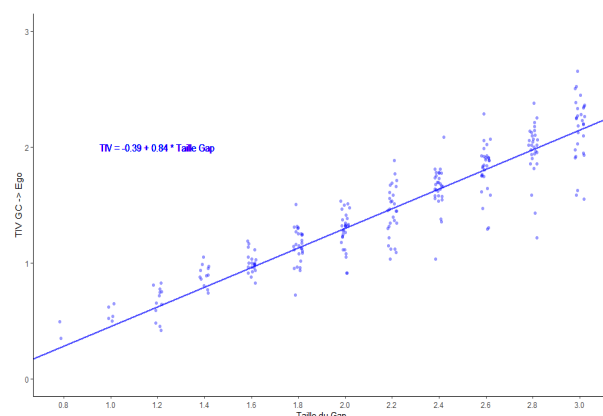


Figure 63 – modèle d’association entre la taille du gap et le TIV entre GC et Ego

7.2.3.2 Position d’insertion dans le gap

Afin de compléter l’information apportée par les précédentes analyses, les deux figures 64 (p. 167) et 65 (p. 167) présentent la distribution des positions d’insertion dans le gap au moment de l’entrée dans la voie de destination.

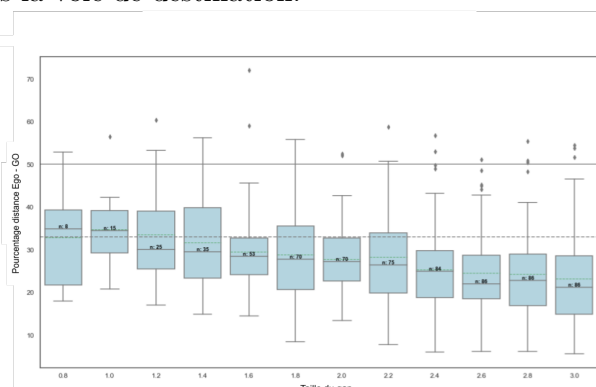


Figure 64 – Distribution des positions d’insertion dans le gap (en pourcentage de la taille du gap) par rapport à GO

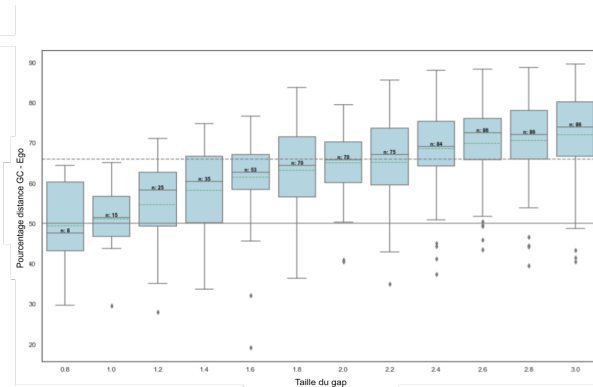


Figure 65 – Distribution des positions d’insertion dans le gap (en pourcentage de la taille du gap) par rapport à GC

Sur ces graphiques, la ligne horizontale continue indique la limite des 50 %, et les lignes en pointillés les limites de 33 % et 66 %. La représentation de la position d’insertion est convertie en pourcentage de la taille du gap, ce qui permet de comparer toutes les tailles d’espace d’insertion sur une même échelle. Ces figures, cohérentes avec celles représentant les TIV, indiquent clairement que **les participants ont une nette tendance à s’insérer dans le premier tiers du gap, quelle que soit la taille de celui-ci.**

Les limites de 1.4 s et 2.4 s, qui avaient été déterminées sur la base de l’hypothèse d’une insertion au centre du gap, sont donc ici infirmées par la position d’insertion dans l’espace. Nous pouvons également porter notre attention sur les nouvelles limites qui sont apparues

au cours de l'examen des données subjectives (i.e. 1.2 s et 2.0 s). Si rien ne semble transparaître au niveau des TIV avec le véhicule GO, ces bornes marquent les limites d'entrée du véhicule Ego dans les zone de menace et de sécurité de GC.

7.2.4 Synthèse des résultats concernant le changement de voie en conduite manuelle

Il nous faut maintenant dresser un premier bilan de la manœuvre de CDV au regard de nos résultats. Pour cela, nous reprendrons les principaux résultats pour décrire le déroulement de la manœuvre de CDV depuis les évaluations subjectives jusqu'à l'exécution de celle-ci, en passant par la prise de décision. Nous aurons ainsi une vision plus informée des réponses aux questionnements que nous avons posés dans notre problématique (section 5.3, p. 102).

Lors d'une situation de changement de voie potentiel par insertion dans un gap, les conducteurs qui ont pris part à notre étude ont subjectivement évalué le risque (appréhendé dans notre protocole par les jugements de criticité) et la difficulté à effectuer le changement de voie pour décider de l'exécuter ou non. Nous avons montré que, dans la mesure où la taille du gap variait entre des valeurs allant de 0.8 s et 3.0 s, les évaluations subjectives de risque et de difficulté variaient également. Ainsi, plus la taille du gap est grande, moins le risque subjectif et la difficulté sont évalués comme élevés. Trois cas de figure se sont alors présentés.

Si le gap est de taille inférieure à 1.2 s (exclu), alors dans la très grande majorité des cas, les conducteurs évaluent le CDV comme extrêmement risqué (i.e. criticité supérieure à 80) et tout autant difficile à effectuer. En conséquence, très peu de décisions de changement de voies sont prises (moins de 10%), et lorsque c'est le cas, au moins la moitié de ces décisions sont considérées comme des erreurs.

Si le gap est de taille supérieure à 2.0 s (exclu), alors la grande majorité des conducteurs évaluent le CDV comme très peu risqué (i.e. criticité inférieure à 20%) et tout aussi peu difficile à mettre en œuvre. Ces évaluations conduisent les participants à entreprendre le changement de voie dans plus de 80% des cas avec une proportion d'erreurs de décision négligeable.

Enfin, si le gap est de taille comprise entre 1.2 s (inclus) et 2.0 s (inclus), la décision des conducteurs varie suivant leurs estimations du risque subjectif et de difficulté du CDV. Dans cette plage de taille de gap, prennent place la plupart des seuils de décision (80%). C'est-à-dire que, progressivement, les conducteurs passent d'un refus systématique à une décision de CDV systématique. Nous avons pu mettre en évidence que pour les participants, au moment où l'évaluation subjective de risque et de difficulté du CDV passe d'une valeur supérieure à 60 à une valeur inférieure à 50, se produit un basculement de la décision se traduisant par une augmentation significative de la fréquence de CDV passant de 33% à près de 80%. Ce basculement de décision, se produit pour des tailles de gap différentes suivant les participants. Nous avons donc montré par ce biais, que les conducteurs prennent des décisions de CDV alors même que le risque subjectivement évalué est supérieur à zéro. Ce résultat s'inscrit donc dans la ligne des prédictions faites par la théorie de l'homéostasie du risque de Wilde tout en réfutant la ZRT. Nous avons même pu identifier ce qui semble s'apparenter au niveau de risque cible au travers de l'étude des évaluations de criticité pour les seuils de décision, et qui se matérialise

par le passage d'une estimation de criticité d'un niveau de plus de 60 à un niveau inférieur à 50.

Pour les situations au cours desquelles les décisions de CDV sont prises, le conducteur procède alors à l'exécution de la manœuvre. Pour cela, il détermine sa trajectoire pour aller rejoindre un point de destination situé au niveau du premier tiers du gap. Cette stratégie se traduit par un positionnement dans le premier tiers du gap au moment de l'insertion dans le gap et un TIV avec le véhicule ouvrant le gap (i.e. GO) inférieur à 0.6 s (i.e. zone de danger du participant) pour les gaps de faible taille et inférieur à 1.8 s (i.e. zone de menace du participant) pour les gaps de taille plus importante (i.e. supérieure à 2.0s). Les TIV avec le véhicule arrivant en arrière (i.e. GC) ont un profil différent. Ils augmentent de façon croissante avec la taille du gap. Pour cette mesure également, nous retrouvons la segmentation de la plage des tailles de gap décrite pour les évaluations subjectives. Ainsi, pour les gaps de taille inférieure à 1.2s (exclu), les TIV entre GC et le véhicule du participant sont inférieurs à 0.6 s (zone de danger) et pour les gaps de taille comprise entre 1.2s et 2.0s, les TIV sont compris entre 0.6 s et 1.2s (zone de menace). Enfin, pour les gaps de taille supérieure à 2.0s, les TIV sont supérieurs à 1.2s (i.e. zone de sécurité). Lors du CDV le conducteur doit procéder à une double gestion du risque puisqu'elle se fait par rapport au véhicule venant par l'arrière (GC) et par rapport au véhicule précédent (GO). Dans ces circonstances, il apparaît que le conducteur choisit de maximiser la sécurité avec le véhicule GC en acceptant un plus grand risque avec le véhicule GO. Parmi les trois stratégies d'insertions que nous avons postulées, celle du compromis équilibré n'est donc pas celle mise en œuvre par les conducteurs. La figure 66 (p. 169) illustre cette stratégie de maximisation de la sécurité arrière qui a été utilisée majoritairement par nos participants.

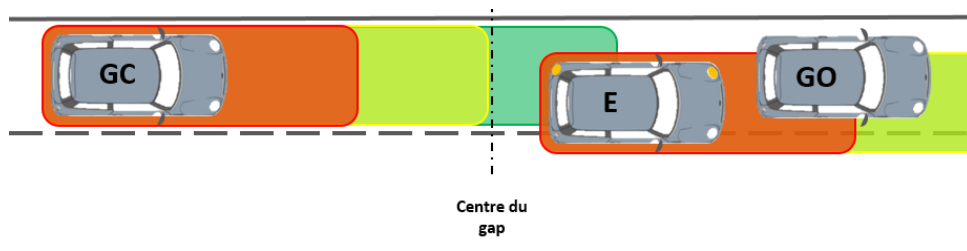


Figure 66 – Stratégie d'insertion dans un gap utilisée par les participants

7.3 Volet 2 : Résultats concernant l'utilisation du système de changement de voie automatisé *Human-like*

Dans cette section de présentation des résultats, nous nous intéressons aux situations de conduite autonome. Nous suivrons le même ordre de présentation des résultats que pour la section précédente, les analyses comparatives étant intégrées au fur et à mesure. Contrairement à la procédure suivie pour le traitement de la plupart des données lors de la phase précédente, les erreurs rapportées par les participants n'ont pas été retirées des données. En effet, celles-ci ne renvoient pas à une auto-évaluation de leur propre performance et de leur décision, mais à une évaluation de celles du système de CDV automatisé. Pour ce qui est des autres aspects des procédures d'analyses statistiques, les méthodes et tests employés sont les mêmes que pour les données du volet de conduite manuelle.

7.3.1 Criticité de la situation

Dans cette partie, nous nous intéressons aux évaluations de criticité de la situation fournies par les participants lors de la phase de conduite autonome. Nous cherchons au travers de cette mesure à étudier l'évolution de l'évaluation subjective de la criticité des différentes situations de CDV, en condition d'utilisation d'un système de changement de voie automatisé. Nous commencerons par une présentation spécifique des données criticité pour cette partie de l'expérimentation, puis nous procéderons à une comparaison entre celles-ci et les données issues de la phase de conduite manuelle.

7.3.1.1 Criticité en situation de CDV automatisé

La représentation graphique 67 (p. 170) présente la distribution des évaluations de criticité suivant la taille du gap, en CDV automatisé.

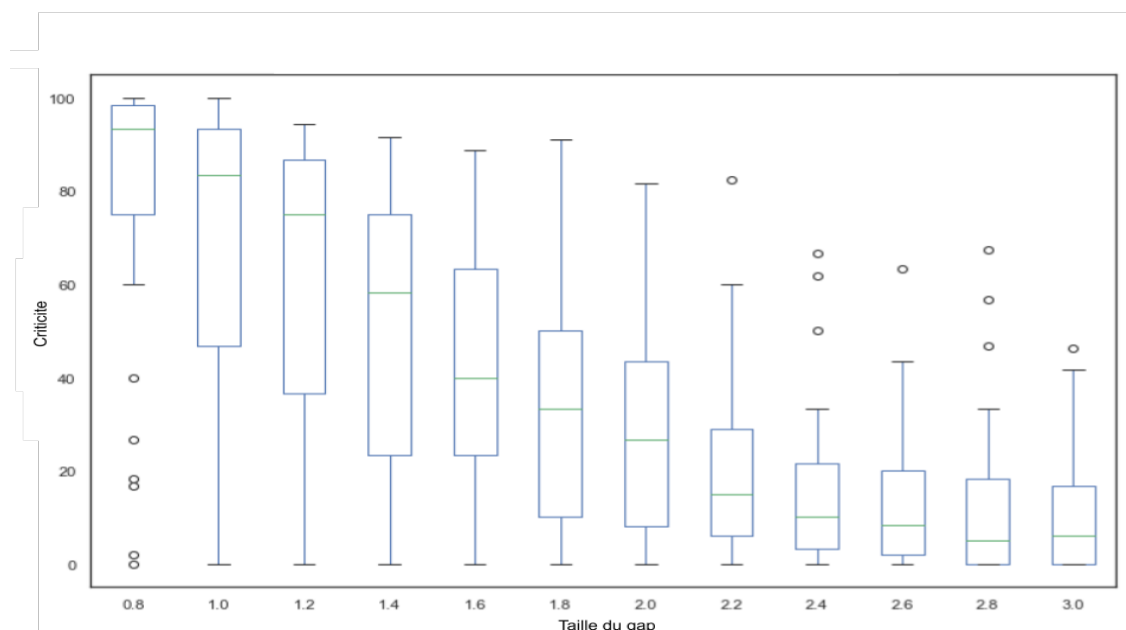


Figure 67 – Distribution des moyennes de criticité en mode automate activé, suivant la taille des gaps

L'examen visuel de la distribution laisse envisager la persistance d'une association entre la taille du gap et la criticité évaluée. Les analyses statistiques nous le confirment, en indiquant un lien d'association très significatif ($\chi^2(1) = 967.18, p < .001$). Le pseudo- R^2 fournit une valeur de variance expliquée de 73% et la puissance du test est de 100% avec l'intervalle de confiance suivant : 95%IC [99.63, 100]. La représentation graphique 68 (p. 171) illustre le modèle d'association entre la criticité et la taille du gap. Nous constatons donc que plus le gap est petit, plus la criticité monte.

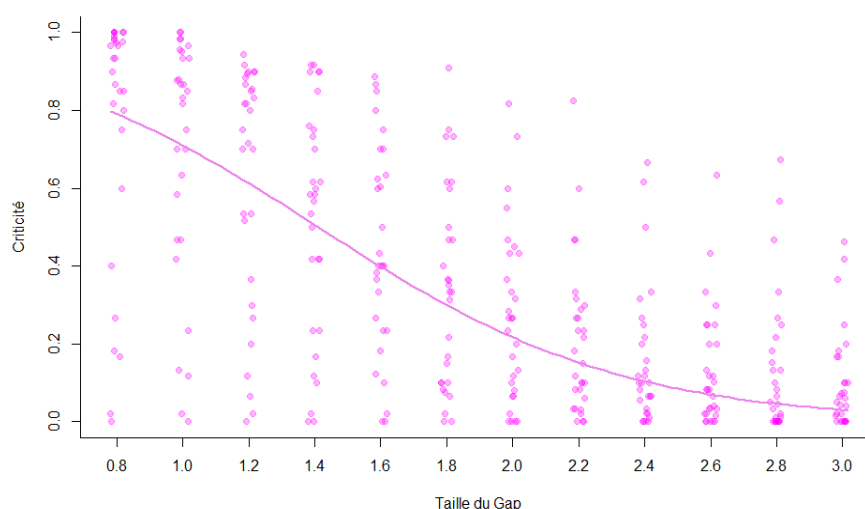


Figure 68 – Modèle d'association entre la criticité et la taille du gap en conduite avec automatisations du CDV

7.3.1.2 Effet du mode de conduite manuel ou automatisé sur la criticité

La représentation graphique 69 (p. 172) présente la distribution comparative des évaluations de criticité suivant la taille du gap, en mode autonome et en mode manuel.

Visuellement, les deux distributions semblent très similaires. Toutefois, le lecteur pourra constater un élargissement de la distribution des valeurs de criticité pour les gaps de 1.0 s et 1.2 s. **Il semble que pour ces espaces, la criticité soit régulièrement évaluée comme moins importante en mode autonome qu'en mode manuel.** Pour tester cette tendance, un GLMM avec test d'interaction a été effectué. Si l'effet général de la taille du gap sur l'évaluation de criticité est maintenu, ($\chi^2(1) = 684.49, p < .001$), un effet du mode de conduite apparaît également, ($\chi^2(1) = 16.38, p < .001$). Cet effet simple est associé à un effet d'interaction ($\chi^2(1) = 16.38, p < .001$). Le pseudo- R^2 fournit une valeur de variance expliquée de 80% pour l'ensemble du modèle, de 4% pour le facteur mode de conduite et de 3% pour l'interaction. La puissance du test est de 100% pour tous les effets avec l'intervalle de confiance suivant : 95%IC [99.63, 100]. La représentation graphique 70 (p. 173) présente les modèles d'association entre la taille du gap et la criticité suivant le mode de conduite.

L'effet d'interaction observé ici, révèle une association différente entre la taille du gap et la criticité suivant le mode de conduite. L'impression visuelle fournie par la figure 70 (p. 173) est donc ici confirmée statistiquement. **Elle illustre les différences entre les modèles d'association de la criticité et**

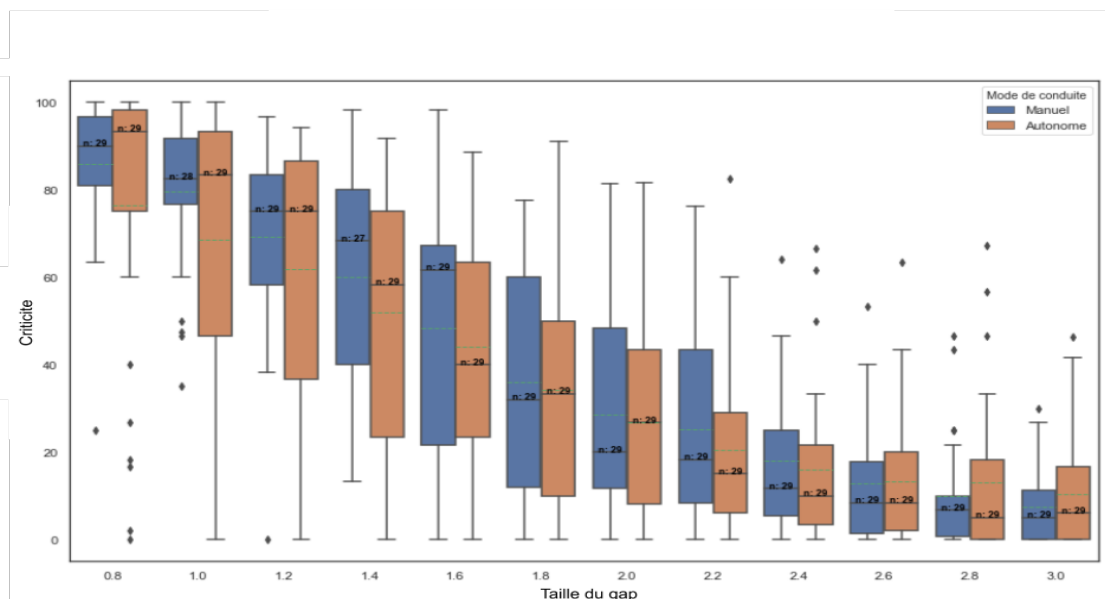


Figure 69 – Distribution comparative des moyennes de criticité suivant la taille des gaps en mode automatisé et en mode manuel

de la taille du gap, suivant le mode de conduite (les codes couleurs étant les même que pour les effets simples).

7.3.2 Évaluation de la difficulté du changement de voie

Comme pour les situations de conduite manuelle du premier volet expérimental, à chaque CDV effectué par l'automate, le conducteur devait indiquer à quel point le changement de voie aurait été difficile à faire s'il avait dû l'exécuter lui-même manuellement. Nous pouvons également nous interroger sur l'évolution de cette évaluation, plus particulièrement en considérant le fait que le système procédait à une insertion dans tous les espaces.

7.3.2.1 Association entre la taille du gap et la difficulté

Le graphique 71 (p. 173) présente la distribution de ces évaluations de difficulté suivant la taille du gap.

Les analyses statistiques indiquent ici également, un lien d'association très significatif ($\chi^2(1) = 991.82, p < .001$). Le pseudo- R^2 fournit une valeur de variance expliquée de 75% et la puissance du test est de 100% avec l'intervalle de confiance suivant : 95%IC [99.63, 100]. La représentation graphique 72 (p. 174) illustre le modèle d'association entre la la difficulté et la taille du gap.

7.3.2.2 Effet du mode de conduite sur la difficulté estimée

Comparons maintenant les distributions d'évaluations de difficultés suivant la taille du gap et le mode de conduite, comme illustrées par la figure 73 (p. 174)

Comme pour la criticité, nous constatons visuellement une possible « diminution » de la diffi-

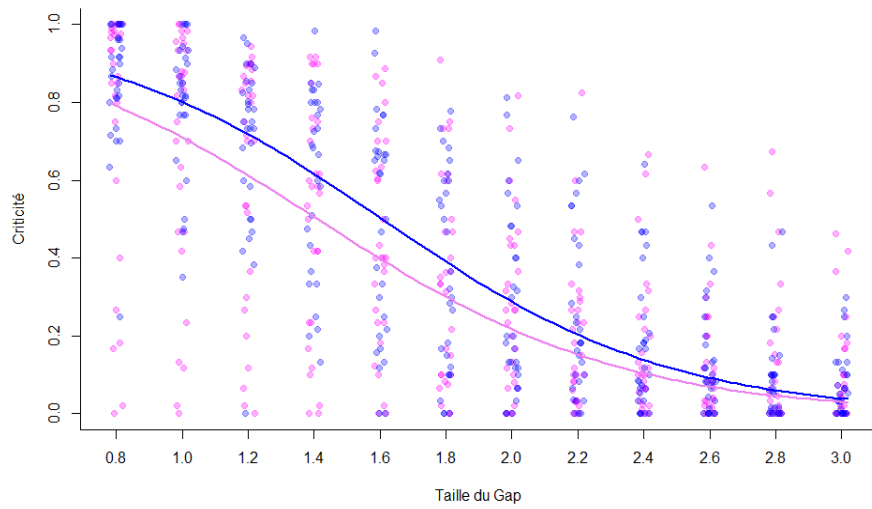


Figure 70 – Modèles d'association entre la criticité et la taille du gap suivant le mode de conduite

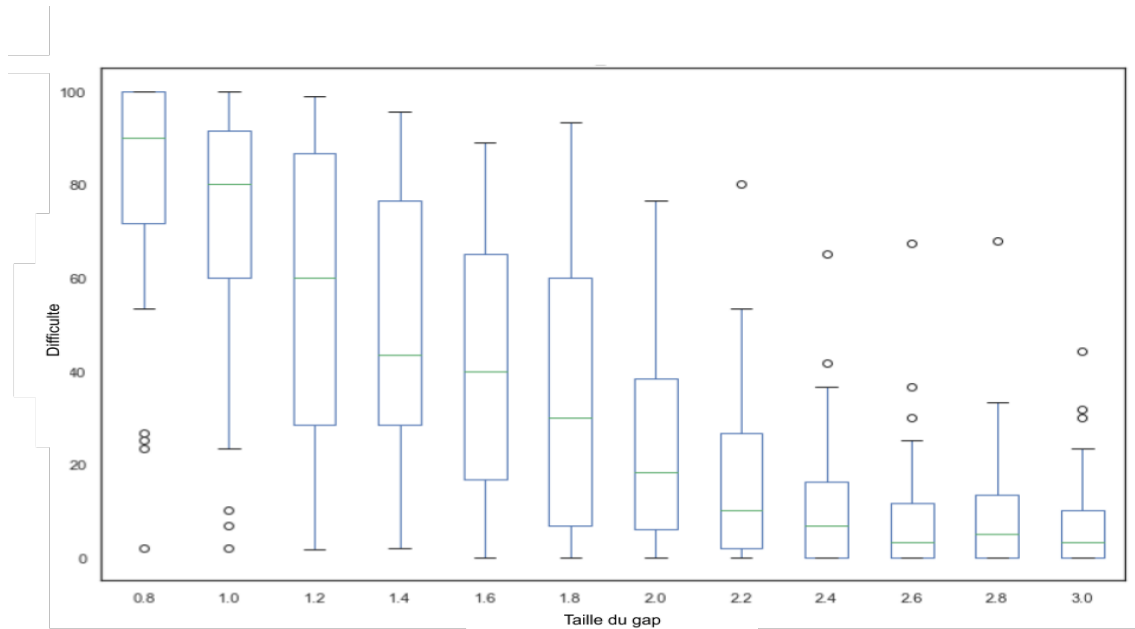


Figure 71 – Distribution comparative des moyennes de difficulté suivant la taille des gaps, en mode de CDV automatisé

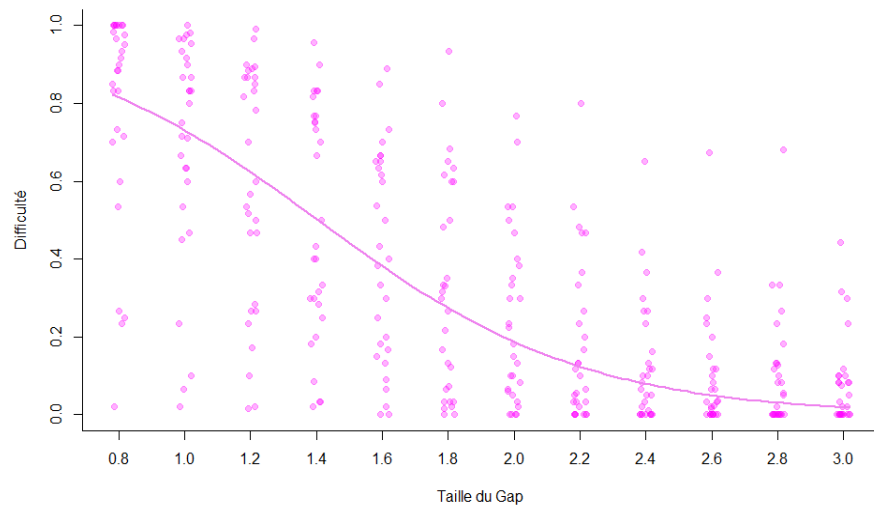


Figure 72 – Modèles d'association entre la difficulté et la taille du gap suivant le mode de conduite

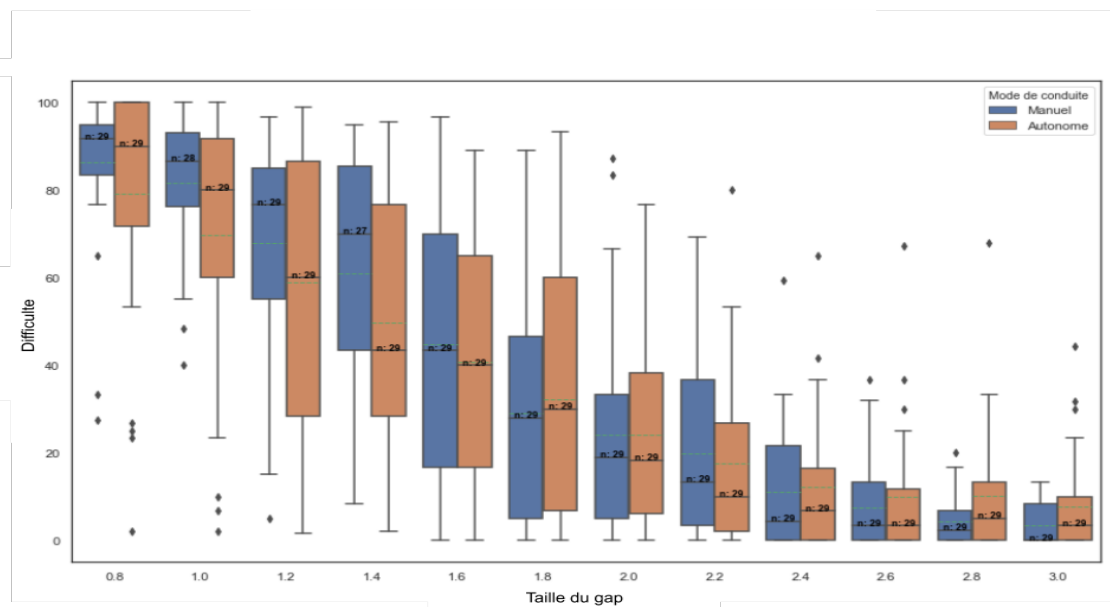


Figure 73 – Distribution comparative des moyennes de difficulté suivant la taille des gaps et le mode de conduite

culté évaluée à effectuer les CDV, lors du passage du mode manuel au mode automatisé, et ce particulièrement pour les gaps de très faible taille (i.e. 0.8 s, 1.0 s, 1.2 s et 1.4 s). Les analyses d'interaction indiquent bien la présence des deux effets principaux, (1) de taille du gap $\chi^2(1) = 706.51, p < .001$, (2) de mode de conduite $\chi^2(1) = 39.39, p < .001$, ainsi que, (3) de l'effet d'interaction $\chi^2(1) = 33.63, p < .001$. Le calcul des pseudo- R^2 fournit une valeur de variance expliquée de 81% pour l'ensemble du modèle, de 7% pour le facteur mode de conduite, et de 6% pour l'interaction. La puissance du test est de 100% pour tous les effets avec l'intervalle de confiance suivant : 95%IC [99.63, 100].

L'effet d'interaction observé ici révèle une association différente entre la taille du gap et la criticité suivant le mode de conduite. L'impression visuelle fournie par la figure 74 (p. 175) est donc ici confirmée statistiquement. Elle illustre les différences entre les modèles d'association de la criticité et de la taille du gap, suivant le mode de conduite (les codes couleurs étant les mêmes que pour les effets simples).

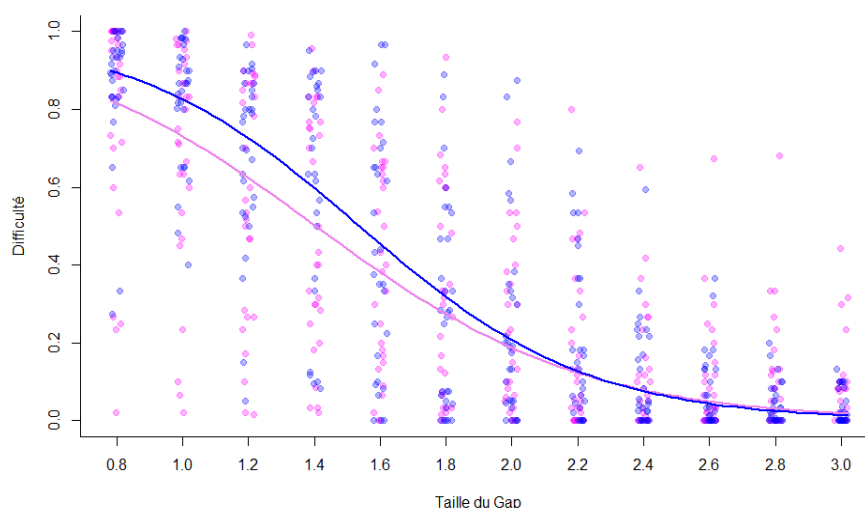


Figure 74 – Modèles d'association entre la difficulté et la taille du gap suivant le mode de conduite

7.3.2.3 Association entre la criticité et la difficulté des manœuvres de CDV

Comme dans le cas de la conduite manuelle, nous pouvons explorer la relation qu'entretiennent les valeurs de criticité et de difficulté estimées pour toutes les tailles de gap confondues. Là encore, nous plaçons la variable difficulté en tant que facteur explicatif de la variable criticité. Les analyses statistiques indiquent alors un lien d'association très significatif ($\chi^2(1) = 1398.97, p < .001$). Le pseudo- R^2 fournit une valeur de variance expliquée de 86% et la puissance du test est de 100% avec l'intervalle de confiance suivant : 95%IC [99.63, 100]. La représentation graphique 75 (p. 176) illustre le modèle d'association entre la la criticité et la difficulté.

Comme pour les données précédentes, nous pouvons étudier les effets du mode de conduite sur cette association entre la criticité et la difficulté. L'analyse d'interaction nous confirme un effet principal de la variable difficulté ($\chi^2(1) = 1421.92, p < .001$), mais révèle un effet légèrement moins significatif du mode de conduite ($\chi^2(1) = 9.59, p < .01$), ainsi qu'un effet d'interaction qui peine à atteindre le seuil

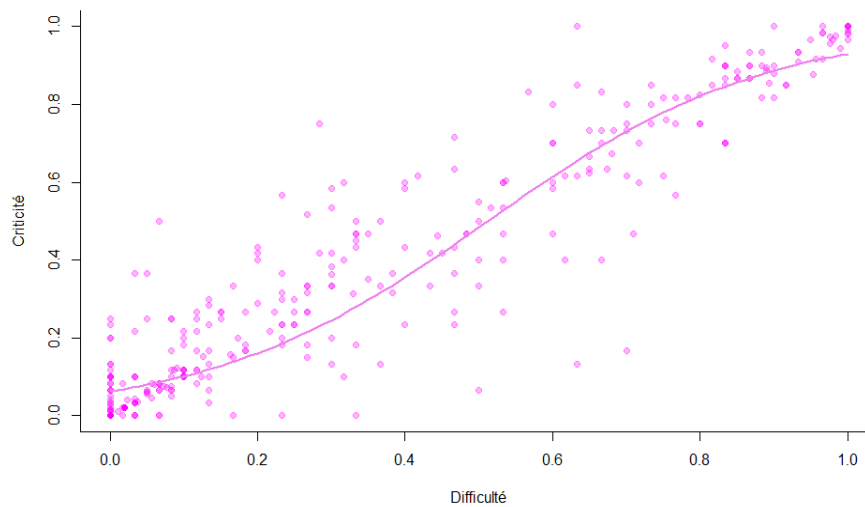


Figure 75 – Modèle d’association entre la criticité et la difficulté en conduite automatisée

minimal de 5% ($\chi^2(1) = 5.88, p < .05$). Les pseudo- R^2 indiquent une valeur de variance expliquée de 90% pour l’ensemble du modèle, mais de 2% seulement pour le facteur mode de conduite, et de 1% pour l’interaction. La puissance du test est de 100% pour tous les effets avec l’intervalle de confiance suivant : 95%IC [99.63, 100].

La représentation graphique 76 (p. 177) des modèles traduisent bien cette étroite association ainsi que la potentielle « *faiblesse* » de l’interaction.

En conduite manuelle, comme en conduite avec système d’automatisation du CDV, les participants ont évalué que le CDV était d’autant plus critique qu’il leur semblait difficile à effectuer par eux-même. La difficulté, comme la criticité sont évaluées comme légèrement moins élevées pour les petits gaps lorsque le système de CDV automatisé est activé. Il apparaît enfin que ce lien qui associe la difficulté et la criticité est très légèrement affecté par le mode de conduite utilisé (manuel ou automatisé).

7.3.3 Acceptation du système de CDV automatique

Examinons maintenant les données relatives à l’acceptation par les participants, du système de CDV automatisé, suivant la taille des gaps, puis suivant le mode de conduite et enfin dans son association avec d’autres variables potentiellement explicatives.

7.3.3.1 Association entre la taille du gap et l’acceptation de l’automatisation

Dans un premier temps, comme pour le volet de conduite manuelle, regardons la distribution des évaluations d’acceptation du système de CDV automatisé par les participants, suivant la taille de l’espace d’insertion. Cette distribution est illustrée par le graphique 77 (p. 177).

Comme pour les données issues du premier volet expérimental, une association entre la taille du gap et les valeurs d’acceptation semble exister. Les tests statistiques indiquent un lien d’association

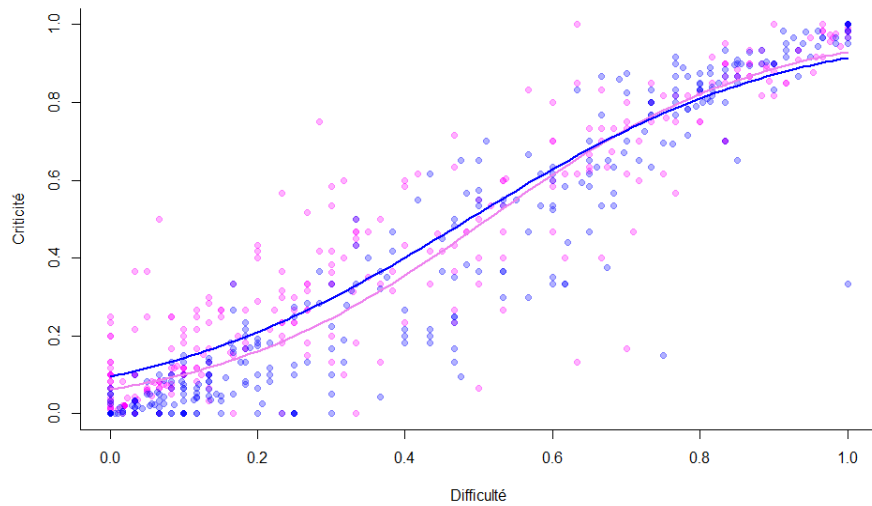


Figure 76 – Modèle d'association entre la criticité et la difficulté suivant le mode de conduite

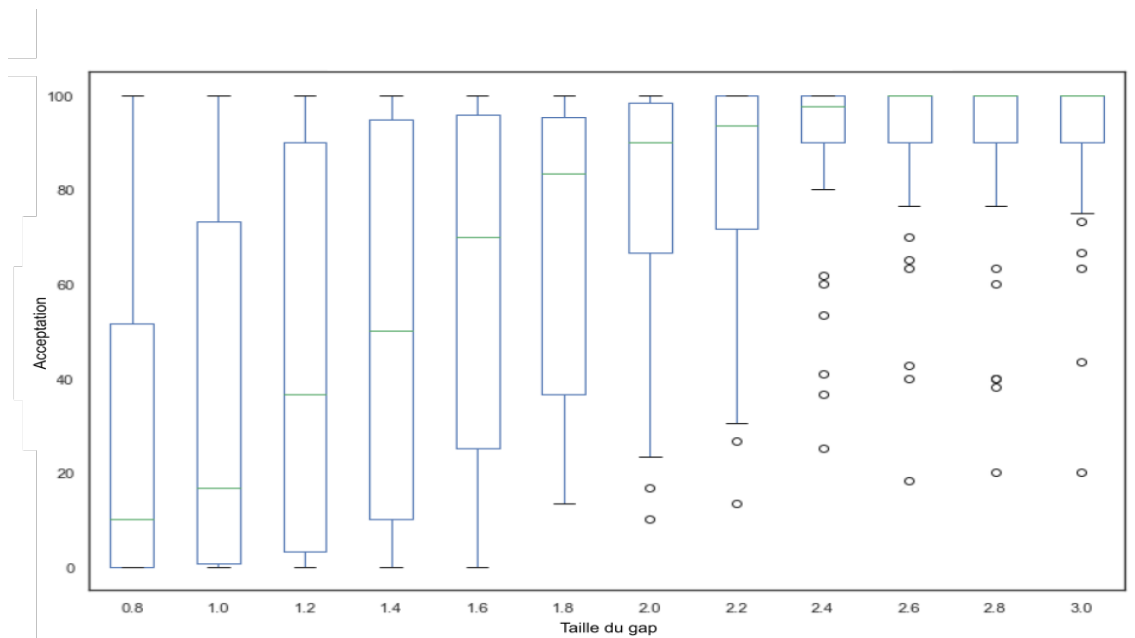


Figure 77 – Distribution comparative des moyennes d'acceptation suivant la taille des gaps en conduite avec CDV automatisé

très significatif ($\chi^2(1) = 527.53, p < .001$). Le pseudo- R^2 fournit une valeur de variance expliquée de 55% et la puissance du test est de 100% avec l'intervalle de confiance suivant : 95%*IC* [99.63, 100]. La représentation graphique 78 (p. 178) illustre le modèle d'association entre la l'acceptation et la taille du gap.

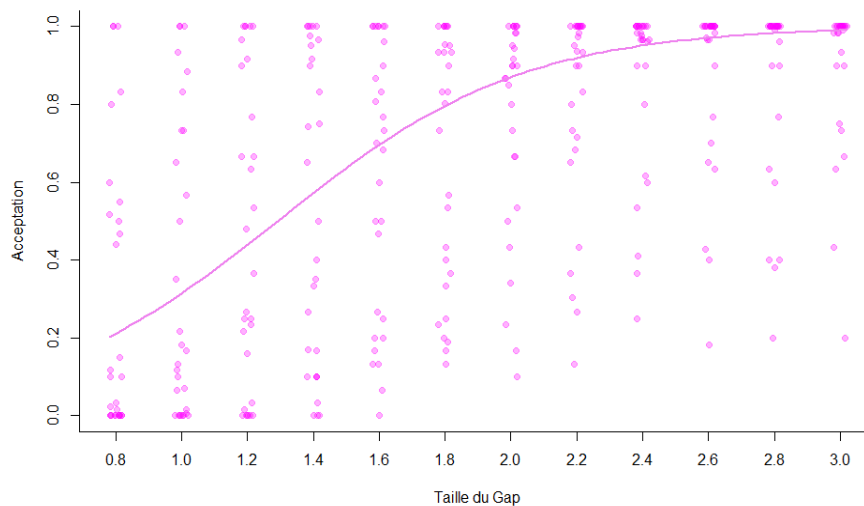


Figure 78 – Modèle d'association entre l'acceptation et la taille du gap en conduite automatisée

7.3.3.2 Effet du mode de conduite sur l'acceptation du CDV automatisé

Voyons à présent comment évoluent la relation entre l'acceptabilité / acceptation en fonction du mode de conduite. La figure 79 (p. 179) synthétise ces données.

Les analyses d'interaction confirment les deux effets principaux, de taille du gap ($\chi^2(1) = 446.28, p < .001$), de mode de conduite ($\chi^2(1) = 77.71, p < .001$), ainsi que l'effet d'interaction ($\chi^2(1) = 42.41, p < .001$). Le calcul des pseudo- R^2 fournit une valeur de variance expliquée de 71% pour l'ensemble du modèle, de 10% pour le facteur mode de conduite et de 6% pour l'interaction. La puissance du test est de 100% pour tous les effets avec l'intervalle de confiance : 95%*IC* [99.63, 100].

Les données sont donc en faveur d'une modification générale et positive des évaluations de l'acceptation dans le contexte du mode de conduite avec CDV automatisé, en comparaison du mode manuel. Cette augmentation de l'acceptation par rapport à l'acceptabilité se manifeste plus particulièrement pour les petits espaces et les espaces de taille moyenne (i.e. jusqu'à 1.6 s). Le graphique 80 (p. 179) traduit cette tendance en illustrant l'évolution des modèles suivant le mode de conduite.

7.3.3.3 Association entre la criticité et l'acceptation du CDV automatisé

Regardons également la relation qu'entretiennent les valeurs de criticité et d'acceptation estimées pour chaque taille de gap. Pour ces analyses, nous plaçons la criticité comme facteur explicatif et l'acceptation comme facteur expliqué. Les statistiques mettent en évidence un lien d'association très

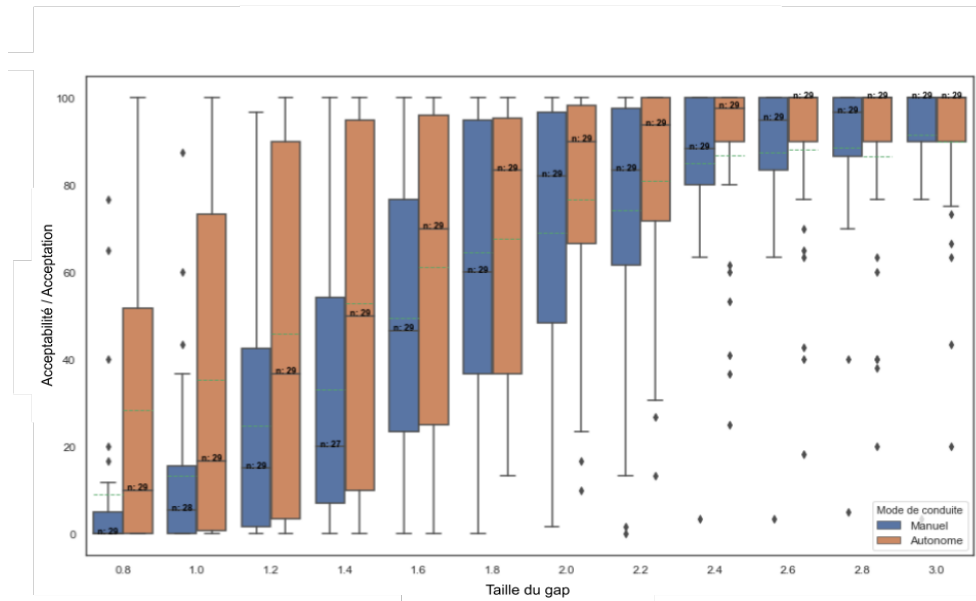


Figure 79 – Distribution comparative des moyennes d'acceptation suivant la taille des gaps et le mode de conduite

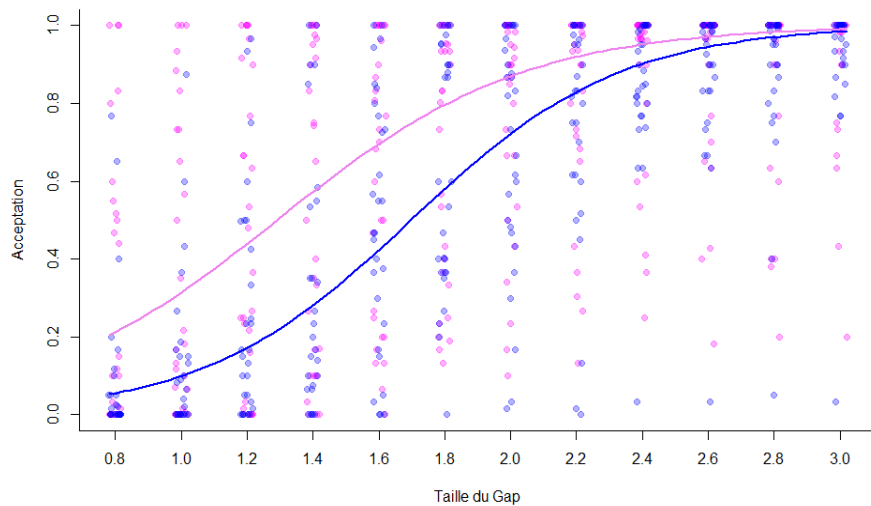


Figure 80 – Modèle d'association entre l'acceptation et la taille du gap en conduite automatisée

significatif ($\chi^2(1) = 1137.27, p < .001$). Le pseudo- R^2 fournit une valeur de variance expliquée de 80% et la puissance du test est de 100% avec l'intervalle de confiance suivant : 95%IC [99.63, 100]. La représentation graphique 81 (p. 180) illustre le modèle d'association entre la l'acceptation et la taille du gap.

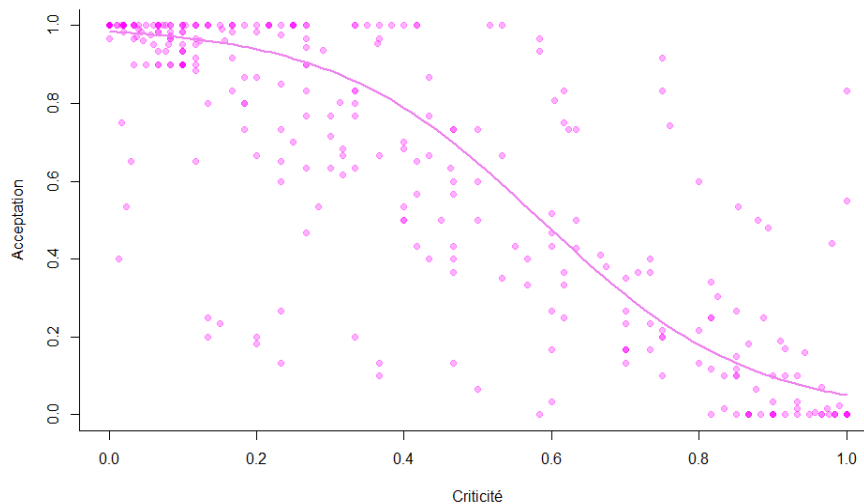


Figure 81 – Modèle d'association entre l'acceptation et la criticité en conduite avec automate

Lorsque nous examinons l'évolution du lien entre la criticité et l'acceptation du CDV automatisé suivant le mode de conduite, nous pouvons produire une analyse d'interaction identifiant les deux effets principaux de taille du gap ($\chi^2(1) = 654.73, p < .001$) et de mode de conduite ($\chi^2(1) = 10.97, p < .001$). En revanche, l'effet d'interaction ($\chi^2(1) = 1.13, NS$) se révèle non significatif. Le calcul des pseudo- R^2 fournit une valeur de variance expliquée de 78% pour l'ensemble du modèle, de 65% pour le facteur criticité et de 2% pour le facteur mode de conduite. La puissance du test est de 100% pour tous les effets avec l'intervalle de confiance : 95%IC [99.63, 100]. Il apparaît donc que l'association entre la criticité et l'acceptation existe, quel que soit le mode de conduite, sans toutefois être modifié par la variation de ce dernier. Le graphique 82 (p. 181) permet de comparer les modèles estimés.

L'examen visuel des modèles montre que si la relation qu'entretennent la criticité et l'acceptation conserve la même forme entre le mode de conduite manuelle et le mode de conduite avec système d'automatisation du CDV, on remarque toutefois que pour le mode automatisé, la courbe semble décalée vers la droite. Ce décalage peut se traduire en ces termes : pour un niveau de criticité donnée, l'acceptation sera plus élevée que l'acceptabilité. Ainsi, pour deux changements de voie (un manuel et un automatisé) ayant reçu le même niveau de criticité, le CDV automatisé sera mieux accepté que prévu lors d'un changement de voie.

7.3.4 Maîtrise de la situation par l'automate

Parmi les questions post-situationnelles du volet de conduite automatisée, il était demandé aux participants d'évaluer la maîtrise de la situation par l'automate. Cette question présente un intérêt dans

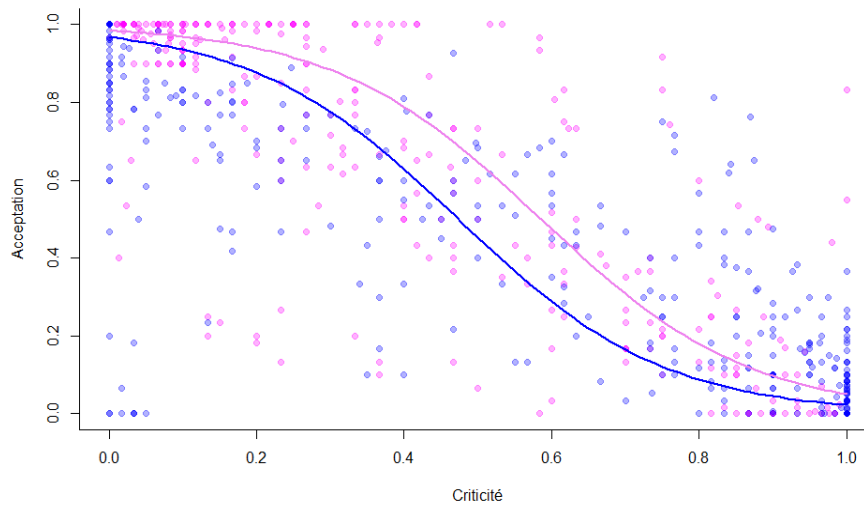


Figure 82 – Modèle d’association entre l’acceptation et la criticité en suivant le mode de conduite

la mesure où elle nous renseigne sur la manière dont l’utilisateur considère les décisions et agissements du système de CDV automatisé.

7.3.4.1 Maîtrise de la situation selon la taille du gap

La distribution de ces évaluations est présentée dans le graphique 83 (p. 182).

Nous constatons visuellement que la maîtrise de la situation est généralement considérée comme très élevée, à l’exception des CDV effectués pour des gaps de taille très faible, pour lesquels l’évaluation de la maîtrise tend à descendre, tout en conservant une valeur moyenne supérieure à 50. L’association entre la taille du gap et l’évaluation subjective de maîtrise de la situation est très significative ($\chi^2(1) = 389.85, p < .001$). Le pseudo- R^2 fournit toutefois une valeur de variance expliquée de 36%, ce qui est relativement faible. La puissance du test est de 100% avec l’intervalle de confiance suivant : 95%IC [99.63, 100]. La représentation graphique 84 (p. 182) illustre le modèle d’association entre la maîtrise de la situation et la taille du gap en conduite autonome.

7.3.4.2 Criticité selon la maîtrise de la situation

Nous pouvons nous poser la question d’un éventuel lien entre la criticité évaluée et le jugement de maîtrise de la situation par l’automate. Nous pouvons par exemple supposer que la qualité de la maîtrise de la situation par l’automate va influencer sur l’évaluation de la criticité du CDV. Si nous plaçons la criticité en tant que variable expliquée et la maîtrise de la situation en tant que variable explicative, nous obtenons une association significative : ($\chi^2(1) = 344.75, p < .001$). Le pseudo- R^2 fournit une valeur de variance expliquée de 77% avec une puissance du test de 100% et d’intervalle de confiance à 95%IC [99.63, 100]. La représentation graphique 85 (p. 183) illustre le modèle d’association entre la criticité et la maîtrise de la situation.

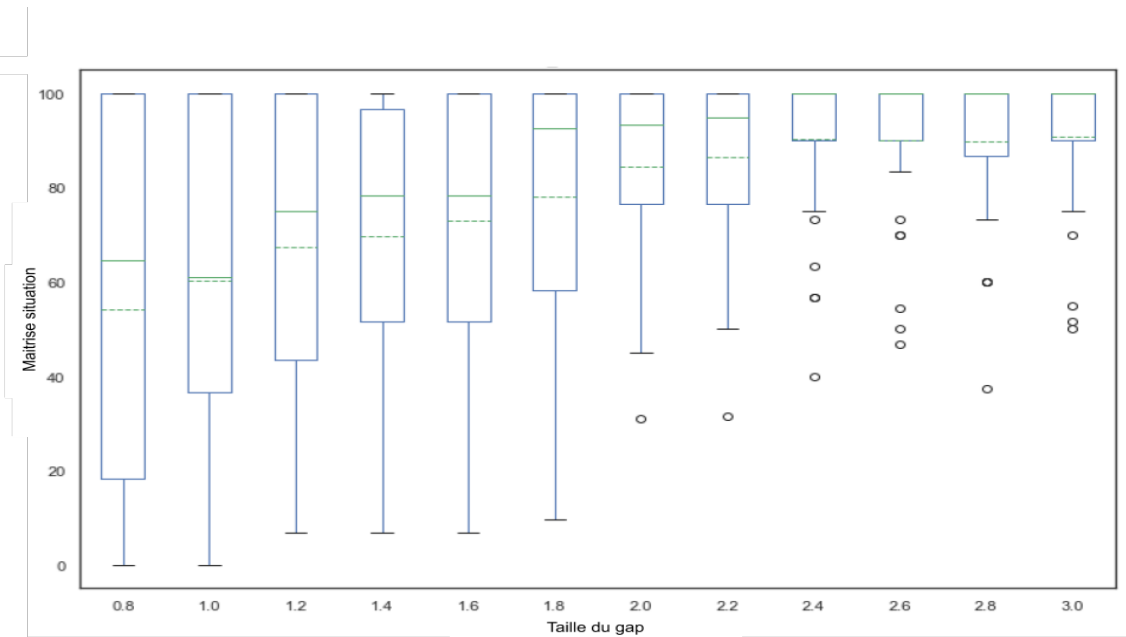


Figure 83 – Distribution des moyennes de maîtrise de la situation de conduite suivant la taille des gaps en conduite avec système d’automatisation du CDV

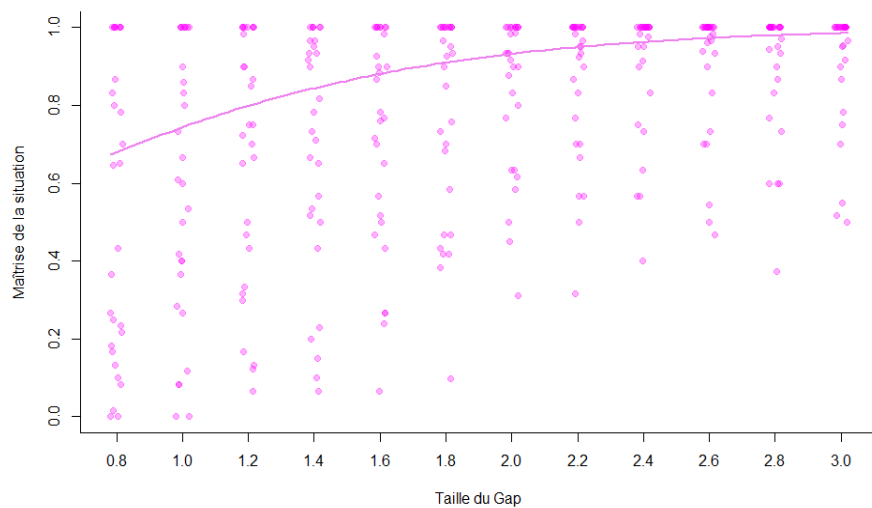


Figure 84 – Modèle d’association entre la maîtrise de la situation et taille des gaps en conduite automatisée

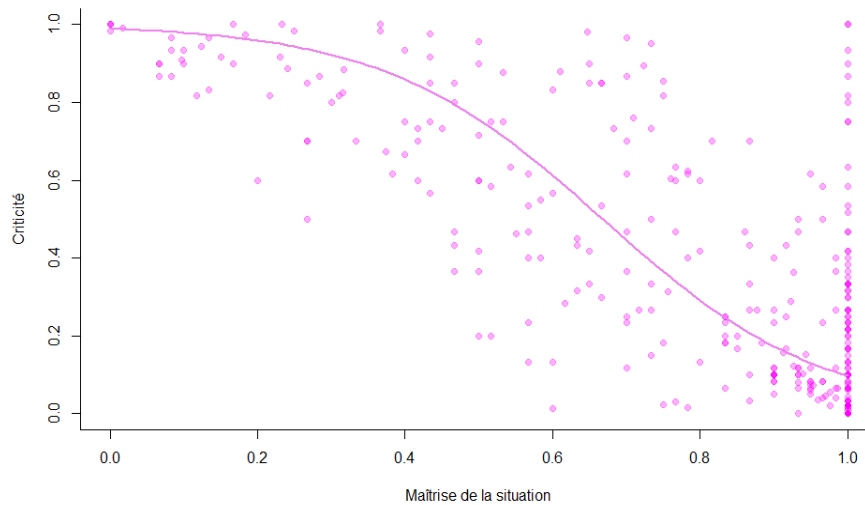


Figure 85 – Modèle d’association entre la maîtrise de la situation et la criticité en conduite automatisée

Notons deux éléments remarquables dans cette représentation graphique. Le premier concerne le fait que des évaluations de maîtrise de la situation maximale (i.e. 100) existent pour tous les niveaux de criticité. Le second concerne le lien entre la maîtrise de la situation et la criticité en elle-même. On constate assez aisément que la criticité monte très rapidement pour une faible perte de maîtrise de la situation. Ainsi, par exemple, pour une maîtrise de la situation inférieure à 50 la criticité sera supérieure à 75. De même, le passage d’une maîtrise de la situation de 100 à 50 est associé à une augmentation de la criticité de 15 à 75. **Autrement dit les participants avaient tendance à estimer que la criticité du CDV devenait rapidement très élevée dès qu’ils jugeaient que l’assistance perdait, même faiblement, la maîtrise de la situation.**

7.3.4.3 Acceptation selon la maîtrise de la situation

De la même manière, nous pouvons étudier les liens qu’entrelient l’évaluation d’acceptation et la maîtrise de la situation par le système de CDV automatisé. Nous plaçons ici également la variable maîtrise de la situation en tant que variable explicative, et la variable acceptation en tant que variable expliquée. Nous constatons alors une association très significative entre ces deux variables ($\chi^2(1) = 372.75, p < .001$). Le pseudo- R^2 fournit une valeur de variance expliquée de 78% avec une puissance du test de 100% et d’intervalle de confiance à 95% IC [99.63, 100]. La représentation graphique 86 (p. 184) illustre le modèle d’association entre la criticité et la maîtrise de la situation.

Là encore, nous pouvons noter le même type de relation qu’entre la criticité et la maîtrise de la situation. En effet, ici aussi, la maîtrise peut être considérée comme maximale, même pour un niveau d’acceptation très faible. Nous notons également qu’en dessous d’une maîtrise estimée à 50, l’acceptation sera inférieure à 20.

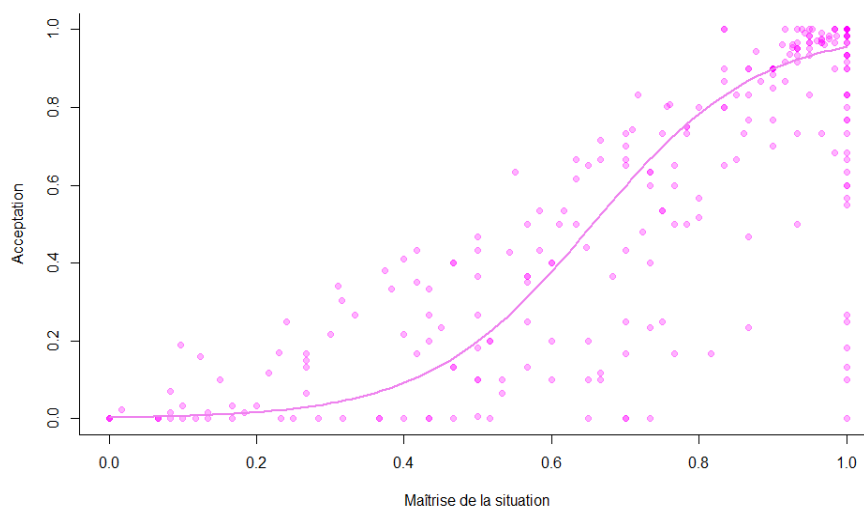


Figure 86 – Modèle d’association entre la maîtrise de la situation et l’acceptation en conduite automatisée

7.3.5 Confiance dans l’automate

L’une de nos questions de recherche portait sur la confiance que les conducteurs portent au système de CDV automatisé dont ils font l’expérience, nous nous intéressons également au lien qu’entretiennent ces évaluations de confiance et les autres évaluations subjectives produites.

7.3.5.1 Association entre la confiance et la taille du gap

La représentation graphique 87 (p. 185) présente la distribution de ces évaluations suivant la taille du gap.

Les analyses statistiques révèlent un lien fortement significatif ($\chi^2(1) = 463.27, p < .001$). Le pseudo- R^2 fournit une valeur de variance expliquée de 55% ce qui est relativement moyen. La puissance du test étant de 100% et d’intervalle de confiance à 95%IC [99.63, 100]. La représentation graphique 88 (p. 185) illustre le modèle d’association entre la confiance et la taille du gap.

Nous remarquons ici que la relation entre la confiance dans l’assistance et la taille du gap semble très similaire à celle qui associe l’acceptation à la taille du gap.

7.3.5.2 Association entre la confiance et l’acceptation du CDV automatisé

Intéressons-nous donc à la relation qu’entretiennent l’acceptation du système de CDV automatisé et la confiance qui lui est accordée. Nous plaçons ici l’acceptation en tant que facteur explicatif et la confiance en tant que facteur expliqué. L’analyse statistique établit un lien très significatif entre ces deux variables : ($\chi^2(1) = 1497.05, p < .001$). Le pseudo- R^2 fournit une valeur de variance expliquée très élevée de 90%, la puissance du test étant ici encore de 100% et d’intervalle de confiance à 95%IC [99.63, 100]. La représentation graphique 89 (p. 186) illustre le modèle d’association entre la confiance et l’acceptation.

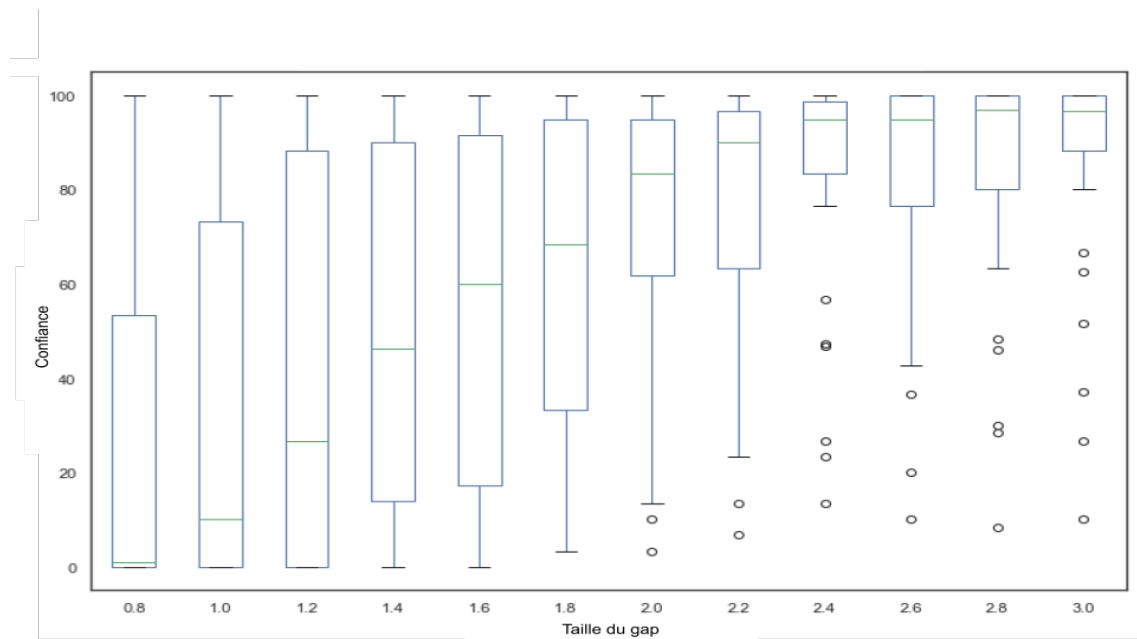


Figure 87 – Distribution des moyennes de confiance en l’assistance suivant la taille des gaps (en conduite automatisée)

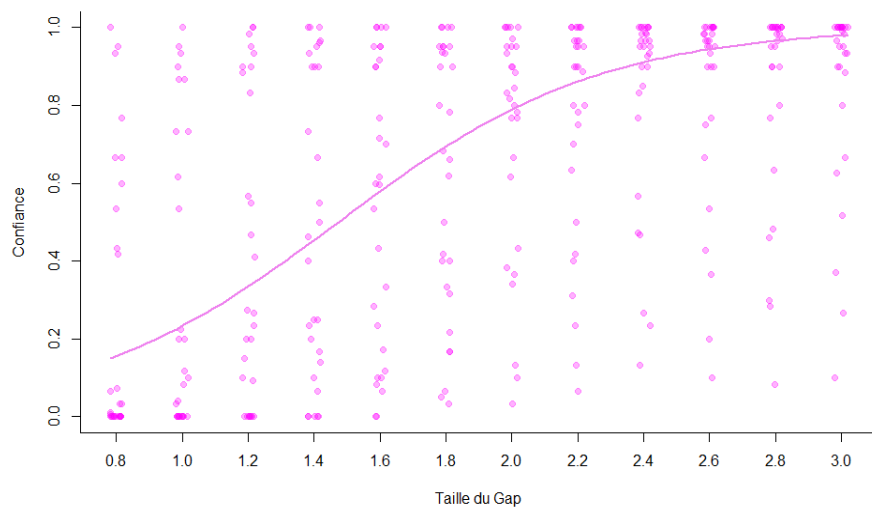


Figure 88 – Modèle d’association entre la confiance dans l’assistance et la taille du gap en conduite automatisée

Cette analyse confirme l'impression fournie par l'analyse précédente, d'une forte similarité entre les évaluations de confiance dans l'automate et d'acceptation de l'automate.

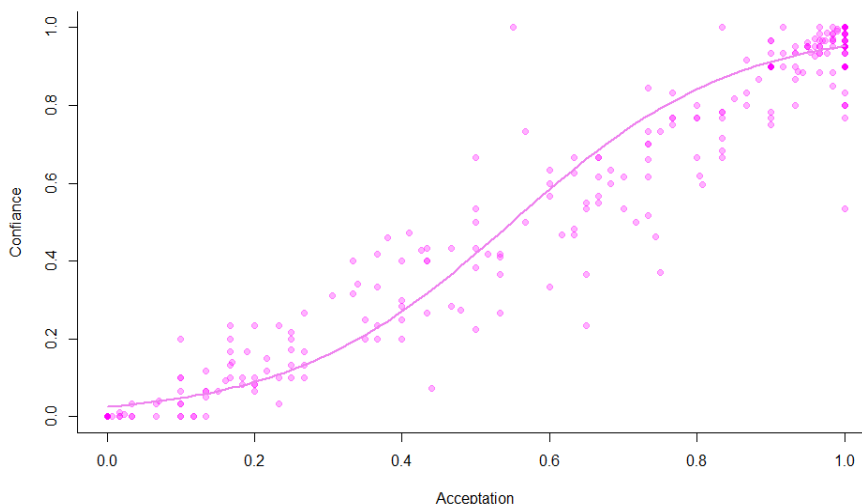


Figure 89 – Modèle d'association entre la confiance dans l'assistance et l'acceptation du système de CDV automatisé

7.3.6 Bilan concernant l'acceptation de l'automate de CDV, et généralisation de nos résultats

7.3.6.1 Acceptation de l'automate de CDV par l'ensemble de nos participants

Si l'on considère l'ensemble des résultats présentés dans cette section, il apparaît clairement que notre système de CDV automatique a reçu un avis plutôt positif de la part de nos participants.

De manière générale, il apparaît dans nos résultats que la plupart du temps, l'automate est mieux accepté par les participants qu'ils ne le prévoyaient lors de leurs évaluations d'acceptabilité a priori d'un CDV automatique recueillies en conduite manuelle (i.e. volet 1.). Cette amélioration de l'acceptation est d'autant plus marquée que la taille du gap est faible. En ce qui concerne les évaluations subjectives du risque de la manœuvre effectuée, nous constatons également un effet de légère mais significative diminution du niveau de risque subjectif par rapport au niveau de risque estimé en conduite manuelle. Comme pour l'acceptation, cette diminution est d'autant plus forte que la taille du gap est faible. Comme pour la conduite manuelle du premier volet expérimental, l'évaluation de la difficulté à effectuer la manœuvre suit le même profil et subit les mêmes effets que l'évaluation subjective du risque. Nous pourrions ainsi résumer les choses en disant que, **lorsque les participants utilisent l'automate de CDV, si le gap est de taille faible ou moyenne, le risque subjectif et la difficulté à faire la manœuvre sont généralement évalués comme inférieurs à l'évaluation fournie en conduite manuelle.**

Lors de l'analyse des données du volet de conduite manuel, nous avons constaté qu'au niveau du seuil de décision, le risque subjectif passait d'une valeur supérieure à 60 à une valeur inférieure à 50.

Pour ces valeurs deux valeurs de criticité, l'acceptabilité correspondante passait quant à elle de 25 à 50. Qu'en est-il de ce rapport lors de l'utilisation de l'automate ? En conduite avec automate, lorsque la valeur de risque subjectif évalué passe de 60 à 50, la valeur d'acceptation passe de 50 à 75. **Il semble donc s'opérer une forme de glissement des évaluations à l'utilisation de l'automate qui fait que, pour les valeurs de criticités représentant celles de la zone de changement de décision en conduite manuelle, l'acceptation de l'automate est nettement plus grande que prévue initialement.** Notons également que la confiance dans l'automate suit le même profil que l'acceptation.

Nous pouvons alors nous demander si l'évaluation de la maîtrise de la situation par l'automate joue un rôle dans l'évaluation du risque, mais aussi dans son acceptation. En étudiant ces résultats, nous constatons de manière très générale que l'automate est jugé comme ayant une très bonne maîtrise de la situation. En effet, même pour les plus petits gaps, la moyenne de maîtrise de la situation avoisine 50. Les résultats les plus intéressants concernant la maîtrise de la situation par l'automate sont fournis par l'étude de la relation qu'entretient cette évaluation subjective et celles de risque et d'acceptation. En effet, il semble à l'examen des résultats que, dès lors que les participants indiquent que l'automate a une maîtrise de la situation inférieure à 80, le risque subjectif augmente rapidement et l'acceptation baisse également rapidement. Dans le cadre de nos données de conduite automatisée, on constate que cette limite de maîtrise inférieure à 80 est franchie pour les gaps inférieurs à 1.2s. Cette limite n'ayant été franchie que pour les espaces de très petite taille, nous pouvons comprendre que l'automate ait été généralement bien accepté.

Au vu de ces résultats, nous pouvons ainsi conclure à un bon niveau d'acceptation général (après utilisation) de l'automate de CDV automatique tel que nous l'avons conçu et simulé dans le cadre de cette thèse. Leur principale limite réside dans le fait qu'ils ne concernent que les 29 conducteurs ayant participé à notre expérimentation. Toutefois, nous pouvons chercher à explorer la portée plus générale de ces résultats en considérant les différents « profils » de conducteurs composant notre échantillon, plus spécifiquement du point de vue de leur « acceptabilité a priori » vis-à-vis de l'automatisation de la conduite et du véhicule autonome (VA). En effet, le questionnaire d'acceptabilité a priori du VA de [Distler et al., 2018], complété par nos participants avant l'expérimentation, peut permettre d'identifier différents profils de conducteurs, en se basant notamment sur 3 questions plus directement liées à nos propres travaux (identifiées en section 7.1.4.4, p. 141). Ces questions se réfèrent (1) à la sûreté estimée des véhicules autonomes, (2) à la confiance de ces conducteurs envers le VA et (3) à l'inquiétude ou au sentiment de risque associés à leur utilisation potentielle.

7.3.6.2 Profilage des participants en fonction de leurs attitudes face au véhicule automatisé

Afin de « profiler » nos participants selon leurs attitudes face à l'automatisation, nous avons donc considéré les scores d'évaluation produits par chacun d'entre eux concernant ces trois questions. Au final, 3 profils se dessinent clairement parmi nos 29 participants.

Un premier groupe de participants ayant un **à priori favorable** pour la voiture autonome : ces participants ont une confiance *à priori* très élevée dans la voiture autonome (de 7 à 10). Ils estiment également que ce type de véhicule devrait être sûr (de 7 à 10), tout en considérant que son utilisation ne serait, à leurs yeux, ni source de risque, ni source d'inquiétude (valeur inférieure à 3).

À l'autre extrémité se situe un profil de **conducteurs réfractaires** ayant, à l'inverse des précédents,

une attitude négative vis-à-vis du VA et de l'automatisation de la conduite. Pour ces conducteurs, le niveau de confiance dans le VA est seulement de 3 ou moins, et ce type de véhicule ne leur semble pas du tout sûr (3 et moins). En outre, emprunter un VA serait pour eux une véritable source de risque comme d'inquiétude (7 à 10).

Enfin, une dernière catégorie regroupe les participants dont l'a priori concernant la voiture autonome n'est pas clairement ou systématiquement marqué, que ce soit positivement ou négativement. Ce groupe peut être qualifié de « **Neutre** » vis-à-vis du VA. Ce groupe peut néanmoins recevoir deux types de profils de conducteurs suivant leurs réponses : les participants ayant fourni des valeurs moyennes (de 4 à 6) à l'ensemble de ces trois questions, et les participants ayant fourni des notes très antagonistes à ces questions (par exemple, haute valeur concernant la sûreté du véhicule, mais faible valeur concernant la confiance dans le VA).

En appliquant cette méthode de catégorisation à notre échantillon de 29 conducteurs, il apparaît que ceux-ci se répartissent équitablement selon ces 3 profils (cf. tableau 25, p. 188)

Groupes			
	Favorables	Neutres	Réfractaires
Effectif	9	10	10

Tableau 25 – Répartition des participants dans les groupes, après catégorisation

Afin de confirmer la différence effective des individus suivant leur groupe d'appartenance, nous avons procédé à des tests statistiques pour chaque question posée dans le questionnaire. Les résultats détaillés de ces tests pour toutes les questions, sont fournis à l'annexe C (p. 261). Nous rapportons ici en priorité les résultats obtenus pour les trois questions sur lesquelles se porte notre principal intérêt.

Concernant la question relative à la sûreté des véhicules autonomes, le test ANOVA de l'effet du groupe se révèle significatif ($F(2, 26) = 29.13, p < .001$). Le test post-hoc de Tamhane (variances inégales) indique que le groupe Réfractaire se distingue significativement des deux autres groupes, et que les groupes Neutre et Favorable ne se distinguent pas l'un de l'autre au point d'atteindre le seuil de significativité.

Concernant la question relative à la confiance dans le véhicule autonome, le test ANOVA se révèle lui aussi significatif ($F(2, 26) = 19.04, p < .001$). Le test post-hoc LSD indique que les trois groupes se distinguent significativement les uns des autres sur cette dimension.

Concernant la dernière question portant sur l'inquiétude que pourrait représenter le véhicule autonome, le test d'ANOVA révèle là encore un effet significatif du groupe, ($F(2, 26) = 13.02, p < .001$). Le test posthoc LSD indique que les trois groupes se distinguent significativement les uns des autres sur cette dimension¹⁴.

Les tests statistiques ont également été effectués pour toutes les autres questions du questionnaire, ils se révèlent significatifs pour 11 des 18 questions restantes (cf. Annexe C (p. 261), ce qui permet de dresser un portrait plus global des jugements d'acceptabilité a priori des individus constituant ces groupes.

Si nous considérons plus en détail les réponses des participants des groupes *Favorable* et *Réfractaire* (cf. Annexe C (p. 261), nous pouvons grossièrement décrire les *Favorables* comme plutôt enclins

¹⁴au seuil $p < .05$

à vouloir essayer un VA et à considérer les VA comme très utiles, plus efficaces et agréables que les moyens de transport qu'ils utilisent aujourd'hui. Ils considèrent également davantage que leur utilisation répondrait mieux à leurs attentes que leur mode actuel de déplacement ; en outre, ils souhaiteraient les utiliser tout autant dans le cadre de leurs déplacements quotidiens que pour leurs loisirs. Ils considèrent enfin que les VA sont amenés à représenter une part importante de l'avenir des systèmes de transport. Les participants du groupe des *Réfractaires* quant à eux, se situent à l'opposé du groupe précédent, que ce soit pour les 3 dimensions qui nous intéressent plus particulièrement ici, ou que ce soit pour la plupart des autres qualificatifs que nous venons d'évoquer (i.e. VA utile, efficace, etc.).

7.3.6.3 Acceptation de l'automate selon les « profils de conducteurs »

Profils comparés

Pour procéder à l'analyse de l'acceptation de l'automate suivant le profil des participants, nous avons pris la décision de retirer les participants au profil *neutre*. Deux raisons principales ont motivé ce choix. En premier lieu, au regard de la méthode de profilage des participants, il apparaît que le profil *neutre* est par nature plus hétérogène, car regroupant des individus ayant fourni des réponses globalement moyennes aux questions et des participants ayant fourni des réponses antagonistes. En second lieu, les résultats des tests statistiques pratiqués pour tester les différences entre les trois groupes pour chaque question, montrent que régulièrement, le groupe neutre ne se différencie pas des autres groupes. De plus, cette absence de différence significative ne concerne pas systématiquement le même groupe. Autrement dit, pour certaines questions, le groupe *Neutre* apparaît plus proche du groupe *Réfractaire*, tandis que pour d'autres il apparaît plus proche du groupe *Favorable*.

Acceptation suivant le profil des conducteurs

Nous cherchons au travers de ce nouvel examen des données, à identifier s'il existe un effet du profil d'attitude envers le véhicule autonome sur l'acceptation de l'assistance. Énoncé autrement, nous cherchons à savoir si le fait d'être à priori *Favorable* ou *Réfractaire* au VA, s'associe à une acceptation différente de l'automate utilisé lors de ce second volet expérimental. Les résultats de cette analyse complémentaire ne mettent pas en évidence de différence significative dans l'acceptation de notre système de CDV automatisé entre les participants *Réfractaires* et les participants *Favorables*. Cette absence d'effet du profil concernant l'acceptation est vérifiée pour l'association entre l'acceptation et la taille du gap, mais également pour l'augmentation de l'acceptation lors de l'utilisation de l'automate. Exprimé d'une manière plus claire, l'acceptation diminue avec la taille du gap de manière similaire chez tous les participants, quel que soit leur profil. De plus, l'augmentation de l'acceptation par rapport à l'acceptabilité est du même ordre, quel que soit le profil des conducteurs. Les mêmes résultats ont été obtenus pour le test de l'influence du profil des conducteurs sur l'évaluation subjective du risque des situations et sur l'évaluation de la confiance dans l'automate.

Généralisation sur la base de l'analyse des profils

Avant cette analyse complémentaire, nous avons établi que globalement, l'automate avait été mieux accepté que prévu par les participants.

Ce complément d'analyse nous permet maintenant de dire que cette meilleure acceptation est valable pour les participants *Favorables*, ce qui signifie que leur expérience de l'utilisation de l'automate de CDV ne les a pas déçus.

Mais, cette meilleure acceptation est également valable pour les *Réfractaires*, ce qui signifie que, malgré leur à priori négatif concernant le VA, ils ont aussi bien accepté notre système de CDV automatisé que les *Favorables*. Un tel résultat plaide en faveur de la bonne conception de l'automate puisqu'il apparaît qu'il est bien accepté par tous les participants, y compris les *réfractaires*.

Le fait que les mêmes résultats d'augmentation de l'acceptation par rapport à l'acceptabilité aient été observés pour ces deux profils contrastés, nous autorise à penser que leur portée est généralisable malgré la modeste taille de l'échantillon. En effet, dans la mesure où l'effet positif sur l'acceptation a été observé de manière similaire pour des échantillons opposés sur le spectre de l'attitude envers le VA, il est légitime de penser que cet effet est fort probablement également présent pour tous les profils potentiels entre les deux extrêmes de ce spectre. En ce sens, compte tenu que notre échantillon total est constitué de trois profils en proportions équivalentes et que l'effet est le même pour les profils les plus opposés constituant cet échantillon, nous pouvons penser qu'il est probablement généralisable au-delà de celui-ci, dans une population plus large.

7.3.7 Évaluation du caractère « *Human-like* » de l'automate

Dans cette section, nous souhaitons évaluer le caractère « *Human-like* » de notre système de CDV automatisé en comparant son comportement avec celui des participants, recueilli lors du premier volet expérimental de conduite manuelle.

Nous avons décrit en 4.2.1 (p. 90) la définition de la position d'insertion du véhicule automatisé dans le gap. La procédure détaillée du déroulement de cette insertion est, quant à elle, décrite en 6.3.2 (p. 124). Enfin, le tableau 4 (p. 91) décrit précisément les TIV du véhicule automatisé avec les véhicules formant le gap lors du CDV. Nous avons également décrit dans ces sections la manière dont le système d'automatisation du changement de voie va, au moyen du paramétrage d'une courbe de Bézier, calculer et suivre la trajectoire de changement de voie. Sur la base de ces descriptions et des données acquises lors du volet de conduite manuelle, il est possible de comparer le comportement de conduite du véhicule automatisé avec celui des participants lors de leurs changements de voie. Pour ces analyses, nous nous concentrerons sur la position d'insertion dans le gap et sur la position du véhicule dans la voie (traduisant sa trajectoire).

7.3.7.1 Insertion dans le gap

Nous avons vu en 7.2.3.1 (p. 164) que les participants ont, dans la grande majorité des cas, tendance à s'insérer dans le premier tiers de l'espace d'insertion. Cette donnée est confirmée à la fois par le positionnement dans le gap, mais également par les TIV avec les véhicules GO et GC. Notre système d'automatisation du changement de voie, lui, se comportait sur la base de l'hypothèse que les conducteurs s'insèrent au centre du gap dans un objectif de compromis sur le risque associé à chaque véhicule formant le gap. **Nous pouvons donc ici en déduire que la manière dont l'automate se positionne dans le gap au moment de son insertion n'est pas « human-like ».** Nous reviendrons sur ce résultat dans la discussion, mais la conclusion à relever ici est qu'un CDV *Human-like* devrait opter pour une position différente d'insertion dans le gap (i.e. au niveau du premier tiers). Les données ici considérées, sont également cohérentes avec un certain nombre de verbalisations spontanées effectuées par les participants lors de la phase de conduite autonome. En effet, il est arrivé régulièrement que les participants notent le comportement d'insertion

du véhicule automatisé et indiquent spontanément avoir l'impression que « *la voiture cherche à mieux s'insérer au centre du gap* », ou encore qu'elle « *prend mieux en compte le véhicule devant* ». Cette divergence entre le comportement humain et le comportement du véhicule est donc notable, et ressentie par les utilisateurs.

7.3.7.2 Position dans la voie et trajectoire 'human-like'

Concernant la nature « human-like » de la trajectoire du véhicule automatisé, son examen est plus complexe. En effet, pour ce faire, il nous faut rendre comparables les positions des véhicules sur la voie au moment du changement de voie.

Nous n'avons pas pu identifier dans la littérature de méthode validée pour déterminer le début et la fin d'un changement de voie. Nous avons même à ce propos montré en 3.2.2.2 (p. 62), et notamment au travers de la figure 25 (p. 65), que les approches de séquençage des phases du changement de voie sont très variées. Afin de rendre toutes les trajectoires de CDV comparables, nous avons donc pris le parti de considérer le moment d'arrêt du scénario de conduite qui avait été déterminé au moyen de pré-tests. Pour rappel, l'arrêt de la situation de conduite intervenait 1.5s après le franchissement par la roue arrière droite du véhicule, d'une limite située à 40cm après la ligne de séparation des voies. La position du véhicule à la fin de la situation nous permet donc de définir un point zéro identique pour toutes les situations où un changement de voie a eu lieu.

Ce point zéro étant fixé, il devient possible d'y aligner toutes les trajectoires collectées durant notre étude. Afin d'éviter de traiter un trop grand nombre de données, un point de début doit également être fixé. Nous avons ainsi fixé ce point de début à la position du véhicule Ego au moment où le véhicule GO arrive à son niveau. Les données de position dans l'environnement présentées ici ont donc été préparées suivant cette méthodologie. Cette même procédure d'alignement des trajectoires et des positions a également pu être appliquée au véhicule automatisé. Nous pouvons alors, comparer les données de position lors du déroulement du CDV des participants en conduite manuelle avec les données de position du véhicule autonome. La figure 90 (p. 192) montre en bleu, toutes les trajectoires manuelles de CDV réalisées par nos 29 participants lors de l'expérimentation. Les lignes horizontales (continues et pointillées) représentent les marquages routiers. Ce graphique présente également, en rouge, la trajectoire suivie par le véhicule autonome.

Pour préciser l'analyse des positions du véhicule autonome en comparaison des positions des véhicules en conduite manuelle, nous avons employé une méthode d'échantillonnage afin de pouvoir estimer localement le positionnement du véhicule autonome par rapport au positionnement de la distribution de la position des véhicules des participants. Pour ce faire, nous avons relevé la position en y de chaque véhicule des participants pour une coordonnée x donnée. Nous avons ensuite répété cette procédure pour une position x espacée de 10m de la position initiale. Nous avons ainsi procédé à l'échantillonnage des positions des véhicules entre $-341m$ et $-1m$ avant la fin de la situation de conduite. En suivant cette méthode, nous obtenons 35 échantillons de positions de véhicules. Le nombre de données échantillonnées n'était pas constant pour chaque valeur de x , en raison de la méthode de découpage de la manœuvre décrite au paragraphe précédent. Le plus petit échantillon comprenait 100 valeurs de position, tandis que le plus grand en comprenait 693. Une fois chaque échantillon constitué, nous avons pu en calculer les statistiques descriptives principales et produire un diagramme en boîte à moustaches. La figure 91 (p. 193) présente les distributions des positions des véhicules pour chaque coordonnée x en conduite manuelle. La barre grise séparant chaque boîte en

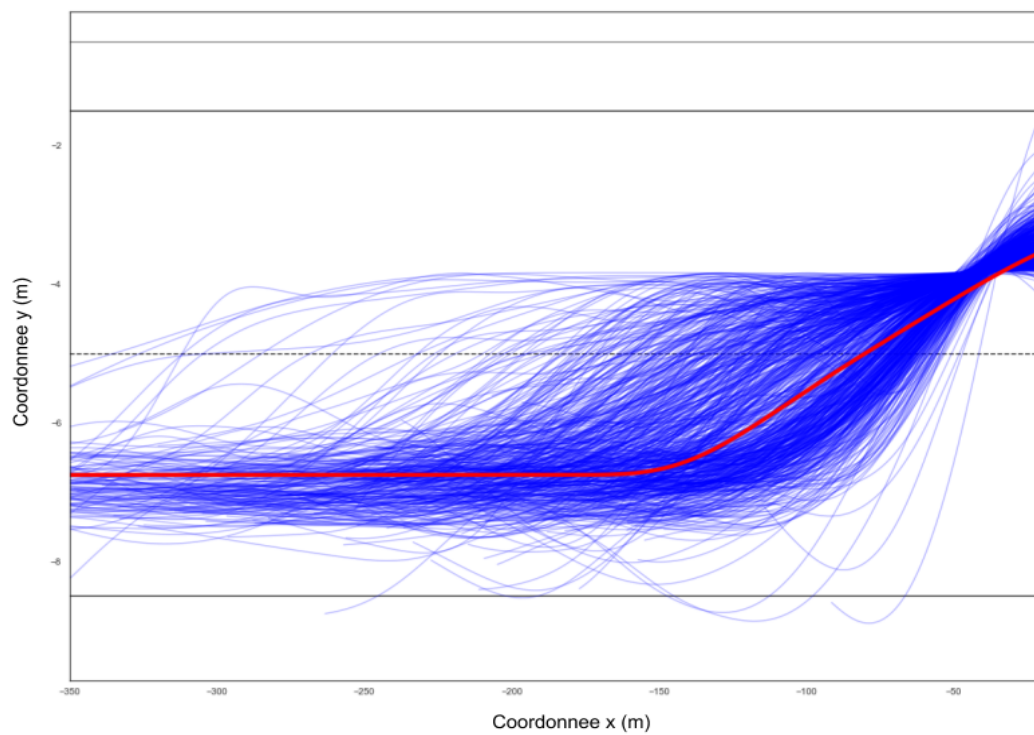


Figure 90 – Trajectoires (positions x , y) du véhicule en conduite manuelle et du véhicule en conduite autonome

deux, représente la médiane de la distribution, la barre en pointillé vert représente la moyenne des positions et enfin, les points rouges-barres noires représentent la position du véhicule automatisé. Par ailleurs, les lignes horizontales (continues et pointillées) représentent les marquages de délimitation des voies.

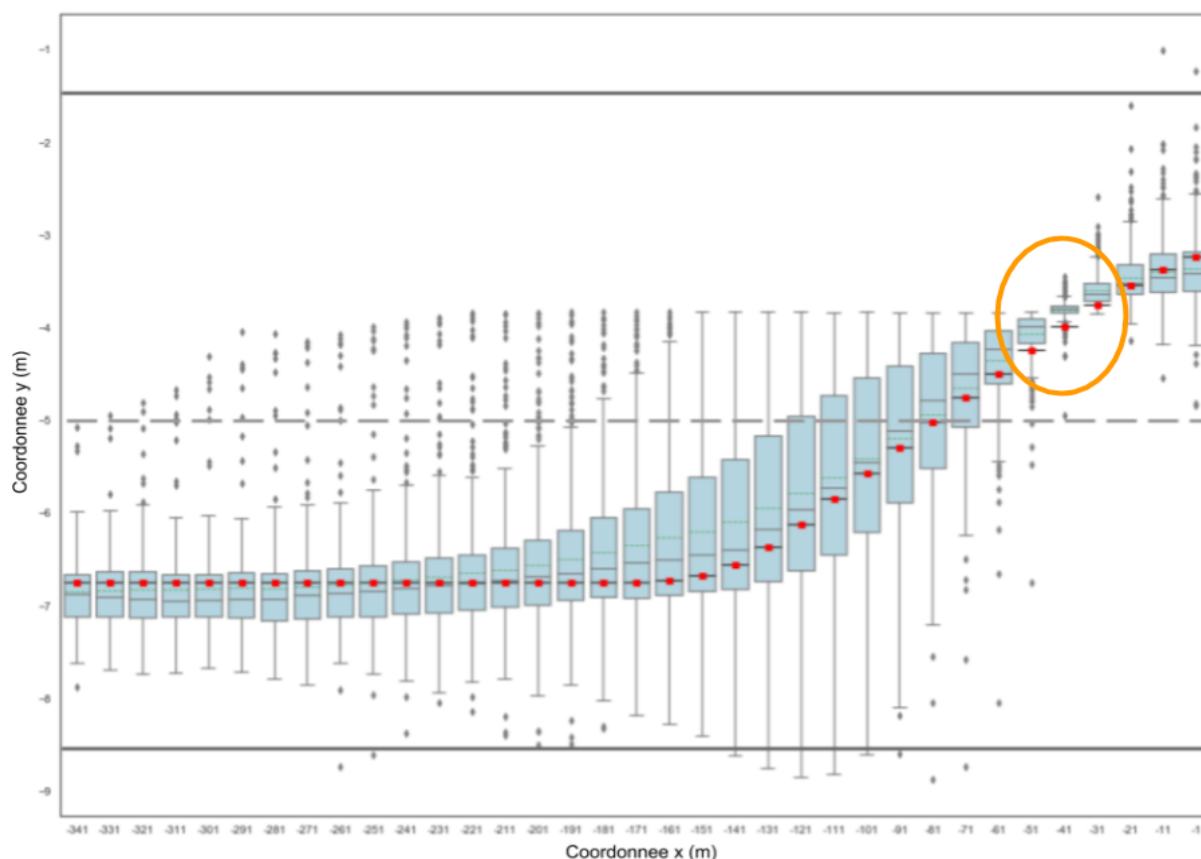


Figure 91 – Diagramme en boîtes à moustaches de comparaison de la distribution des positions lors des CDV en mode manuel et en mode d'automatisation du CDV

Cette représentation graphique nous permet donc d'estimer visuellement le positionnement du véhicule automatisé par rapport à la distribution des positionnement de ceux des participants à la même coordonnée x . Nous constatons visuellement que la position du véhicule autonome ne se trouve hors de la boîte des 75% que dans 3 cas sur 35 (boîtes cerclées en orange sur le graphique). Nous constatons également que la position du véhicule autonome reste proche de la médiane des positions de ceux des participants. Pour préciser ce constat, nous avons calculé la valeur absolue de la différence entre la valeur médiane¹⁵ de la position y des véhicules des participants et la position du véhicule autonome. Le tableau 26 (p. 194) nous informe sur la distribution de ces différences.

Ces statistiques décrivant la distribution des différences, confirment l'impression visuelle de proximité entre le positionnement du véhicule automatisé et celui des participants lors de leurs changements

¹⁵La valeur médiane est ici préférée à la moyenne car elle est moins sensible aux valeurs extrêmes

Conduite manuelle vs Conduite autonome								
Médiane (manuel) - Voiture autonome								
	Min	Q1	Mediane	Q3	Max	Moyenne	Ecart-type	Nb
Distribution	0.01	0.11	0.16	0.19	0.27	0.15	0.07	35

Tableau 26 – Distribution des différences absolues entre la position du véhicule autonome et la médiane des positions des participants

de voie. Ces données tendent donc à confirmer le caractère *Human-like* de la trajectoire du changement de voie de notre assistance.

De manière générale, nous pouvons conclure que, dans le déroulement de la manœuvre de changement de voie, la position sur la voie de notre automate est conforme aux comportements humains pendant toute la phase de préparation au CDV, ainsi que pendant la plus grande partie de la phase d'exécution de la manœuvre de CDV. Seules deux différences avec le comportement humain apparaissent. La première, très minime et temporaire, intervient juste après l'entrée dans la voie de destination. La seconde concerne la position visée dans le gap d'insertion qui, au lieu de se trouver au centre du gap, doit être placée au niveau du premier tiers. Toutefois, il semble que cette position d'insertion particulière n'ait pas empêché les participants de bien accepter l'automate.

7.4 Volet 3 : Résultats concernant les effets de l'expérience de l'utilisation du système de changement de voie automatisé

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus lors de la phase de conduite manuelle après utilisation du système de CDV automatisé. Au cours de cette phase expérimentale, les participants devaient à nouveau conduire manuellement lors de trois situations de conduite identiques à celles présentées lors du premier volet expérimental. Là encore, la taille de l'espace d'insertion était manipulée. Plus précisément, les tailles de gap présentées étaient définies sur la base du résultat de l'algorithme d'analyse en temps réel des décisions du conducteur, présenté en 6.4.1 (p. 129). Ce volet du protocole expérimental a pour objectif de tester l'existence d'un effet de l'utilisation du système de CDV automatisé pouvant se traduire par une modification des évaluations subjectives de risque, de difficulté ou encore par un impact sur les décisions des conducteurs.

7.4.1 Validité des situations de conduite post-automatisation

Pour vérifier la validité de l'algorithme de détermination des seuils de décision, analysons les résultats qu'il fournit. Rappelons pour cela que l'algorithme fournissait une valeur de gap seuil pour chaque participant. Nous pouvons alors considérer les données de décisions groupées des participants à leur gap seuil, ainsi que les données de décisions au gap de taille immédiatement supérieure et immédiatement inférieure ($+0.2s$ et $-0.2s$), à leur seuil particulier. En d'autres termes, nous regroupons ensemble les données issues de participants différents, à des tailles de gaps différentes, en ayant comme critère de regroupement le fait que pour chaque participant, le gap considéré a été identifié comme étant son gap seuil. La même procédure est ensuite appliquée pour regrouper les données du gap seuil $+0.2s$, et les données du gap seuil $-0.2s$. Nous obtenons alors le tableau des proportions de décisions 27 (p. 195).

Gap Seuil vs Seuil+0.2s vs Seuil-0.2s			
Nb Décisions			
	Pris	Non-pris	Total
Seuil	25	50	75
Seuil+0.2s	62	16	78
Seuil-0.2s	16	52	78
% Décisions			
	Pris	Non-pris	Total
Seuil	33.33	66.67	100
Seuil+0.2s	79.49	20.51	100
Seuil-0.2s	33.33	66.67	100

Tableau 27 – Tableau des proportions de décisions de CDV aux gaps seuils, supérieurs et inférieurs

Le test de comparaison des proportions atteste d'une différence très significative entre la proportion de décisions de CDV prises au gap seuil et la proportion de décisions de CDV prises au gap

immédiatement supérieur (i.e. $+0.2s$) : ($\chi^2(1) = 33.21, p < .001$). En revanche il n'y a pas de différence significative entre les proportions de décisions de CDV pour le gap seuil et les proportions pour le gap immédiatement inférieur (i.e. $-0.2s$) $\chi^2(1) = 1.98, NS$. En reprenant les valeurs du tableau 27 (p. 195), nous voyons qu'entre le gap seuil et le gap de $0.2s$ supérieur, la proportion de décisions de CDV passe de 33.33% à 79,49%. Du point de vue des décisions, la barre des 50% est donc franchie entre le gap seuil et le gap immédiatement supérieur. Ce résultat semble confirmer la capacité de notre algorithme à approcher de manière relativement fine la valeur de taille de gap pour laquelle un basculement de décision se produit chez les participants. Le fait que ce basculement s'observe entre le gap seuil et le gap immédiatement supérieur tend à confirmer l'existence de ce seuil théorique, malgré l'étalement observé dans la figure 44 (p. 150).

L'algorithme utilisé dans notre étude a donc été capable d'approximer le seuil de décision, ce qui, par voie de conséquence, nous autorise à poursuivre nos analyses sur les effets induits a posteriori par l'expérience d'utilisation de l'automate de CDV.

7.4.2 Décisions de changement de voie

7.4.2.1 Pour le gap seuil

Commençons par l'examen des données de décision de CDV pour les situations concernées. Pour cette analyse, nous comparons les proportions de décisions de changement de voies lors de la phase de conduite manuelle aux proportions de décisions de CDV lors de la phase post-automatisation. Le tableau 28 (p. 196) présente les nombres et pourcentages de décisions de CDV pour le gap seuil, avant et après l'utilisation de l'automate.

Gap Seuil pré-auto vs Gap Seuil post-auto			
Nb Décisions			
	Pris	Non-pris	Total
Seuil pré-auto	25	50	75
Seuil post-auto	18	7	25
% Décisions			
	Pris	Non-pris	Total
Seuil pré-auto	33.33	66.67	100
Seuil post-auto	72	28	100

Tableau 28 – Tableau des proportions de décisions de CDV aux gaps seuils en pré-automatisation et en post-automatisation

Le test de comparaison des proportions atteste d'une différence très significative entre la proportion de décisions de CDV prises au gap seuil entre la conduite manuelle pré-automatisation et la conduite manuelle post-automatisation : ($\chi^2(1) = 11.43, p < .001$). En reprenant les valeurs du tableau 28 (p. 196), nous constatons qu'entre la phase pré-automatisation et la phase post-automatisation, la proportion de décisions de CDV au gap seuil des participants passe de 33.33% à 72%. La barre

des 50% est donc franchie entre ces deux conditions expérimentales. **Ce résultat va dans le sens d'un effet de l'expérience du véhicule autonome vécue par les participants, les incitant à accepter de changer de voie à un gap pour lequel ils avaient généralement, initialement décidé de ne pas aller.** En comparaison des résultats du tableau 27 (p. 195), les proportions de décisions de CDV au gap seuil après automatisation sont similaires aux proportions observées pour le gap de 0.2s supérieur lors de la phase pré-automatisation.

7.4.2.2 Pour le gap immédiatement supérieur au seuil

Le second gap présenté au cours de la phase de conduite post-automatisation était de 0.2s supérieur au gap seuil du participant en conduite manuelle. Le tableau 29 (p. 197) présente les nombres et pourcentages de décisions de CDV pour le gap immédiatement supérieur au seuil avant et après l'utilisation de l'automate.

Gap Seuil+0.2s pré-auto vs Gap Seuil+0.2s post-auto			
Nb Décisions			
	Pris	Non-pris	Total
Seuil pré-auto	62	16	78
Seuil post-auto	21	5	26
% Décisions			
	Pris	Non-pris	Total
Seuil pré-auto	79.48	20.51	100
Seuil post-auto	80.77	19.23	100

Tableau 29 – Tableau des proportions de décisions de CDV au gap immédiatement supérieur au seuil avant et après l'utilisation de l'automate

Le test statistique de comparaison des proportions n'indique pas de différence significative entre la proportion de décisions de CDV prises au gap seuil entre la conduite manuelle pré-automatisation et la conduite manuelle post-automatisation : $\chi^2(1) = 0.01NS$. En reprenant les valeurs du tableau 28 (p. 196), nous constatons qu'entre la phase pré-automatisation et la phase post-automatisation, la proportion de décisions positives au gap seuil des participants n'augmente que d'environ 1%. **Il n'y a donc pas d'effet de l'expérience de l'automate sur ce gap immédiatement supérieur au seuil de décision.**

7.4.2.3 Pour le gap immédiatement inférieur au seuil

Le dernier gap présenté au cours de la phase de conduite post-automatisation était de 0.2s inférieur au gap seuil du participant. Le tableau 30 (p. 198) présente les nombres et pourcentages de décisions de CDV pour le gap immédiatement inférieur au seuil, avant et après l'utilisation de l'automate.

Le test statistique de comparaison des proportions n'indique pas de différence significative entre la proportion de décisions de CDV prises au gap seuil entre la conduite manuelle pré-automatisation

Gap Seuil-0.2s pré-auto vs Gap Seuil-0.2s post-auto			
Nb Décisions			
	Pris	Non-pris	Total
Seuil pré-auto	26	52	78
Seuil post-auto	11	15	26
% Décisions			
	Pris	Non-pris	Total
Seuil pré-auto	33.33	66.66	100
Seuil post-auto	42.31	57.69	100

Tableau 30 – Tableau des proportions de décisions de CDV aux gaps immédiatement inférieur au seuil en pré-automatisation et en post-automatisation

et la conduite manuelle post-automatisation : $\chi^2(1) = 0.68NS$. En reprenant les valeurs du tableau 28 (p. 196), nous constatons qu’entre la phase pré-automatisation et la phase post-automatisation, la proportion de décisions positives au gap immédiatement inférieur au seuil des participants n’augmente que d’environ 10%, ce qui n’est pas suffisant pour atteindre le seuil de significativité. **Il n’y a donc, là encore, pas d’effet de l’expérience de l’automate sur ce gap immédiatement inférieur au seuil de décision.**

Nous discuterons ces résultats dans la section correspondante du prochain chapitre (8). Avant cela, intéressons-nous aux autres aspects relatifs aux évaluations subjectives des participants concernant les situations de changement de voie lors de ce dernier volet expérimental.

7.4.3 Évolution de l’évaluation subjective du risque des changements de voie

Comme pour toutes les situations de conduite présentées lors du volet de conduite manuelle, les participants étaient invités à fournir des évaluations subjectives sur la situation et sur leur décision de CDV. La première dimension importante n’était autre que la criticité de la situation. Ici encore, nous comparons les valeurs obtenues lors du volet de conduite manuelle (i.e. pré-automatisation) aux données issues du dernier volet (i.e. post-automatisation). Nous comparerons d’abord les données associées au gap seuil des participants, puis les données pour le gap immédiatement supérieur (i.e. gap seuil $+0.2s$), et enfin celles obtenues au gap immédiatement inférieur (i.e. gap seuil $-0.2s$).

7.4.3.1 Pour le gap seuil

La distribution des moyennes de criticité fournies par les participants à leur gap seuil, lors du premier volet expérimental, est donc comparée aux évaluations de criticité fournies par les mêmes participants à leur gap seuil, lors du dernier volet expérimental. Le tableau 31 (p. 199) présente les statistiques descriptives des distributions de criticité pour le gap seuil.

Le test statistique révèle une différence très significative ($t(23) = 3.67p < .001$) entre les valeurs obtenues lors de la conduite manuelle pré-automatisation et les valeurs obtenues lors de la phase de

Post-Automatisation Gap Seuil								
Criticité								
	Min	Q1	Médiane	Q3	Max	Moyenne	Ecart-type	Nb
Pré-Auto	16.67	56.25	60.83	68.5	85.5	60.53	15.57	24
Post-Auto	0	30	50	60	100	47.6	29.23	25

Tableau 31 – Tableau comparatif des distributions de criticité au gap seuil des situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation

conduite manuelle post-automatisation. Les participants ont donc généralement évalué leur gap seuil comme significativement moins critique après avoir fait l'expérience du système de changement de voie automatisé.

Ce résultat confirme qu'il y a bien un effet de l'expérience du CDV automatique sur l'évaluation de criticité pour le gap seuil.

7.4.3.2 Pour le gap immédiatement supérieur au seuil de décision

Comparons maintenant les évaluations de criticité pour le gap immédiatement supérieur au seuil (i.e. gap seuil +0.2s). Le tableau 32 (p. 199) présente les statistiques descriptives des deux distributions.

Post-Automatisation Gap Seuil + 0.2s								
Criticité								
	Min	Q1	Médiane	Q3	Max	Moyenne	Ecart-type	Nb
Pré-Auto	0	16.75	35	47.29	75	33.55	20.54	26
Post-Auto	0	11.25	30	63.75	85	34.81	28.93	26

Tableau 32 – Tableau comparatif des distributions de criticité au gap de 0.2s supérieur au seuil des situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation

Le test statistique ne révèle pas de différence significative ($t(25) = -0.27NS$) entre les valeurs obtenues lors de la conduite manuelle pré-automatisation et les valeurs obtenues lors de la phase de conduite manuelle post-automatisation. L'examen visuel des distributions associé aux résultats du test statistique ne permet pas de conclure à une évaluation de la criticité différente pour ce gap, entre le premier et le dernier volet expérimental. **Ainsi, comme pour la décision de CDV, l'effet de l'expérience de l'automate n'a pas impacté les évaluations subjectives du gap immédiatement supérieur au seuil.** Qu'en est-il pour le gap immédiatement inférieur au gap seuil de décisions ?

7.4.3.3 Pour le gap immédiatement inférieur au seuil de décision

Les évaluations de criticité pour le gap immédiatement inférieur au seuil (i.e. gap seuil -0.2s) semblent également présenter le même profil. Le tableau 33 (p. 200) présente les statistiques descriptives des deux distributions.

Post-Automatisation Gap Seuil - 0.2s								
Criticité								
	Min	Q1	Médiane	Q3	Max	Moyenne	Ecart-type	Nb
Pré-Auto	25	51.58	65.5	72.92	100	64.28	17.30	26
Post-Auto	0	25	62.5	80	100	54.80	31.99	26

Tableau 33 – Tableau comparatif des distributions de criticité au gap de 0.2s inférieur au seuil des situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation

Le test statistique ne révèle pas de différence significative ($t(25) = 1.69NS$) entre les valeurs obtenues lors de la conduite manuelle pré-automatisation et les valeurs obtenues lors de la phase de conduite manuelle post-automatisation. Là encore, la comparaison des distributions ajoutée aux résultats du test statistique ne permet pas de conclure à une évaluation de la criticité différente pour ce gap entre le premier et le dernier volet expérimental. **Pour le gap inférieur non plus, il n'apparaît aucun effet induit par l'utilisation de l'automate.**

Voyons à présent si cette tendance est également présente pour les évaluations subjectives de difficulté de la manœuvre.

7.4.4 Difficulté des changements de voie

Nous avons pu constater précédemment que, comme pour la criticité de la situation, la difficulté de la manœuvre était sensible à la taille du gap. Voyons à présent si cette dimension subjectivement évaluée par les participants, est impactée de manière similaire après expérience d'une automatisation du changement de voie. Nous suivons le même ordre dans l'examen des données.

7.4.4.1 Pour le gap seuil de décision

Sur le même principe que les diagrammes précédents, le tableau 34 (p. 200) décrit les distributions de difficulté pour le gap seuil en condition pré et post-automatisation.

Gap Seuil								
Difficulté								
	Min	Q1	Médiane	Q3	Max	Moyenne	Ecart-type	Nb
Pré-Auto	16.66	53.33	57.5	70	90	60.77	17.80	24
Post-Auto	0	10	30	55	98	34.92	31.22	25

Tableau 34 – Tableau comparatif des distributions de difficulté au gap seuil, des situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation

Comme pour la criticité, le test statistique révèle une différence significative pour le gap seuil ($t(23) = 4.92p < .001$). **Il semble donc, ici encore, que les participants évaluent la manœuvre de CDV au gap seuil comme moins difficile après avoir fait l'expérience du système d'automatisation du changement de voie.**

Voyons maintenant ce qu'il en est pour le gap immédiatement supérieur au seuil.

7.4.4.2 Pour le gap immédiatement supérieur au seuil de décision

Le tableau 35 (p. 201) présente les distributions de difficulté pour le gap de 0.2s supérieur au seuil en condition pré et post-automatisation.

Gap Seuil								
Difficulté								
	Min	Q1	Médiane	Q3	Max	Moyenne	Ecart-type	Nb
Pré-Auto	0	9.37	17.5	34.58	80	23.01	18.94	26
Post-Auto	0	0	7.5	20	90	18.5	25.33	26

Tableau 35 – Tableau comparatif des distributions de difficulté au gap de 0.2s supérieur au seuil, des situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation

Le test statistique révèle une différence légèrement significative ($t(25) = 2.29p < .05$) entre les valeurs obtenues lors de la conduite manuelle pré-automatisation et les valeurs obtenues lors de la phase de conduite manuelle post-automatisation. **L'examen visuel des distributions, contrairement aux résultats du test statistique, semble indiquer que la différence est probablement faible. Aussi, bien que significatif au seuil de 5%, nous devons probablement considérer cette différence avec prudence.**

7.4.4.3 Pour le gap immédiatement inférieur au seuil de décision

Les évaluations de difficulté pour le gap immédiatement inférieur au seuil sont résumées par le tableau 36 (p. 201).

Gap Seuil + 0.2s								
Difficulté								
	Min	Q1	Médiane	Q3	Max	Moyenne	Ecart-type	Nb
Pré-Auto	0	9.37	17.5	34.58	80	23.01	18.94	26
Post-Auto	0	0	7.5	20	90	18.5	25.33	26

Tableau 36 – Tableau comparatif des distributions de difficulté au gap de 0.2s inférieur au seuil, des situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation

Le test statistique ne révèle pas de différence significative ($t(25) = 0.98NS$) entre les valeurs obtenues lors de la conduite manuelle pré-automatisation et celles obtenues lors de la phase de conduite manuelle post-automatisation. **La comparaison des distributions ajoutée aux résultats du test statistique ne permet pas, ici non plus, de conclure à une évaluation de la difficulté différente pour ce gap, entre la conduite avant et après expérience du système d'automatisation du changement de voie.**

Nous pouvons enfin comparer les évaluations d'acceptabilité pour le gap seuil et les gaps les plus proches, entre la première et la dernière phase expérimentale.

7.4.5 Acceptabilité d'un système automatisant le changement de voie

Lors des situations de conduite manuelle du troisième volet expérimental, une évaluation de l'acceptabilité d'un système de CDV automatisé était également fournie par le conducteur. Cette évaluation peut être comparée à l'évaluation initialement fournie lors du premier volet expérimental.

7.4.5.1 Pour le gap seuil de décision

Comme pour les précédentes mesures, commençons par le gap seuil. Le tableau 37 (p. 202) permet de comparer les distributions.

Gap Seuil								
Acceptabilité								
	Min	Q1	Médiane	Q3	Max	Moyenne	Ecart-type	Nb
Pré-Auto	0	12.38	30.83	58.75	87.5	33.77	26.39	24
Post-Auto	0	40	75	100	100	60.80	38.10	25

Tableau 37 – Tableau comparatif des distributions d'acceptabilité au gap seuil, des situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation

Le test statistique indique une différence très significative ($t(23) = -4.14p < .001$) entre les valeurs fournies lors de la phase de conduite pré-automatisation et la phase de conduite post-automatisation. **L'examen des distributions révèle une augmentation de l'acceptabilité pour le gap seuil lors de la phase de conduite post-automatisation. Il y a donc un effet de l'expérience d'utilisation de l'automate à ce niveau.**

7.4.5.2 Pour le gap immédiatement supérieur au seuil de décision

Le tableau 38 (p. 202) présente les distributions d'acceptabilité pour le gap de 0.2s supérieur au seuil en condition pré et post-automatisation.

Gap Seuil + 0.2s								
Acceptabilité								
	Min	Q1	Médiane	Q3	Max	Moyenne	Ecart-type	Nb
Pré-Auto	0	51.25	80.83	90	100	68.66	29.41	26
Post-Auto	0	50	87.5	99.5	100	70.12	33.44	26

Tableau 38 – Tableau comparatif des distributions d'acceptabilité au gap de 0.2s supérieur seuil, des situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation

Le test statistique ne révèle aucune différence qui atteigne le seuil de significativité ($t(25) = -0.NS$) entre les valeurs obtenues lors de la conduite manuelle pré-automatisation et les valeurs obtenues lors de la phase de conduite manuelle post-automatisation. **L'examen visuel des distributions, ainsi que les résultats du test statistique, ne montrent pas d'effet quant à l'existence d'un effet de l'expérience du système de CDV automatisé.**

7.4.5.3 Pour le gap immédiatement inférieur au seuil de décision

Les évaluations d'acceptabilité pour le gap immédiatement inférieur au seuil sont illustrées par le tableau 39 (p. 203).

Gap Seuil - 0.2s

Acceptabilité

	Min	Q1	Médiane	Q3	Max	Moyenne	Ecart-type	Nb
Pré-Auto	0	15.92	39.58	49,92	87	35.54	24.40	26
Post-Auto	0	10	40	70	100	42.62	37.99	26

Tableau 39 – Tableau comparatif des distributions d'acceptabilité au gap de 0.2s inférieur seuil, des situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation

Le test statistique ne révèle pas de différence significative ($t(25) = -0.37NS$) entre les valeurs obtenues lors de la conduite manuelle pré-automatisation et celles obtenues lors de la phase de conduite manuelle post-automatisation. **La comparaison des distributions ajoutée aux résultats du test statistique ne permet pas, ici non plus, de conclure à une évaluation de l'acceptabilité différente pour ce gap entre la conduite avant et après expérience du système d'automatisation du changement de voie.**

7.4.6 Temps intervéhiculaire et conflits de Zones Enveloppes

Une analyse complémentaire a été effectuée sur les temps intervéhiculaires entre le véhicule du participant et les véhicules GO et GC, pour le gap seuil de décision.

7.4.6.1 Temps intervéhiculaire avec le véhicule GO

La distribution des TIV entre le véhicule du participant et GO au moment du franchissement de la ligne de séparation des voies pour le gap seuil lors du premier volet de conduite manuelle, a été comparé à la même distribution obtenue pour les CDV effectués lors du troisième volet expérimental. Les caractéristiques de chaque distribution sont présentées dans le tableau 40, p. 204. Le test statistique ne révèle pas de différences significatives ($t(14) = 0.35NS$) concernant cet aspect du positionnement dans le gap au moment du CDV.

Gap Seuil - 0.2s								
Temps intervéhiculaire avec le véhicule GO								
	Min	Q1	Médiane	Q3	Max	Moyenne	Ecart-type	Nb
Pré-Auto	0.19	0.39	0.54	0.74	1.36	0.58	0.27	22
Post-Auto	0.21	0.38	0.48	0.63	1.21	0.59	0.29	17

Tableau 40 – Tableau comparatif des distributions de TIV entre Ego et GO au gap seuil de décision pour les situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation

7.4.6.2 Temps intervéhiculaire avec le véhicule GC

La même analyse est effectuée pour les temps intervéhiculaires entre GC et le véhicule du participant. Les statistiques descriptives de chaque distribution sont présentées dans le tableau 41, p. 204. Le test statistique ne révèle pas de différences significatives ($t(14) = -0.04NS$) concernant cet aspect du positionnement dans le gap au moment du CDV.

Gap Seuil - 0.2s								
Temps inter-véhiculaire avec le véhicule GC								
	Min	Q1	Médiane	Q3	Max	Moyenne	Ecart-type	Nb
Pré-Auto	0.31	0.58	0.82	1.05	1.89	0.84	0.35	22
Post-Auto	0.37	0.58	0.83	1.22	1.76	0.88	0.41	17

Tableau 41 – Tableau comparatif des distributions de TIV entre GC et Ego, au gap seuil de décision pour les situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation

Il semble donc que, contrairement aux autres dimensions mesurées, le positionnement d'insertion dans le gap n'ait pas été influencé par l'expérience d'utilisation de l'automate. Les conflits de ZE restent en moyenne les mêmes que lors de la phase de conduite manuelle avant utilisation de l'automate.

7.4.7 Bilan des résultats sur l'effet à posteriori de l'utilisation de l'automate de CDV

Dans ce dernier volet expérimental, nous cherchions à savoir s'il existait un effet induit par l'utilisation du système d'automatisation du CDV lorsque le conducteur se trouve à nouveau en situation de conduite manuelle. Nous postulons que, si cet effet existait, la probabilité serait forte pour qu'il se manifeste au niveau du gap correspondant au seuil de décision du conducteur lui-même. À ce propos, nous obtenons trois résultats importants.

Le premier concerne la capacité de notre algorithme à approximer le gap seuil de décision du participant. Nous avons vu que, quelle que soit la dimension considérée (i.e. décision, criticité, difficulté, etc.), le seuil estimé par notre algorithme semble capable de mettre en évidence le gap à partir duquel la décision humaine change, en général. Plus précisément, il s'avère capable de trouver le gap le plus proche de ce seuil.

Le second résultat d'importance concerne les effets induits par l'utilisation d'un système de CDV automatisé sur les décisions et les comportements lors des CDV manuels post-automatisation. Nous avons pu montrer dans notre étude, que cet effet existe bien, mais qu'il s'est manifesté spécifiquement et uniquement pour le « *gap seuil de décision* ». Cet effet concerne à la fois la décision, l'évaluation subjective du risque de la manœuvre, la difficulté estimée et l'acceptabilité d'un automate. La direction de cet effet est claire, le gap seuil de décision est subjectivement estimé comme moins critique, le CDV est évalué comme moins difficile à faire et la décision de CDV est plus fréquemment prise qu'elle ne l'est pour ce même « *gap seuil de décision* » avant d'avoir fait l'expérience de l'automate. À ce propos d'ailleurs, les participants indiquent également, pour ce gap particulier, qu'ils accepteraient davantage qu'un automate effectue le CDV pour ce « *gap seuil de décision* » en post-automatisation, qu'avant avoir fait l'expérience du système de CDV automatisé. La direction de cet effet va donc dans le sens d'une prise de risque plus importante par les conducteurs.

En revanche, cet effet induit par l'utilisation de l'automate est absent pour les gaps immédiatement supérieurs et inférieurs au seuil de décision. Ce qui permet de conclure à un effet limité à 0.2 s. De même, nous avons pu constater que l'effet induit par l'utilisation de l'automate, ne concernait pas la manière dont les conducteurs s'inséraient dans le gap seuil. En effet, aucune différence concernant les TIV avec GO et GC entre les insertions au *gap seuil de décision*, avant utilisation de l'automate et après son utilisation, n'a pu être mise en évidence.

Quatrième partie

Discussion

Discussion

Dans ce chapitre, nous reviendrons sur les résultats présentés au chapitre précédent en y apportant une interprétation et en les discutant de manière plus détaillée. Dans un premier temps, nous suivrons l'ordre de présentation des résultats et respecterons la structure de l'expérimentation. Dans un second temps, nous mettrons en lien de manière plus explicite, les différents résultats obtenus et les différentes conclusions que nous en tirons, avant d'élargir la recherche en évoquant les limites de notre travail ainsi que les nouvelles questions et perspectives qu'il soulève.

8.1 Discussion des résultats concernant les changements de voie en conduite manuelle

Dans le chapitre précédent, nous avons rapporté un certain nombre de résultats et d'analyses concernant la manœuvre de CDV en conduite manuelle. Trois grands types de données ont été analysées : les données relatives aux décisions prises par les participants, les données relatives aux évaluations subjectives fournies par les participants à l'issue de chaque situation de conduite, et enfin les données associées aux performances de conduite des participants lors de leurs changements de voie. Nous examinerons les résultats dans cet ordre, avant de les mettre en lien les uns avec les autres.

8.1.1 Décisions de changement de voie

L'expérimentation a permis de mettre les participants en situation de décision de changement de voie dans un environnement contrôlé. Cette procédure nous a donné la possibilité de mettre en évidence, l'existence d'un lien entre la taille du gap et le nombre de décisions de changement de voie prises par les participants. Si ce résultat semble relativement évident, la répartition des décisions en fonction de la taille des gaps ne l'était pas. Nos hypothèses initiales, basées sur les conflits de zones enveloppes et explicitées dans le tableau 15 (p. 143), prévoyaient que l'échelonnement progressif de la proportion des décisions de CDV s'étalerait sur la fourchette des gaps allant de 1.6s à 2.4s. Nous prévoyions aussi qu'en-deçà d'1.4s, les participants refuseraient de changer de voie dans leur très grande majorité, tandis qu'au dessus de 2.4s, les décisions de changement de voie seraient très majoritaires. Ces prévisions n'ont pas été exactement vérifiées. En effet, nous avons pu constater que la taille de gap à partir de laquelle les participants commençaient à décider de changer de voie se situait aux alentours de 1.2s. Concernant les collisions et les erreurs rapportées par les participants, nous avons pu observer que les accidents étaient relativement rares, et que les erreurs rapportées par les participants étaient majoritairement des erreurs de type "décision de CDV à tort" (i.e. « *should not have been taken* »). Nous avons également pu remarquer que plus la taille du gap était faible, plus les erreurs de décisions de CDV représentaient une proportion importante de tous les changements de voie effectués (c.f. tableau 19, p. 147). Enfin, les statistiques confirment la significativité de l'association

entre les décisions de changement de voie et la taille des gaps. La figure 43 (p. 149) montre cette association et tend à corroborer visuellement que la fourchette de changement de décision commence à 1.2s et se termine dans la région de 2.0s. Cette confirmation statistique est un élément supplémentaire incitant à infirmer nos hypothèses initiales. Nous reviendrons ultérieurement sur cet aspect lorsque nous discuterons des performances de conduite lors des changements de voie, en particulier concernant la position d'insertion des participants dans le gap.

La question des décisions de changement de voie ne se rapporte pas uniquement à l'aspect général et interindividuel. Chaque individu est également susceptible d'avoir sa propre plage de préférence dans laquelle sa décision de changer de voie va passer de négative à positive¹. Nous avons donc procédé à deux analyses distinctes sur cet aspect individuel de la décision de changement de voie.

La première consistait à examiner « *l'étalement* » du changement de décision, c'est-à-dire le nombre de gaps qui composaient la plage au sein de laquelle les décisions des participants passaient d'un refus systématique à un CDV systématique. Nous avons ainsi pu déterminer, qu'en moyenne, cette plage comprenait 4 gaps espacés de 0.2s.

La seconde analyse portait sur les valeurs de gaps seuils de décision, en elles-mêmes. Nous avons examiné la distribution générale de la répartition des seuils individuels, ce qui nous a permis de montrer qu'un nombre non négligeable des seuils de changements de décision se trouvaient au niveau des gaps de 1.2 s et 1.4 s. Cette distribution, présentée en figure 45 (p. 150), confirme également la tendance précédemment relevée, d'une infirmation de nos hypothèses concernant la « *région* » de changement de décision. Là encore, tandis que nos hypothèses prévoyaient que les changements de décision (et donc les seuils individuels de décision) se situeraient dans la plage de gaps [1.6s, 2.4s], nos données indiquent qu'il semble que cette plage se trouve plutôt dans l'intervalle [1.2s, 2.0s].

8.1.2 Discussion des résultats concernant les évaluations subjectives

Concernant les évaluations subjectives des participants à propos des situations de conduite qui leur étaient proposées, nos principales questions relatives à la conduite manuelle concernaient l'évaluation du risque (i.e. criticité), le risque effectivement pris, la difficulté effective ou potentielle de la manœuvre, et l'acceptabilité d'un CDV effectué par un potentiel système automatisé. Ces évaluations étaient collectées après chaque situation de CDV proposés. Nous reprenons donc ces résultats dans l'ordre.

8.1.2.1 Évaluations subjectives du risque (criticité)

L'évaluation de la criticité de la situation était cruciale dans notre protocole. Elle correspondait à l'évaluation subjective du risque situationnel effectuée par les conducteurs impliqués dans notre étude. Notre revue de la littérature au chapitre 2 (p. 27) nous avait conduits à plusieurs constats. Les deux premiers concernaient la divergence des prévisions faites par la théorie du risque zéro (i.e. ZRT, [Näätänen and Summala, 1974], [Näätänen and Summala, 1976]) et celles faites par la théorie de l'homéostasie du risque (i.e. RHT, [Wilde, 1982], [Wilde, 2014]). En effet, comme indiqué dans le tableau des hypothèses 15 (p. 143), la théorie du ZRT prévoit qu'un conducteur cherche à ne prendre aucun risque et donc, qu'à l'issue de son évaluation subjective du risque situationnel, si le risque estimé n'est pas nul, il modifie son comportement pour faire repasser le risque à zéro. En

¹Cette plage personnelle, et donc intra-individuelle, était entre autre l'objet de l'algorithme d'estimation du seuil présenté à la section 6.4.1 (p. 129) du chapitre 6

conséquence, suivant cette théorie, aucun risque ne peut être pris intentionnellement. Dans le cadre de notre protocole expérimental, cette prédiction aurait dû se traduire par un refus de CDV pour tout gap dont le risque était subjectivement évalué comme non nul. À l’opposé, la RHT prévoit qu’un conducteur puisse définir un niveau de risque cible non nul, et donc prendre intentionnellement des décisions de CDV en condition de risque supérieur à zéro.

Nous avons pu voir dans la première partie de l’analyse des résultats de criticité situationnelle que les participants étaient globalement très cohérents avec eux-mêmes dans leurs évaluations de criticité. Autrement dit, pour un gap donné, lorsqu’un participant fournissait une évaluation de criticité, il fournissait une évaluation similaire lorsque ce même gap lui était présenté de nouveau. Nous avons aussi pu constater que, pour les tailles de gap extrêmes, les participants tendaient également à être d’accord entre eux pour évaluer ces situations comme très critiques, ou très peu critiques (suivant que le gap était très petit ou très grand). Nous avons par ailleurs, pu observer qu’en revanche, cet accord entre les participants ne résistait pas lorsque les gaps étaient situés dans la plage centrale des gaps présentés (i.e. [1.2s, 2.4s]). Enfin, nous avons pu mettre en évidence un lien d’association significatif entre la taille du gap et l’évaluation subjective de la criticité de celui-ci. Lorsque nous mettons ces données en rapport avec les données de décisions de changement de voie, nous notons que les décisions de CDV sont prises pour des gaps dont la criticité n’est pas jugée comme nulle, ce qui va à l’encontre des prédictions fournies par la ZRT. Cette contradiction est particulièrement vraie lorsque nous considérons la distribution des seuils de changement de décision, pour laquelle nous observons un pic pour des valeurs de taille de gap associées à des évaluations de criticité élevées. Le graphique 95 en annexe D (p. 263) représente les distributions relatives de criticité pour chaque taille de gap, des gaps ayant été acceptés et des gaps ayant été refusés. Cette illustration montre bien que pour les gaps de taille comprise dans l’intervalle [1.2s, 2.0s] qui ont été acceptés par les participants (i.e. « Taken »), la distribution des criticités fournies n’est pas nulle. En suivant les prédictions de la ZRT, nous aurions pu nous attendre à une distribution similaire des criticités de tous les gaps pris. Une telle configuration n’est observable que pour les gaps 2.8s ou 3.0s. Ces données supplémentaires nous montrent donc que les participants ont pris une décision de changement de voie alors même qu’ils estimaient que la situation présentait un certain niveau de criticité. Ces résultats sont clairement en faveur de la RHT postulée par Wilde. Toutefois, cela ne signifie pas pour autant que l’estimation de criticité soit indépendante de la décision de CDV. Cette relation entre la criticité et la décision est en particulier mise en évidence, lorsque l’on compare les criticités aux gap seuil avec celles fournies aux gaps immédiatement supérieurs et inférieurs. Comme l’illustre bien la figure 50 (p. 156) ainsi que les tests statistiques pratiqués, il existe bien une différence significative entre les valeurs de criticité fournies par les participants pour leur gap seuil et pour le gap de taille immédiatement supérieure. Nous avons donc, au travers de cette expérimentation, mis en exergue un lien d’association entre la taille du gap, la criticité évaluée de celui-ci et la décision de changement de voie.

8.1.2.2 Risque pris et intentionnalité

Pour aller plus loin dans l’étude du lien entre l’évaluation subjective du risque, la taille du gap et la prise de décision, nous avons exploré les données issues des réponses des participants à propos du risque qu’ils estiment avoir effectivement pris pour les changements de voie qu’ils ont effectués (figure 51, p. 157). Ces résultats viennent conforter le pattern observable pour la criticité des gaps pris, observable sur la figure 95 (p. 263). Là encore, nous constatons que les participants estiment

avoir pris un risque non nul pour les gaps pour lesquels ils ont effectué un CDV et dont la taille est inférieure à 2.0s. Pour autant, nous devons rester prudents quant à ces conclusions, dans la mesure où le lien entre la taille du gap et l'estimation de risque pris, n'atteint pas le seuil de significativité. Malgré cette impossibilité, le simple fait que les participants aient pris des décisions de CDV sans estimer rapporter avoir fait une erreur, et tout en évaluant une criticité et un risque pris comme non nul, contredit les prédictions de la ZRT et tend à valider la RHT.

De plus, la théorie du risque zéro prévoit que si un risque est effectivement pris, celui-ci est imputable à une mauvaise évaluation subjective préalable, et donc qu'il s'agit d'une prise de risque involontaire. Or, non seulement les participants témoignent et objectivent un niveau différent de criticité suivant la taille du gap, mais ils rapportent également, comme l'expriment les résultats du tableau 24 (p. 158), que les risques qu'ils ont pris étaient très largement intentionnels. Cette nouvelle donnée plaide à nouveau en faveur de la théorie de l'homéostasie du risque.

8.1.2.3 Difficulté de la manœuvre

Nous avons pu constater au chapitre 2 (p. 27) dédié à l'évaluation et la conscience du risque, que certains modèles, comme ceux de [Vaa, 2001] (2.2.8, p. 49) ou de [Fuller et al., 2008] (2.2.7, p. 46) établissaient un lien entre la difficulté de gestion de la situation de conduite et l'évaluation de sa criticité. Ce lien est mieux explicité par le modèle COSMODRIVE et son intégration des processus d'émergence de la conscience du risque car ils spécifient les rôles respectifs de la détection du danger, de l'auto-évaluation des capacités à gérer la situation et de l'évaluation des réponses possibles, notamment au travers de l'utilisation des zones enveloppes (c.f. figures 18 p. 51 et 19, p. 53).

Nous pouvions donc supposer, dans un premier temps, que plus le gap serait petit, plus il semblerait difficile au participant d'effectuer le changement de voie et l'insertion dans celui-ci. Les résultats présentés dans la figure 52 (p. 159) traduisent bien cette association. De plus, le test statistique confirme ce lien (c.f. figure 53, p. 160). Dans un second temps, nous pouvions supposer que si l'évaluation de la difficulté était fortement associée à la taille du gap et que l'évaluation de la criticité impliquait une évaluation de la difficulté, alors, dans notre situation précise, la criticité subjectivement évaluée serait fortement associée à la difficulté. Les statistiques, tout comme la figure 54 (p. 160), traduisent bien la force de cette association.

Nous constatons également ce lien, en examinant les évaluations de difficulté au niveau du gap seuil de décision des participants. Comme pour la criticité de la situation de conduite, la difficulté estimée de la manœuvre de CDV se révèle significativement différente entre le gap seuil et le gap de taille immédiatement supérieure. Comme pour la criticité encore, la différence entre la difficulté pour le gap seuil et la difficulté pour le gap immédiatement inférieur n'atteint pas le seuil de significativité.

Cet ensemble de constats est en bonne cohérence avec le modèle COSMODRIVE et son intégration de la notion de conscience du risque à travers les zones enveloppes. Ces résultats viennent ainsi renforcer ceux de [Bornard, 2012] qui avaient déjà permis de valider la théorie des ZE en situation de tourne-à-gauche.

8.1.2.4 Acceptabilité d'un changement de voie automatisé

L'un de nos objectifs était de mieux comprendre comment l'acceptabilité d'un système d'automatisation du changement de voie évoluait après expérience de celui-ci. À cette fin, notre protocole

expérimental comprenait une question visant à estimer à priori, dans quelle mesure pour chaque situation de conduite réalisée manuellement au cours du premier volet (et donc pour chaque taille de gap), les participants envisageaient d'accepter la décision de CDV d'un système automatisé. L'analyse de ces résultats, comme en témoignent les figures 56 (p. 162) et 57 (p. 163) ainsi que le test statistique, révèlent une forte association entre la taille du gap et l'acceptabilité de l'automate. Nous reviendrons en détail sur cette association lorsque nous discuterons l'acceptation du système automatisé déployé lors du second volet expérimental.

Par ailleurs, nous nous sommes intéressés à l'existence éventuelle d'une association entre la criticité estimée de la situation et l'acceptabilité d'une décision de changement de voie de la part d'un automate. Ici encore, la criticité est fortement associée à l'acceptabilité.

8.1.3 Discussion des résultats portant sur l'insertion dans le gap lors des changements de voie manuels

Les décisions et évaluations subjectives concernant les différentes situations de conduite ne sont pas les seules informations d'intérêt que nous pouvons tirer des données de ce premier volet expérimental. En effet, la partie 3.4.4 (p. 79) du chapitre 3 pose la question de la position d'insertion dans le gap lors des changements de voie. Nous signalons d'ailleurs dans ce chapitre, que la littérature que nous avons étudiée sur la thématique du changement de voie en conduite manuelle semblait très lacunaire concernant la position relative et le rôle du véhicule ouvrant le gap.

En lien avec ces questions, se trouve aussi la problématique de l'utilisation éventuelle des zones enveloppes dans le cadre de la prise de décision de CDV et de l'évaluation de la criticité de la situation de conduite. Pour rappel, la formulation des hypothèses opérationnelles s'appuyait sur le raisonnement selon lequel nous pouvions supposer que le conducteur, lorsqu'il procède à un changement de voie, cherche possiblement un compromis de risque entre le véhicule ouvrant le gap et le véhicule fermant le gap. Ce postulat, lorsqu'on y applique le principe des zones enveloppes en conjugaison avec les théories de l'évaluation subjective du risque, nous a alors conduits à supposer que, sous ces conditions, le conducteur devrait possiblement commencer à décider de changer de voie au minimum quand les deux conflits de ZE (i.e. avec GO et GC) ne plaçaient aucun véhicule dans la zone de danger (i.e. rouge). Cette hypothèse nous a alors amenés à supposer que les changements de voie ne devraient commencer à intervenir qu'à partir du gap de 1.4s (si ZRT). Or, comme nous l'avons vu avec les résultats et la discussion des données de décision, les faits ne vont pas dans le sens de ces hypothèses, l'un de leurs fondements étant la position d'insertion du véhicule dans le gap et la valeur des TIV au moment du franchissement de la ligne de séparation des voies. L'examen des résultats issus de ces données de performance nous apportera peut-être quelques éclairages explicatifs sur cet échec dans nos prédictions.

8.1.3.1 Position d'insertion dans le gap en conduite manuelle

Dans ce domaine, le premier résultat d'importance concerne la position d'insertion du véhicule des participants dans le gap au moment du franchissement de la ligne de démarcation des voies. Nous avons identifié cet instant comme un moment important dans la manœuvre de changement de voie car c'est à partir de celui-ci qu'une collision avec les véhicules formant le gap devenait possible. Les figures 64 (p. 167) et 65 (p. 167) montrent la distribution des positions d'insertion suivant la

taille du gap. Nous avons alors constaté que, de manière très générale et indépendamment de la taille du gap, les participants s'inséraient dans le premier tiers du gap. Cette nouvelle donnée a des implications concernant non seulement la manière dont nous supposons que se dérouleraient les CDV, mais également la manière dont nous avons programmé le système réalisant les CDV automatisés. De plus, elle nous indique clairement qu'outre le fait que les participants prennent régulièrement la décision de changer de voie en s'insérant dans des espaces de taille inférieure aux prédictions, leur insertion ne se fait pas à l'endroit supposé.

8.1.3.2 Temps intervéhiculaires à l'insertion dans le gap en conduite manuelle

La position d'insertion des participants dans le premier tiers du gap était associée à des valeurs de TIV que nous avons étudiées. Les figures 60 (p. 165) et 61 (p. 166) montrent clairement la distribution des TIV avec les véhicules formant le gap au moment de l'insertion. Tout comme pour la position d'insertion dans le gap, nous pouvons faire le constat d'une singulière différence entre le TIV avec le véhicule ouvrant le gap et celui fermant le gap. Plusieurs résultats retiennent ici notre attention. Le tout premier est le constat que, quelle que soit la taille du gap, dans la très grande majorité des cas, les TIV avec le véhicule ouvrant le gap sont faibles. On notera ainsi particulièrement qu'en dessous d'une taille de gap de 1.8s, au moins 75% des TIV avec GO sont inférieurs à 0.6s. A contrario, nous constatons que les TIV avec le véhicule fermant le gap croissent régulièrement avec l'augmentation de la taille de l'espace d'insertion. Les analyses statistiques effectuées confirment cette tendance visuelle, en montrant que la corrélation entre le TIV et la taille du gap passe de .64, pour le TIV avec GO à .97, pour le TIV avec GC. Pour le premier TIV, la variance expliquée est d'ailleurs négligeable (i.e. 19%), alors qu'elle devient forte pour le second (i.e. 84%). Ces données nous indiquent donc que, non seulement les participants changent de voie en s'insérant préférentiellement à proximité du véhicule ouvrant le gap, mais qu'en plus, ils acceptent un conflit de zone enveloppe important avec ce véhicule avant (i.e. GO). Ce résultat est d'autant plus intéressant que, comme nous l'avons précisé dans le cadre du chapitre introduisant la littérature à propos de cette manœuvre, le véhicule précédent, dans la voie de destination lors du CDV, semble souvent omis ou négligé. Or, au vu de nos données, tout laisse à croire que la répartition des risques effectifs lors de l'exécution de la manœuvre semble se faire en défaveur de ce véhicule.

Tout semble donc se passer comme si, lors d'un changement de voie, le conducteur choisissait de faire entrer le véhicule ouvrant le gap dans sa zone de danger pour limiter son incursion dans les zones de danger et de menace du véhicule arrivant derrière lui dans la voie de destination. À ce propos, si nous portons notre attention de manière plus précise aux distributions des TIV avec le véhicule GC suivant la taille des gaps, nous remarquons qu'à partir du gap d'1.2s et jusqu'au gap de 2.0s, 50% à 75% des valeurs de TIV se situent dans la zone de menace du véhicule GC (i.e. entre 0.6s et 1.2s). Nous retrouvons donc ici, les bornes de taille de gap que nous avons identifiées au niveau des résultats de décision de CDV.

Poursuivons notre raisonnement en reprenant la méthode de construction de nos hypothèses opérationnelles et en y intégrant ces nouvelles données sur la manière dont les conducteurs ont procédé aux changements de voie. En modifiant la position d'insertion dans le gap, pour la faire passer d'une position centrale à une position localisée au niveau de la limite du premier tiers du gap, nous pouvons recalculer les TIV et en déduire les conflits de zones enveloppe consécutifs. Le tableau 42 (p. 215) présente les résultats des calculs obtenus.

TIV recalculés et Conflits de ZE (insertion au premier tiers du gap)

Taille du Gap (s)	Conflit GC (TIV)	Conflit GO (TIV)	% de CDV	Nb de seuils de décision	Niveau de risque subjectif	Niveau d'acceptation du risque
0.8	0.43	0.21	5%	0	> 80	Zone de refus
1.0	0.56	0.28	10%	3	> 80	du CDV
1.2	0.7	0.35	20%	6	≈ 75	Zone d'acceptation avec
1.4	0.83	0.41	25%	6	≈ 60	prise de risque élevée
1.6	0.96	0.48	50%	4	≈ 50	Zone d'acceptation avec
1.8	1.1	0.55	70%	4	≈ 40	prise de risque modérée
2.0	1.23	0.61	80%	3	≈ 30	Zone d'acceptation avec
2.2	1.36	0.68	85%	2	< 20	prise de risque
2.4	1.5	0.75	95%	1	< 20	faible
2.6	1.63	0.81	100%	0	< 20	Zone d'acceptation sans
2.8	1.76	0.88	100%	0	< 20	prise de risque très faible
3.0	1.9	0.95	100%	0	< 20	

Tableau 42 – Matrice de conflits de Zones Enveloppes ré-instanciée suivant la stratégie réelle d'insertion dans le gap et les données de la phase de conduite manuelle

Cette reformulation de nos hypothèses initiales, basée sur la simple prise en compte de la bonne position d'insertion, permet de retrouver les résultats obtenus concernant les TIV. Nous constatons ainsi que, comme pour les données réelles, les bornes identifiées comme les potentiels début et fin de zones de changement de décision correspondent au moment où il devient possible pour le conducteur de s'insérer dans le gap sans entrer dans la zone de danger (i.e. zone rouge) du véhicule GC (i.e. borne minimale de 1.2s) et au moment où il devient possible pour le conducteur de s'insérer dans le gap sans entrer dans la zone de menace (i.e. zone jaune) du véhicule GC (i.e. borne maximale de 2.0s). Au regard de cette relecture de la table des conflits, nous pouvons désormais mieux comprendre, qu'en fait, les données semblent indiquer que la décision de changer de voie est possiblement associée à la taille du gap par l'intermédiaire du conflit de ZE avec le véhicule fermant le gap. Tant que l'insertion au niveau du premier tiers de l'espace impliquera une entrée du véhicule du conducteur dans la zone de danger du véhicule GC, la probabilité de décision de CDV sera dérisoire. Dans ces conditions, si le changement de voie a tout de même lieu, il sera alors fréquemment identifié comme une erreur. À partir du moment où il devient possible de changer de voie en s'insérant dans la zone de menace (i.e. zone jaune) du véhicule suivant dans la voie de destination, la fréquence de décision de changement de voie va augmenter avec la taille du gap, jusqu'à atteindre une quasi-systématicité dès que la taille du gap permettra une insertion dans la zone de sécurité (i.e. $TIV > 1.2s$, zone verte) du véhicule GC.

Cette conception nous permet d'unifier plus clairement les différents résultats dont nous avons fait état : non seulement les conflits de zones enveloppes nous permettent de mieux comprendre la structuration des décisions généralement observées, mais ils nous apportent également un éclairage sur les valeurs de criticité fournies par les participants pour les différentes situations de conduite (colonne

Niveau de risque subjectif du tableau 42, p.215). Nous pouvons en outre compléter ce raisonnement par les données concernant la difficulté estimée de la manœuvre de CDV. Prenons, par exemple, le cas d'un gap d'1.0s. Le conducteur moyen procédera à une estimation de sa taille, et sur cette base, son processus de déploiement cognitif examinera différentes possibilités d'insertion dans l'espace. L'étude des conflits de ZE aboutira à la conclusion que les conflits sont tels, qu'une insertion sera difficile à effectuer car elle demandera de maîtriser la dynamique du véhicule dans une marge de manœuvre très étroite (i.e. double conflit en zone de danger), tout en prenant le risque d'être perçu par le conducteur du véhicule GC comme intrusif, voire agressif (fonction sociale des ZE). Une telle situation, dans la perspective d'un changement de voie, sera donc évaluée comme très critique. À l'opposé, si nous supposons que le gap est de très grande taille (e.g 2.6s), lorsque le conducteur procédera au déploiement cognitif des différentes possibilités de manœuvres d'insertion, il constatera que le conflit des ZE avec GC lui permet de se placer dans la zone de sécurité de ce dernier. La difficulté de la manœuvre sera alors évaluée comme très faible, car seule la distance avec le véhicule GO sera à contrôler. La situation sera alors identifiée comme peu critique et en conséquence, dans la très grande majorité des cas, la décision de changement de voie sera prise.

8.1.4 Apports de l'étude à la modélisation du changement de voie en conduite manuelle

Cette première phase du protocole expérimental visait à nous permettre de mieux comprendre comment les conducteurs procèdent pour évaluer subjectivement le risque d'une situation de CDV, prendre la décision d'exécuter la manœuvre et procéder à celle-ci. Les données que nous avons obtenues nous ont apporté un certain nombre de réponses à cette question qui viennent conforter la théorie d'une décision des conducteurs via un mécanisme de déploiement cognitif (projection mentale) des zones enveloppes. Les conflits potentiels de zones enveloppes révélés lors de cette projection permettent au conducteur de prendre une décision explicable par une matrice de conflits spécifique (que nous avons reformulée au travers du tableau 42, p. 215).

Lorsque le conducteur souhaite effectuer un CDV en s'insérant dans un gap, il évalue la taille de celui-ci et procède à un déploiement cognitif anticipé de la manœuvre de CDV. Ce processus de déploiement va impliquer la projection des zones enveloppes pour lui et pour les autres usagers (ici, les véhicules ouvrant et fermant le gap). Ce processus de projection va permettre au conducteur d'identifier les éventuels conflits entre ses zones enveloppes et celles des autres usagers. À la différence de la situation de tourne à gauche qui avait été précédemment étudiée par [Bornard, 2012] (cf. section 2.3.2, p. 53), la matrice de conflits de ZE dans le cas du CDV implique l'examen de deux conflits potentiels. Le premier avec le véhicule GO et le second avec le véhicule GC. Un autre type de matrice de conflits est donc nécessaire pour analyser ces conflits. Cette première partie de notre étude a permis de mieux instancier cette nouvelle matrice dont nous avons posé la version initiale en première hypothèse (cf. tableau 3, p. 78), puis une version plus précise lors de la définition du système de CDV automatisé (cf. tableau 4, p. 91). Les valeurs de TIV et conflits de ZE que nous avons alors déterminés reposaient sur l'hypothèse d'une insertion au centre du gap. Or, nos données nous ont montré que, de manière générale, les conducteurs s'inséraient au niveau du premier tiers du gap. Cette particularité de la manœuvre doit donc être prise en compte dans la définition de la matrice de conflits du CDV. Le tableau 42 que nous venons de produire représente la nouvelle instanciation de la matrice de conflits (i.e. 42). Lors du déploiement cognitif, le conducteur va inclure cette particularité de la

position d'insertion dans le gap puis déterminer et analyser les conflits de ZE. La matrice ré-instanciée constitue la grille d'interprétation des conflits obtenus avec les différentes possibilités de manœuvre de CDV que va simuler mentalement le conducteur dans le but de prendre sa décision. Suivant ce déploiement et la prise en compte de ses propres capacités à effectuer la manœuvre envisagée, le conducteur va ainsi pouvoir produire une estimation anticipée de la criticité de la manœuvre. Cette criticité aura, entre autres, été guidée par les conflits de ZE. La matrice 42 produit des valeurs de niveau de risque subjectif issues du modèle statistique estimé à partir des données que nous avons analysées. Par ce biais, nous disposons d'une information sur les niveaux de risques subjectifs « *moyens* » associés à chaque configuration de conflit de la matrice. Notre conducteur va donc produire une évaluation de risque subjectif, sur la base des conflits de ZE et de ses facteurs personnels, puis prendre sa décision.

La matrice nous indique qu'il existe trois principales configurations de conflits de ZE. La première est caractéristique des très petits gaps. La figure 92 (p. 217) nous présente cette première configuration possible.

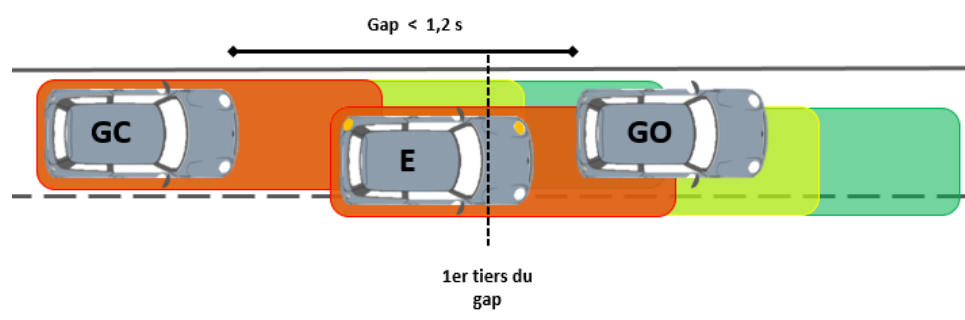


Figure 92 – Exemple de conflit pour un petit gap (zone de refus de CDV)

Dans une telle configuration, l'exécution de la manœuvre se traduirait par un double conflit « *Rouge - Rouge* » pour lequel le risque situationnel objectif avec le véhicule ouvrant le gap et le risque situationnel objectif avec le véhicule fermant le gap sont tous les deux très élevés. En conséquence, l'évaluation subjective du risque sera très élevée, ce qui aboutira à un refus de ce CDV pour la plupart des conducteurs. Si une erreur d'estimation se produit à ce niveau, l'évaluation subjective du risque s'en trouvera affectée et pourra néanmoins aboutir à une décision de CDV. Dans ce type de cas, il est fort probable que le conducteur réévalue a posteriori, après avoir réalisé le CDV, le risque subjectif comme très différent de l'évaluation initialement réalisée par anticipation (via la simulation mentale) au moment de sa prise de décision et qu'il considère, au final, cette décision comme une erreur.

La seconde configuration de conflits de matrice est illustrée par la figure 93 p. 218.

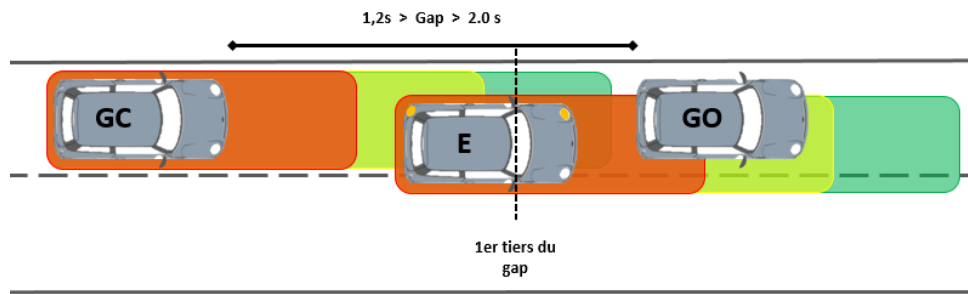


Figure 93 – Exemple de conflit pour un gap moyen (zone de changement de décision)

Ce second cas est particulier, car il se trouve dans une zone de la plage des gaps (de 1.2 s à 2.0 s) dans laquelle s'inscrivent la plupart des seuils personnels de changement de décision (près de 70% des participants). Cette zone se caractérise par des conflits « *Jaune - Rouge* ». Selon les conducteurs, l'évaluation subjective du risque va varier entre des valeurs élevées et faibles. Si cette valeur est faible, le conducteur procédera au CDV. Sinon, il renoncera. Dans cette plage, le conducteur prend des décisions de CDV en prenant délibérément des risques. Dès l'instant où un conducteur considère que la réalisation du CDV ne présente pas trop de difficultés, il estime que la manœuvre et la situation en général présentent un risque inférieur à son risque cible personnel. Il prend alors la décision de procéder au CDV en maximisant la sécurité avec le véhicule arrivant par l'arrière et en contrôlant le risque représenté par le placement temporaire du véhicule ouvrant le gap dans sa zone de danger.

Enfin, la dernière configuration de la matrice de conflits se caractérise par des conflits « *Vert - Jaune* ». La figure 94 p. 218 illustre ce type de situation.

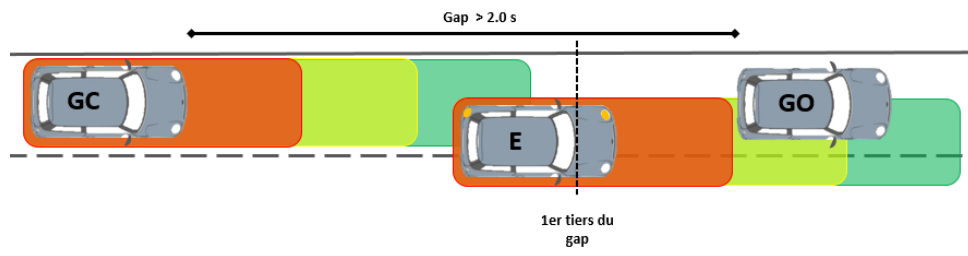


Figure 94 – Exemple de conflit pour un gap de grande taille (zone d'acceptation)

Dans ces cas de figure, le risque sera subjectivement évalué comme faible ou nul par le conducteur qui décidera alors de procéder au CDV dans la plupart des cas. Environ 20% des participants à notre étude ont un seuil de décision situé dans cette dernière configuration de CDV. Cette configuration nous apporte également une donnée supplémentaire dans le sens de l'invalidation de la théorie du risque zéro. En effet, ces situations caractérisées par des gaps de taille supérieure à 2.4 s peuvent parfaitement faire l'objet d'une insertion avec absence de conflit (i.e. « *vert - vert* »). Or nos données nous indiquent que, même lorsque tous les conflits de ZE sont évitables, et donc que le risque zéro est possible et envisageable, les conducteurs n'optent pas pour cette option et préfèrent toujours le recours à la stratégie de maximisation de la sécurité avec le véhicule arrière.

Si la décision du conducteur est d'effectuer le changement de voie, alors il définira un point de

destination dans le premier tiers du gap et cherchera à l'atteindre en ajustant la trajectoire et la vitesse de son véhicule. Ce choix du point de destination traduit une stratégie de gestion du risque qui minimise les risques de collision avec le véhicule arrivant à l'arrière (i.e. GC) tout en acceptant un risque plus important avec le véhicule ouvrant le gap (i.e. GO). Nos résultats montrent également que, pour un certain nombre de tailles de gap pour lesquelles les décisions de CDV sont nombreuses, le risque subjectivement évalué n'est pas nul, bien au contraire. Nos données invalident la théorie du risque zéro de [Näätänen and Summala, 1974] et plaident en faveur de la théorie de l'homéostasie du risque de [Wilde, 1982].

Nos résultats nous montrent qu'en prenant en compte de la position d'insertion dans le premier tiers du gap, il devient alors possible d'expliquer les décisions et évaluations des participants lors des situations de CDV en conduite manuelle sur la base de la théorie des zones enveloppes, en compatibilité avec le modèle COSMODRIVE. Lors de la manœuvre de CDV, le conducteur choisit délibérément de laisser entrer le véhicule GO dans sa zone de danger. Ce choix permet probablement au conducteur d'exercer un meilleur contrôle sur le conflit avec le véhicule GO, d'éviter une entrée dans la zone de danger du véhicule GC (ce qui pourrait le faire passer pour un conducteur agressif), tout en ouvrant la possibilité d'effectuer des CDV en s'insérant dans des gaps de plus petite taille qu'initialement postulés avec une stratégie d'insertion au centre du gap.

8.2 Discussion des résultats concernant l'utilisation du système de changement de voie automatisé

Comme nous l'avons fait pour les résultats issus du volet de conduite manuelle, nous reprendrons dans cette section les principaux résultats obtenus à partir des données enregistrées lors de phase de conduite automatisée du protocole expérimental. Nous concentrerons nos discussions sur trois axes principaux renvoyant aux questions de recherche relatives à la conduite automatisée. Le premier axe concernera l'évolution de l'évaluation de la criticité situationnelle dans le contexte de l'utilisation de l'automate conçu pour notre expérimentation. Le second sera consacré aux questions d'acceptation de l'automate et de son comportement par les participants. Enfin, le dernier portera sur le caractère « *human-like* » du CDV, lorsqu'il est effectué par le système automatisé. Pour ces trois axes, nous nous emploierons à mettre en perspective les résultats obtenus lors de ce volet expérimental avec ceux obtenus lors du précédent. Nous consacrerons enfin un temps à l'examen des résultats en considérant le profil des conducteurs identifiés dans notre échantillon de participants et décrit à la section 7.1.4.4 (p. 141) du chapitre 7.

8.2.1 Criticité de la situation

Comme lors de la phase de conduite manuelle, pour chaque situation de conduite automatisée, le participant était invité produire une évaluation subjective de la criticité situationnelle. Nous avons ainsi pu montrer qu'il existait, là encore, une association statistiquement significative entre la taille du gap et la criticité subjectivement évaluée. Cette relation étant établie, nous nous sommes donc posé la question de la différence entre cette relation et celle précédemment identifiée dans le contexte de la conduite manuelle (i.e. acceptabilité et taille du gap). Pour cela, nous avons produit les figures 69 (p. 172) et 70 (p. 173) qui présentaient les distributions d'évaluation de la criticité selon la taille

du gap et le mode de conduite (i.e. conduite manuelle vs conduite automatisée) pour la première, et les modèles associant la criticité et la taille du gap suivant le mode de conduite pour la seconde. Sur cette base, nous avons pu mettre en évidence un effet d'interaction entre la taille du gap et le mode de conduite. En d'autres termes, si l'évaluation de la criticité reste associée à la taille du gap en toute circonstance, sur la base des données recueillies, cette association varie suivant que le conducteur est en contexte de conduite manuelle ou en contexte de conduite automatisée. L'examen visuel des distributions et des courbes des modèles nous informe davantage sur cette évolution. Il apparaît ainsi que, pour les gaps de taille supérieure à 2.4s, la criticité évaluée semble relativement peu impactée par le mode de conduite. En revanche, pour les gaps de taille plus faible, et en particulier pour les gaps dont la taille est comprise dans l'intervalle [0.8s, 1.8s], la criticité situationnelle tend à être évaluée comme plus faible en conduite automatisée. Nous constatons donc ici, une forme de réduction de la criticité évaluée pour les gaps situés dans la plage de changement de décision. Nous pourrions traduire cet effet comme une forme de « *baisse de la conscience du risque* » situationnel lorsque le CDV est réalisé par l'automate.

8.2.2 Difficulté de la manœuvre

Pour rappel, lors de chaque situation de conduite automatisée (i.e. pour chaque gap), le véhicule procédait au changement de voie. Nous avons donc pu demander à chaque participant d'indiquer à quel point il estimait que la manœuvre aurait été difficile à effectuer s'il avait dû la faire lui-même manuellement. Pour cette mesure, comme dans le contexte de la conduite manuelle, les données mettent en évidence un lien entre la taille du gap et la difficulté estimée pour effectuer le CDV. Lorsque nous comparons la conduite manuelle à la conduite automatisée, nous retrouvons le même phénomène que celui observé pour la criticité. Lorsque la manœuvre a lieu en conduite automatisée pour les gaps de taille faible et moyenne (i.e. inférieure à 2.0s), l'estimation de la difficulté de la manœuvre est légèrement moins importante.

Lorsque que nous nous intéressons au lien entre la criticité et la difficulté, nous remarquons également que les deux dimensions sont étroitement associées. Tout comme dans le cadre de la conduite manuelle, il semble qu'un gap pour lequel la manœuvre est jugée difficile à effectuer sera également jugé comme critique. Nous avons approfondi ce constat en testant l'effet du mode de conduite sur le lien qui associe les évaluations de criticité et de difficulté. Cet examen nous a alors révélé une interaction faiblement significative. Pour mieux interpréter cet effet, il nous faut nous reporter à la figure 76 (p. 177) qui présente en superposition, les données ainsi que les modèles estimés pour la conduite manuelle et pour la conduite automatisée. Nous constatons alors que la différence entre les modèles est visuellement très faible et que les courbes ont la particularité de se croiser. Ce croisement explique potentiellement l'effet d'interaction retrouvé. Toutefois, la significativité étant limitée, il semble plus sage de s'abstenir de conclure à un effet différencié de l'évaluation de la difficulté sur la criticité suivant le mode de conduite. La probabilité que l'association entre les dimensions de criticité et de difficulté du CDV demeure inchangée en passant de la conduite manuelle à la conduite automatisée n'est pas négligeable, selon nos données. Nous pouvons donc conclure globalement que, dans notre étude, l'évaluation subjective de la difficulté d'exécution de la manœuvre a toujours été fortement associée à celle de la criticité situationnelle. Cette donnée semble en accord avec les précédents travaux de [Fuller, 2000], mais également avec la conception de [Banet, 2010] (cf. figure 18, p. 51) dans laquelle la prise de conscience du risque s'appuie sur une évaluation des réponses possibles et des

propres capacités du conducteur à les mettre en œuvre. Dans le cadre de l'utilisation de notre système de CDV automatique *Human-like*, les conducteurs semblent avoir légèrement sous-estimé la difficulté du CDV tout comme sa criticité, comparativement à leur évaluation produite en conduite manuelle (volet 1).

8.2.3 Acceptation de l'automate

Intéressons-nous à présent à la manière dont le système d'automatisation du changement de voie, que nous avons conçu et implémenté sur simulateur de conduite durant notre thèse, a été accepté par les participants impliqués dans notre étude. La figure 77 (p. 177) présente les distributions d'acceptation de l'automate suivant la taille de gap. Les tests statistiques confirment la tendance visible sur cette figure, en mettant en évidence une association statistiquement significative entre la taille du gap et la valeur d'acceptation fournie par les participants. Que ce soit au travers du diagramme en boîte à moustaches ou via la courbe du modèle estimé à partir des données (figure 78, p. 178), il n'échappera pas au lecteur que la courbe d'acceptation présente un profil singulièrement différent de celle obtenue pour les mêmes situations en conduite manuelle. Les figures 79 (p. 179) et 80 (p. 179) montrent clairement une répartition différente des niveaux d'acceptation de l'automate entre les situations de conduite manuelle et les situations de conduite automatisée. Dans le cas de l'acceptabilité / acceptation, le test statistique révèle une interaction claire et très significative. Si les niveaux d'acceptation en conduite automatisée sont relativement similaires aux niveaux d'acceptabilité en conduite manuelle pour les gaps en haut de la fourchette de taille (i.e. $> 2.4s$), une différence se creuse au bénéfice de l'acceptation du mode automatisé pour les gaps de taille inférieure. Cette différence est d'autant plus grande que la taille du gap diminue, avec un maximum possiblement situé dans la zone des gaps de $1.2s$ et $1.4s$. Notons également que cette différence reste marquée pour les gaps les plus petits.

Il s'agit donc d'un phénomène d'importance car il témoigne d'une acceptation meilleure que prévue, en particulier pour les gaps identifiés comme limite lors de la conduite manuelle (i.e. $1.0s$ et $1.2s$).

Pour aller plus loin dans la compréhension de cet effet, nous nous sommes intéressés au lien que peuvent entretenir la criticité de la situation et l'acceptation du système automatisant les CDV. Nous avons ainsi pu noter l'existence effective d'un lien que nous pouvons simplement décrire par la phrase suivante : plus la situation sera jugée critique, moins le changement de voie automatisé sera accepté. La figure 81 (p. 180) illustre cette relation.

Mais il s'avère que cette association, bien que nous n'en ayons pas fait état, est également retrouvée dans le cadre de la conduite manuelle, en effet, dans ce mode de conduite aussi, plus la situation est jugée critique, moins le changement de voie d'un potentiel automate de CDV est accepté. Lorsque nous comparons cette relation en tenant compte du mode de conduite, nous observons une différence entre les courbes (figure 82, p. 181). Les tests statistiques révèlent bien un effet simple de la criticité, ainsi qu'un effet simple du mode de conduite, sans pour autant que l'on puisse constater d'effet d'interaction. Nous pouvons comprendre ces résultats en observant, sur la représentation graphique, que la relation entre la criticité et l'acceptabilité ne change pas de forme suivant le mode de conduite, mais qu'elle présente un simple « *glissement* » en passant de la conduite manuelle à la conduite automatisée. En d'autres termes, la décroissance de l'acceptabilité avec l'augmentation de la criticité reste du même ordre en conduite manuelle et en conduite automatisée, à la différence près qu'elle s'opère pour une criticité plus élevée en conduite automatisée. Ainsi, les participants se sont montrés plus « *tolérants* » à la criticité en conduite automatisée, ce qui s'est traduit par une meilleure acceptation des décisions

de CDV effectivement mises en œuvre par l'automate (dans le volet 2) qu'ils ne l'avaient imaginé à priori dans le volet 1, quel que soit le niveau de criticité.

8.2.4 Maîtrise de la situation par l'automate

Le système d'automatisation du CDV proposé aux participants avait la particularité de toujours procéder à un changement de voie en s'insérant au centre du gap. Nous pouvions donc, en plus de relever l'acceptation de celui-ci, interroger les participants sur leur évaluation de la maîtrise de la manœuvre par l'automate. Les analyses pratiquées sur les données relatives à cette dimension sont intéressantes. Elles révèlent tout d'abord que l'association entre la taille des gaps et l'évaluation de maîtrise de la manœuvre par l'automate existe bien, mais qu'elle est relativement modérée, dans le sens où la taille du gap n'explique que peu la variance de l'estimation de la maîtrise du CDV. L'observation des graphiques 83 (p. 182) et 84 (p. 182) clarifie la lecture de ce résultat, en montrant que, si l'évaluation de la maîtrise de la situation par l'automate diminue bien avec la diminution de la taille du gap, l'évaluation de maîtrise de la situation reste toujours relativement élevée, y compris pour les gaps de petite taille. Autrement dit, même lorsque l'automate prenait l'initiative de s'insérer dans un espace de très petite taille, les participants estimaient que sa maîtrise de la situation restait élevée (à titre d'exemple, pour l'insertion dans le gap de 0.8s, la moyenne des évaluations de maîtrise de la situation reste supérieure à 50).

En suivant le même type de raisonnement que pour les dimensions précédentes, nous nous sommes intéressés à la relation qu'entretenaient les évaluations de criticité et les évaluations de maîtrise de la situation. Une association a bien pu être mise en évidence et sa représentation graphique est visible à la figure 85 (p. 183). L'examen de cette relation révèle deux éléments particuliers. Le premier concerne la distribution des évaluations de maîtrise maximale. En effet, nous constatons que, dans un certain nombre de cas, les participants ont estimé que l'automate maîtrisait totalement la situation, quel que soit son niveau de criticité. Gardons tout de même la mesure, en notant que les cas de criticité très élevée associés à une maîtrise jugée très élevée restent rares. Si nous laissons ces données particulières de côté, nous pouvons examiner le second élément qui repose sur la forme de l'association entre la maîtrise de la situation et la criticité. Nous observons alors qu'il faut que la criticité de la situation soit très élevée pour que l'évaluation de la maîtrise du CDV par l'automate commence à baisser sensiblement. En regardant les choses sous un autre angle, nous pouvons formuler le constat que, lorsque l'évaluation de maîtrise du CDV passe d'une valeur très élevée à une valeur élevée ou intermédiaire, la criticité de la situation, pour sa part, augmente fortement. Cette relation particulière nous amène alors à nous interroger sur la manière dont les participants estimerait la criticité d'une situation dans laquelle l'automatisation serait jugée comme ayant une faible maîtrise. Cette question nous conduit naturellement à celle du lien entre la maîtrise de la situation et l'acceptation de l'automate.

Pour ces deux dimensions, nous trouvons également le même pattern d'association. Le lien observé est statistiquement significatif. La relation entre la maîtrise de la situation et l'acceptation est illustrée par la figure 86 (p. 184). Nous constatons ici aussi, la présence d'évaluations de maîtrise maximales pour tous les niveaux d'acceptation. De plus, il apparaît que, comme pour la criticité, le passage de la maîtrise de la situation de « très élevée » à « élevée ou moyenne » est associé à une diminution importante de l'acceptation. Le fait que notre système d'automatisation du changement de voie soit toujours parvenu à effectuer ses manœuvres parfaitement y est-il pour quelque chose, ou bien s'agit-il d'un lien généralisable ? Si c'était le cas, alors une impression d'excellente maîtrise de

la situation devrait toujours être garantie pour assurer une bonne acceptation des automates. Nous pouvons également nous questionner au sujet de l'effet spécifique de la stratégie d'insertion dans le gap sur cette relation. Une stratégie d'insertion plus « *Human-like* », avec insertion au premier tiers du gap (et non plus au centre), serait-elle également associée à un haut niveau d'évaluation de maîtrise de la situation ?

8.2.5 Confiance dans l'automate

Un dernier type d'évaluation subjective à propos du système d'automatisation du changement de voie était recueilli auprès des participants : leur confiance dans l'automate. Pour cette dimension, comme pour les autres, nous avons d'abord étudié le lien entre les évaluations de confiance et la taille du gap dans lequel l'insertion avait eu lieu. Une relation significative a bien été mise en évidence, et l'observation des distributions (figure 87, p. 185) évoque une grande similarité entre les niveaux de confiance accordés et l'acceptation de l'automate. Nous avons donc procédé à un examen de cette relation qui s'est révélée très forte. Nous pouvons donc en déduire que, lorsque l'acceptation est forte, la confiance l'est aussi. L'inverse est tout aussi vrai et sans doute plus juste en terme de « causalité cognitive » : plus la confiance est élevée, et plus l'acceptation sera forte.

Les résultats portant sur l'évaluation de criticité et sur l'acceptation de l'automate ayant été passés en revue, nous pouvons nous consacrer aux résultats traitant du caractère « *human-like* » de la manœuvre de CDV.

8.2.6 Position d'insertion dans le gap et TIV

La position d'insertion du véhicule automatisé dans le gap lors du CDV était contrôlée de sorte que celle-ci se fasse au centre du gap et à la même vitesse que le trafic, dans la voie de destination. Les résultats obtenus lors de la phase de conduite manuelle nous indiquent clairement que cette position d'insertion, ainsi que les TIV à l'insertion de notre système, ne respectent pas la « *manière humaine* » de procéder. Pour autant, cela n'a pas empêché une bonne acceptation par les participants. Toutefois, nous pouvons réfléchir au rôle exact de la position d'insertion dans le gap sur l'acceptation du système. Une stratégie d'insertion « *Human-like* » au premier tiers de l'espace se traduirait-elle par un bénéfice supplémentaire d'acceptation ou bien devons nous nous attendre à un effet inverse ? À titre de complément, nous pouvons ici indiquer qu'au cours de la phase de conduite automatisée et au cours des débriefings, un certain nombre de participants ont spontanément verbalisé à propos de ce positionnement au cours de l'insertion. La plupart d'entre eux ont émis des commentaires du type « *je ne procède pas comme ça pour changer de voie* », ce à quoi ils ajoutaient parfois « *elle gère mieux les distances avec les autres véhicules* ». Cette stratégie, en s'écartant légèrement de la méthode humaine, a donc possiblement influencé les impressions quant à la maîtrise et l'acceptation de l'automate. Il serait donc intéressant de réitérer ce type d'expérimentation en intégrant ces nouvelles données sur la position d'insertion dans le gap.

Un autre aspect du caractère « *human-like* » de l'automate a pu être étudié : la trajectoire du CDV.

8.2.7 Position dans la voie et trajectoires

Concernant la variation de la position sur la route du véhicule automatisé, lors du changement de voie, nous avons procédé à quelques analyses destinées à comparer l'évolution de la position du véhicule piloté par le système de changement de voie automatisé à celles enregistrées auprès des participants lorsqu'ils effectuaient un CDV manuellement, au cours du premier volet expérimental. Nous avons pour cela procédé à un alignement de toutes les trajectoires, puis à un échantillonnage des positions y pour différentes coordonnées x (i.e. tous les 10m). La figure 91 (p. 193) présente ces données ; elle est complétée par le tableau 26 (p. 194), qui décrit la distribution des écarts entre la position y du véhicule automatisé pour chaque valeur de x , et la position y médiane des participants aux mêmes valeurs de x . Plus simplement, ces calculs et représentation graphique nous permettent d'apprécier la « distance » entre l'évolution de la position du véhicule automatisé au cours des changements de voie, et celles des participants aux cours de leurs propres manœuvres réalisées manuellement. Considérant ces éléments, il apparaît que l'évolution de la position du véhicule automatisé semble relativement proche de celles des participants. Il s'agit donc là d'un élément en faveur du caractère « *human-like* » de la trajectoire calculée puis suivie par notre système d'automatisation du changement de voie. Nous pouvons ajouter à ce résultat le fait que les participants n'ont jamais spontanément évoqué la trajectoire et le mouvement latéral du véhicule automatisé lors du second volet expérimental et du débriefing. Contrairement à ce qui s'est produit au sujet de la position d'insertion dans le gap, personne n'a indiqué avoir noté une différence dans la gestion de la composante latérale du mouvement du véhicule par rapport à sa propre façon de procéder. Il semble donc que l'utilisation des courbes de Bézier utilisées par COSMODRIVE pour calculer ses trajectoires puis réaliser ses manœuvres de CDV soit en bon accord avec le comportement humain, dans les mêmes situations.

Nous devons cependant rester prudents dans nos conclusions, car la méthode employée pour comparer les positions sur la route, et donc indirectement les trajectoires, reste rudimentaire. Plusieurs limites doivent ainsi être notées.

La première concerne la procédure d'alignement des trajectoires. Dans l'idéal, cet alignement devrait être fait sur la base de critères objectifs et validés concernant l'étape du changement de voie qui est définie comme point d'alignement. Or, nous avons fait le constat au chapitre 3 (section 3.2.2, p. 61) que la segmentation de cette manœuvre ne fait pas l'objet d'un consensus clair dans la littérature, et que les indicateurs utilisés sont variables. Ainsi, par exemple, dans la littérature que nous avons étudiée, nous ne sommes pas parvenus à repérer d'indicateurs clairs et reconnus pour identifier le début et la fin d'un CDV. Cette lacune dans la littérature nous a donc conduits à définir empiriquement un moment que nous pouvions considérer comme la limite entre la fin du schéma de changement de voie et le début du schéma suivant (suivi du véhicule ou maintien dans la voie). Il pourrait être intéressant d'étudier plus en profondeur ces points particuliers, afin de développer une méthodologie plus robuste pour l'extraction et l'alignement des trajectoires à des fins de comparaisons.

La seconde concerne la nature des données comparées. Nous nous sommes ici restreints à l'étude des positions en x et y sur la voie. Or, une trajectoire est également caractérisée par sa dimension temporelle et ses dimensions spatiales qui dans leur association, font émerger les notions de vitesse et autres dérivées associées. Nous avons relevé dans la littérature que la dimension de vitesse avait été identifiée comme impliquée dans la trajectoire lors du changement de voie, au travers de l'angle du volant (cf. 3.2.2, p. 61) [van Winsum et al., 1999]. Il serait donc souhaitable de pouvoir à minima intégrer la dimension temporelle à nos analyses. Des méthodologies de fouilles de trajec-

toires existent [Etienne et al., 2009]. Elles permettraient une meilleure qualité d'analyse du caractère « *human-like* » de la trajectoire du système de changement de voie automatisé. Malheureusement, les contraintes techniques et temporelles ne nous ont pas permis de conduire ces analyses pour le moment, mais nous envisageons d'y avoir recours dans la suite de ces premiers travaux.

8.2.8 Apport de la recherche pour la conception d'un système de CDV automatisé Human-like

Dans les sections précédentes, nous avons discuté le détail des résultats obtenus lors de la phase de conduite automatisée de l'expérimentation, suivant trois axes principaux que sont l'évaluation de criticité de la situation, l'acceptation de l'automate et le caractère *human-like* du système de changement de voie automatique conçu pour notre expérimentation sur simulateur. Nous avons pu constater que des effets se manifestent lors de l'expérience du système d'automatisation du CDV par les participants. Ces effets concernent à la fois les évaluations subjectives portées sur la situation et sur l'évaluation du système. Nous avons mis en évidence un effet de dégradation de la conscience du risque situationnel associée à une dégradation similaire de l'évaluation subjective de la difficulté que représenterait la gestion de la situation. Nous avons toutefois constaté que la relation qu'entretiennent l'évaluation de la criticité et l'évaluation de la difficulté de la manoeuvre ne semble que légèrement affectée par l'utilisation du système d'automatisation. Ce sont donc visiblement les deux dimensions qui sont impactées ensemble, et non leur relation mutuelle. Dans notre cas, l'automate se montrait capable de procéder au changement de voie dans toutes les situations proposées. Cette capacité a laissé aux participants une impression de maîtrise du CDV par l'automate. Il est donc envisageable d'imaginer que les participants aient commencé à reconsidérer leur évaluation de la difficulté à gérer la situation en même temps que sa criticité. Par ailleurs, nous avons mis en évidence une augmentation de l'acceptation de l'automate par rapport à ce que les participants préoyaient d'accepter initialement. De surcroît, nous avons pu constater que cette augmentation de l'acceptation n'était pas homogène, mais plus marquée pour les petits espaces et pour les espaces que nous avons identifiés comme « *charnière* » pour la prise de décision du changement de voie (i.e. 1.0s et 1.2s). En d'autres termes, les espaces pour lesquels les décisions de CDV sont à la limite de l'acceptable et de l'erreur en conduite manuelle, sont, en contexte d'automatisation, estimés comme moins critiques, moins difficiles à gérer, relativement bien maîtrisés par l'automate, et enfin beaucoup mieux acceptés que prévu. Nous avons également constaté que la confiance accordée à l'automate était, dans notre étude, très étroitement associée à l'acceptation de celle-ci. Nous supposons par ailleurs qu'un automate ayant un comportement très similaire à l'humain serait potentiellement mieux accepté. Si nous ne pouvons pas directement répondre à ce questionnement, nous avons tout de même pu tirer diverses informations et résultats utiles à une meilleure conception d'un système de CDV automatisé.

Nous avons dans un premier temps découvert que notre automate ne respectait pas la même position d'insertion dans le gap que les conducteurs participant à l'étude. Cette information est d'autant plus intéressante que nous avons pu constater qu'un certain nombre de conducteurs le remarquaient. Nous pouvons donc nous poser la question de savoir à quel point cette différence de stratégie a pu influencer sur l'acceptation, la criticité, la difficulté estimée de la manoeuvre, ou encore la maîtrise évaluée de la situation. Toutes ces dimensions ayant été impactées par l'automatisation de la manoeuvre, comment auraient-elles évolué si la position d'insertion avait semblé plus « *naturelle* » ?

Dans la même veine de questionnement, nous avons également pu noter que la trajectoire de

CDV automatisé semblait relativement proche de la trajectoire humaine, ce qui tend à valider cette dimension *human-like* de l'automate. Fait notable, aucun participant n'a indiqué avoir ressenti de différence avec sa propre façon de faire sur cette dimension particulière. Ceci pourrait donc inciter à penser que l'écart par rapport au comportement humain habituel est probablement minime et qu'il est susceptible d'expliquer, au moins en partie, le bon niveau d'acceptation comme les autres évaluations subjectives à propos de la situation de conduite. Si nous nous rapportons ici au lien qu'entretiennent la maîtrise de la manœuvre et l'acceptation de l'automate ou encore la criticité de la situation, nous pouvons imaginer qu'un écart trop important entre le comportement de l'automate et l'habitude humaine aurait, dans un premier temps au moins, été interprété comme une moindre maîtrise de la situation, ce qui se serait probablement traduit par une très forte dégradation de l'acceptation de l'automate et / ou une très forte augmentation de la criticité situationnelle ressentie. L'enjeu du recours à la modélisation cognitive et à l'étude du comportement des conducteurs dans le cadre du développement d'automates à la conduite n'est donc pas négligeable, dans la mesure où l'acceptation, la confiance accordée, le risque évalué et possiblement l'adoption de systèmes automatisés par l'utilisateur semblent en être améliorés.

8.3 Discussion des résultats concernant les effets induits par l'expérience du système de CDV automatisé sur la conduite manuelle

Si nous considérons à présent les effets induits par l'automatisation lors de la reprise d'une conduite manuelle, nous avons vu, au cours de la seconde phase expérimentale, que l'utilisation du système de CDV automatisé avait un effet de réduction des évaluations de criticité et de difficulté des manœuvres, en particulier pour les gaps limites (i.e. de très faible taille). Le côté *Human-like* de notre système de CDV automatisé, ainsi que sa capacité à procéder à des insertions dans de petits gaps, pourraient être vus comme une forme d'augmentation de l'humain. Les constats associés de son acceptation plus forte que prévu, d'évaluations de maîtrise de la situation élevée et d'évaluations subjectives de risque plus faibles, peuvent laisser à penser qu'une influence de l'utilisation de ce type de fonctionnalité d'automatisation de la conduite peut avoir des effets dépassant le simple cadre des périodes d'utilisation. D'un point de vue éthique, il nous semblait important de chercher à vérifier l'existence de ce type « *d'effets secondaires* » induits par l'utilisation de l'automate. Nous pouvions donc légitimement nous poser la question d'un effet à posteriori de l'expérience vécue du système d'automatisation du CDV lors de situations de conduite manuelle ultérieures. Pour cela, nous avons déterminé que, dans l'hypothèse de ce type d'effets, leur manifestation devrait être plus marquée au niveau du seuil de décision propre à chaque participant. Aussi, nous avons conçu cette dernière phase de l'expérimentation de sorte qu'elle cible spécifiquement ces seuils de décision personnels.

Nous commencerons par discuter les résultats qui ont été obtenus au cours de cette ultime phase expérimentale, puis nous discuterons leurs impacts et leurs apports en regard des autres résultats obtenus lors des précédents volets de notre étude. Rappelons que, lors de cette ultime phase de l'expérimentation, le seuil de décision des participants était estimé au moyen d'un algorithme d'analyse des décisions de CDV qu'ils avaient prises au cours du premier volet expérimental. Des situations de conduite manuelle présentant des gaps de taille proche de ce seuil étaient alors présentées au participant, afin qu'il puisse prendre la décision d'effectuer ou non son CDV. À l'issue de chaque situation de conduite, l'intéressé était invité à évaluer la criticité de la situation, la difficulté de la manœuvre ou encore l'acceptation du CDV par un système de CDV automatisé.

8.3.1 Décisions de changement de voie

Pour pouvoir considérer les données obtenues lors de ce troisième volet expérimental, nous devons en premier lieu, vérifier la validité des situations proposées par l'algorithme d'approximation du seuil de décision. Pour cela, nous avons donc commencé par effectuer des comparaisons uniquement basées sur les situations de conduite issues du premier volet expérimental. Nous avons ainsi comparé les décisions de CDV pour les seuils calculés, aux décisions prises pour des gaps de tailles immédiatement supérieure et inférieure (i.e. $+0.2\text{ s}$ et -0.2 s). Nous avons alors pu constater que les décisions de CDV prises pour le gap seuil étaient significativement moins nombreuses que les décisions de CDV prises pour le gap de taille immédiatement supérieure (i.e. $+0.2\text{ s}$) et, qu'en outre, cette augmentation de la fréquence des décisions de CDV franchissait la barre des 50% entre le gap seuil et le gap immédiatement supérieur. Par ailleurs, nous n'avons pas mis en évidence de différence significative concernant les décisions de CDV entre le gap seuil et le gap immédiatement inférieur (i.e. -0.2 s). Ces résultats fournissent plusieurs informations importantes. La première et la principale est que notre algorithme semble confirmer l'existence du seuil de décision théorique malgré l'étalement des décisions observées.

La seconde est que notre algorithme a été en mesure d'approximer ce seuil de décision de manière suffisamment fine pour en déterminer la position à 0.2s de précision. Notre algorithme a par ailleurs montré que son approximation tendait à sous estimer légèrement la valeur du gap seuil (ce qui pouvait être attendu dans la mesure où, par conception, il favorisait le choix du gap jugé le plus risqué par les participants). Ces résultats nous permettent de valider l'utilisation des valeurs de seuil obtenues dans les analyses qui ont été faites par la suite.

Sachant que nous avons été en mesure d'approximer le gap seuil de décision de chaque participant, nous avons pu tester l'existence d'un effet induit par l'utilisation de l'automate aux alentours de ce seuil de décision. Notre protocole adaptatif nous a permis de présenter, à nouveau, à chaque participant une situation de conduite au plus proche de son gap seuil de décision personnel, puis, une situation de conduite avec un gap de taille immédiatement supérieure, et enfin une situation de conduite avec un gap de taille immédiatement inférieure au gap seuil de décision. Nous avons donc recueilli de nouvelles informations concernant les décisions, les évaluations de criticité et de difficulté pour ces situations de conduite manuelle, ainsi que l'acceptation a posteriori d'un système de changement de voie automatisé.

Au niveau du gap seuil de décision, nous avons montré que les décisions de changement de voie passaient de 33% à 72%, ce qui représente une augmentation significative de leur fréquence. Nous avons ensuite montré que pour le gap de taille immédiatement supérieure, comme pour celui de taille immédiatement inférieure, nos données ne permettaient pas de conclure à un effet d'augmentation de la fréquence des décisions de CDV. En reprenant les résultats obtenus pour le gap seuil de décision et le gap immédiatement supérieur lors de la phase de conduite manuelle (avant utilisation du système d'automatisation du CDV), on constate qu'au cours du volet après automatisation, la fréquence des décisions de CDV au gap seuil, est très similaire à celle obtenue pour le gap de 0.2s supérieur au gap seuil en conduite manuelle pré-automatisation. En revanche, on observe que pendant ce volet *post-automatisation*, la fréquence des décisions de CDV au gap de 0.2s inférieur au gap seuil de décision est analogue à celle obtenue lors de la phase de conduite manuelle avant expérience de l'automatisation, pour le gap seuil et le gap immédiatement inférieur. Tout semble donc se passer comme si le seuil de décision de changement de voie des participants était descendu (au moins temporairement) de 0.2s après expérience du système de conduite automatisée.

8.3.2 Évaluations subjectives de risque, de difficulté et acceptation à posteriori

Les mêmes analyses ont été effectuées pour les évaluations subjectives de risque de la manœuvre (i.e. criticité). Les résultats obtenus présentent le même profil que ceux concernant la décision de CDV. Pour cette dimension, nous relevons pour le gap seuil de décision, une évaluation de la criticité significativement inférieure à celle précédemment observée lors du premier volet expérimental. Cette diminution n'est, ici encore, observée que pour le gap seuil de décision. Les données semblent donc également évoquer un phénomène de descente du seuil limité à un gap de 0.2s.

Pour les évaluations subjectives de difficulté à effectuer la manœuvre, le même effet de diminution que pour la criticité est mis en évidence pour le gap seuil. Un effet moins significatif est aussi relevé pour le gap de taille immédiatement supérieure, avec toutefois quelques réserves quant à la validité de celui-ci. Pour ce qui est du gap de taille inférieure, comme pour les autres mesures, aucun effet statistique ne peut être montré.

Concernant l'acceptation a posteriori, un effet significatif d'augmentation de l'acceptabilité est mis en évidence pour le gap seuil. Comme pour les décisions et la criticité, cet effet n'est pas retrouvé pour

les gaps de taille immédiatement supérieure et inférieure.

Enfin, les derniers résultats, relatifs à la position et aux conflits de ZE au moment de l'insertion dans le gap seuil de décision, semblent indiquer que l'effet induit de l'utilisation de l'automate ne parvient pas à atteindre les aspects plus profonds et intégrés de la réalisation de la manœuvre. L'influence de l'automate se limite donc, dans notre étude, aux décisions et évaluations subjectives pour le gap seuil de décision. La stratégie d'insertion dans le gap reste, pour sa part, inchangée.

8.3.3 Apports de l'étude concernant les effets induits par l'utilisation du système de CDV automatisé

Nous pouvons donc affirmer que, dans le cadre de notre protocole expérimental, un effet induit par l'expérience d'utilisation de l'automate a pu être mis au jour. Cet effet prend la forme d'une baisse de 0.2s du seuil de décision de CDV lors de la reprise ultérieure d'une conduite manuelle. Cet effet n'a pu être noté que pour le gap seuil de décision, les gaps de taille immédiatement supérieure et inférieure semblant pour leur part ne pas avoir été affectés. Cette restriction de l'effet ouvre la voie à plusieurs explications et limites potentielles. En effet, il est tout à fait envisageable que seul le gap seuil de décision puisse être concerné par ce phénomène. Le gap de taille supérieure donnant déjà souvent lieu à des CDV, il est possible que l'effet ne puisse tout simplement pas s'y manifester d'une manière suffisante pour avoir été notable dans le cadre de notre protocole. Nous pouvons également imaginer que la portée de l'effet soit limitée, et que lorsqu'un gap est d'une taille telle qu'il dépasse cette portée, il n'en est pas affecté. Nous pouvons enfin envisager que l'effet observé pour le gap seuil de décision ne bénéficie que d'une courte durée de vie et qu'au moment de la seconde situation de conduite post-automatisation celui-ci ce soit déjà éteint. En considérant ces limites et incertitudes, nous ne pouvons pas conclure quant au détail de l'effet observé, qu'il s'agisse de sa portée ou de sa *durée de vie*. Néanmoins, nous savons désormais qu'un tel phénomène est possible et qu'il conviendrait de l'étudier de manière plus approfondie.

Au cours de notre expérimentation, la durée du volet de conduite avec l'automate avoisinait une heure. Cette durée, relativement modeste, semble avoir néanmoins été suffisante pour permettre l'émergence d'une forme d'apprentissage par les conducteurs, de la possibilité d'effectuer des CDV dans un espace plus petit que celui qu'ils ont l'habitude de définir comme leur limite de décision. Il apparaît qu'à la suite de cette utilisation relativement courte, les conducteurs ayant participé à notre étude ont, au moins temporairement, intégré cette information pour la mettre en pratique lors des situations de conduite manuelle ultérieures. Ce phénomène, bien que restant à étudier plus en détail, mérite notre attention. Il évoque celui précédemment rapporté par [Wilde, 2014] concernant l'introduction des systèmes ABS chez les chauffeurs de taxi Munichois. Il évoque également l'effet sur les distances de suivi d'un train de camions automatisé (i.e. platoon) mis en évidence par [Gouy et al., 2014]. Cet effet pose aussi la question de l'implication du caractère *Human-like* de notre automate. Les différents aspects *Human-like* ont-ils contribué à la descente du seuil de décision et, si oui, dans quelle mesure ? La stratégie d'insertion au centre du gap de notre automate a-t-elle favorisé la prise de conscience par les participants de la possibilité de prendre des décisions de CDV pour des gaps de taille inférieure ? Dans quelle mesure cette *descente du seuil de décision* représente-t-elle un risque supplémentaire d'accidentologie ou de perturbation du trafic ? À quel point cet effet, ici mis en évidence dans le cadre d'une étude sur simulateur, est-il généralisable aux situations de conduite sur route réelle ?

8.4 Apports pour le modèle COSMODRIVE

L'ensemble des résultats que nous avons obtenus vient alimenter le modèle COSMODRIVE sur certains aspects. Nous avons ainsi pu comparer, dans une certaine mesure, la trajectoire utilisée lors des CDV effectués par notre automate et calculée au moyen de courbes de Bézier, avec les trajectoires prises par les conducteurs au cours de CDV manuels. Les résultats de cette comparaison tendent à valider l'utilisation des courbes de Bézier pour le calcul de la trajectoire à suivre.

Concernant la manière dont le modèle doit procéder pour évaluer le risque situationnel et prendre la décision d'effectuer un CDV, nous avons clairement pu montrer que l'approche du risque zéro [Näätänen and Summala, 1974] était invalidée. Que ce soit dans les cas de conduite manuelle ou de conduite assistée par un automate *Human-like*, les conducteurs acceptent et prennent délibérément un risque qu'ils estiment contrôlable. De plus, nous avons pu montrer que les zones enveloppes permettaient de comprendre et de prédire les décisions de CDV. Toutefois, là encore, l'approche stricte posée par la théorie du risque zéro ne convient pas. En effet, nous avons montré, au travers de la mise en évidence de la stratégie d'insertion maximisant la sécurité arrière, que le respect des zones enveloppes n'était pas strict et que les conducteurs prenaient délibérément un risque en laissant entrer le véhicule ouvrant le gap dans leur zone de danger (i.e. zone rouge). Cette stratégie est plus conforme à une approche de type homéostatique du risque. Nous avons d'ailleurs pu mettre en évidence la présence d'une forme de seuil de risque subjectif correspondant au seuil de décision. Ce constat nous a permis de créer une nouvelle forme de matrice de conflits, à l'image de celle développée par [Bornard, 2012], et capable de prendre en compte des conflits avec deux autres véhicules du trafic. Cette nouvelle matrice du conflit n'accorde pas un poids similaire aux conflits selon qu'ils se produisent avec le véhicule arrivant par l'arrière ou avec le véhicule précédent dans la voie de destination. Cette conception permet de mettre en évidence des cibles de risques différentes pouvant aboutir à des décisions de CDV avec prise de risque délibéré.

Nous disposons maintenant d'une meilleure compréhension de la manière dont les conducteurs évaluent le risque, prennent la décision de changer de voie et procèdent à une insertion entre deux véhicules lors de ce CDV. Nous pouvons donc, dans l'avenir, envisager d'intégrer ces nouvelles connaissances dans l'implémentation actuelle de COSMODRIVE afin qu'il puisse procéder à des changements de voie en s'insérant dans une file de véhicules.

8.5 Discussion de la méthodologie employée et des résultats obtenus

Au cours de cette recherche, nous avons employé une méthodologie unifiée impliquant la mise en œuvre d'un protocole complexe que nous qualifions de *dynamique*. Ce choix méthodologique présente des avantages et des limites. Parmi ces dernières, nous devons évoquer la question de la durée et de la redondance de la tâche expérimentale. Cette contrainte était inhérente au protocole pour recueillir des données fiables. Nous devions répéter les mesures et standardiser la situation de conduite au prix de la durée et de la répétitivité. Pour limiter l'ennui et la baisse de vigilance des participants, l'expérimentateur a donc dû se montrer très attentif pour proposer des pauses et limiter le désinvestissement potentiel du participant. En nous assurant d'un bon maintien de l'engagement du participant dans le protocole, nous avons pu recueillir des données de qualité suffisante pour nous en servir immédiatement pendant l'expérimentation.

Nous touchons ici à l'un des points cruciaux de cette méthodologie d'ingénierie cognitive : l'intri-

cation des volets expérimentaux. Le fait de pouvoir utiliser les données du participant pour adapter personnellement, et en direct, certains aspects du protocole, ouvre la voie à de nouveaux types d'études plus à même d'intégrer la singularité du participant à la nécessaire généralité requise en science. Nous pouvons à présent envisager de poursuivre dans cette direction, en complexifiant les analyses effectuées en direct ou en adaptant davantage le protocole et les situations de conduite étudiées. Cette démarche n'est cependant pas totalement nouvelle. On la retrouve, par exemple, dans la méthode d'entretien critique chez Piaget. Nous avons simplement trouvé le moyen de la mettre en œuvre, via l'informatique, dans le cadre d'une étude sur simulateur de conduite. Nous touchons donc là à l'un des aspects fondamentaux de la cognitive : l'utilisation de l'outil informatique pour étudier, comprendre et s'adapter à l'être pensant [Claverie, 2005].

La grande standardisation des situations de conduite et le recours au simulateur de conduite peuvent également être vus comme des limites à notre étude. Nous pouvons toutefois, d'un côté, relativiser cette limite de la standardisation et de la répétition en soulignant que, même sur route réelle, la conduite sur autoroute est répétitive et très peu variée et de l'autre, profiter de cette limite pour élargir notre questionnement dans un but de généralisation. Si nous avons désormais une vision plus claire de la manière dont un conducteur effectue un CDV libre, quels aspects de la décision, de la manœuvre et des évaluations subjectives sont affectés par de petits changements dans la situation, par exemple l'imposition d'une contrainte supplémentaire dans la voie d'origine forçant le CDV ? Comment les choses évoluent-elles dans le cas d'un CDV de rabattement de la voie de gauche vers la voie de droite (dans un trafic allant plus lentement que le véhicule) ? Comment expliquer le choix de la stratégie de maximisation de la sécurité avec le véhicule arrière ?

Notre recherche soulève également des questions concernant la conception des systèmes d'automatisation du CDV et de la conduite en général. Nous avons vu que le système que nous avons conçu pour les besoins de cette recherche bénéficiait d'une acceptation meilleure que prévue, et nous avons remarqué que tous les participants, y compris les plus réfractaires envers le véhicule autonome, témoignaient de cette meilleure acceptation. Quelle est la part de la dimension *Human-like* dans ce résultat positif ? Obtiendrait-on une amélioration supplémentaire de l'acceptation et de la confiance en programmant notre automate pour qu'il s'insère dans le premier tiers du gap ? Ou bien, au contraire, la stratégie de compromis du risque a-t-elle joué un rôle positif en laissant aux participants une impression de maîtrise technique de la situation ? Dans quelle mesure cet effet sur l'acceptation est-il transposable à la conduite sur route réelle ?

Nous avons montré que lors de la manœuvre de CDV, le conducteur prenait délibérément des risques, tant au niveau de la taille du gap à partir duquel il décidait de s'insérer qu'au niveau de la manière dont il procédait pour exécuter cette action. Il prend ces risques parce qu'il estime en avoir le contrôle et la capacité de maîtrise. Dans quelle mesure devons-nous technologiquement suivre cette tendance ? Nous pouvons imaginer qu'un comportement trop prudent de la part des systèmes d'automatisation risquerait d'engendrer une forme de frustration de la part de l'utilisateur. À l'opposé, nous avons vu qu'un comportement plus téméraire de l'automate pouvait être associé à une bonne acceptation. Toutefois, il nous faut rappeler les résultats issus des recherches sur l'évaluation subjective du risque en conduite automobile obtenus dans la littérature et présentés dans le second chapitre. Ces résultats mettent en avant la notion d'adaptation comportementale et d'actualisation possible du niveau de risque cible. Nos données vont dans le sens de la théorie de l'homéostasie du risque et vont au delà en montrant l'émergence du phénomène d'adaptation comportementale au travers d'une diminution du seuil de décision consécutive à l'utilisation de l'automate. Quelle est l'ampleur réelle de

cet effet ? Peut-il amener des conducteurs à prendre des risques au point de dépasser leurs capacités de maîtrise ? Quels sont les mécanismes de l'apparition de cet effet induit associé à l'utilisation de l'automate ? Ce sont autant de questions auxquelles nous devons répondre si nous voulons à l'avenir, proposer ces nouvelles technologies au grand public tout en satisfaisant aux contraintes de sécurité et d'acceptation. D'une certaine manière, nous pouvons nous poser la question de savoir si l'utilisation d'un automate plus performant que le conducteur ne constitue pas une forme d'augmentation de l'humain par apprentissage passif. Nous pourrions voir ceci comme un progrès dans la mesure toutefois où cela ne conduirait pas à infléchir trop fortement les conducteurs vers une surestimation de leurs capacités gérer le risque ou vers une sous-estimation du risque évalué, ou comme un problème dans le cas contraire ([Claverie, 2010]). Les effets induits que nous avons mis à jour sont-ils les indicateurs d'un nouveau type de biais cognitif ? Dans notre étude cet effet induit semble limité à la fois dans l'ampleur de la « *descente* » du seuil de décision (i.e. $-0.2s$) et dans la « *profondeur* » d'impact de l'effet (i.e. décision et évaluations subjectives mais pas implémentation de la manœuvre). Mais l'utilisation de l'automate était également limitée, nous pouvons donc nous poser la question de l'ampleur et de la persistance de cet effet avec une utilisation à plus long terme. Le conducteur utilisant régulièrement l'automate verra-t-il cet effet s'amplifier ou bien disparaître par expérience de prises de risque trop importantes à la suite de la manifestation de cet effet induit ?

Conclusion

Ce travail de thèse s'est intéressé à l'étude et à l'analyse des comportements de conduite ainsi qu'à la modélisation de la cognition du conducteur dans le cadre de la manœuvre de changement de voie libre sur autoroute. Nous avons fait le constat, dès le premier chapitre, du fait que la complexité de l'activité de conduite était en grande partie masquée. Le CDV libre sur autoroute, avec insertion entre deux véhicules du trafic, est très courant et la plupart des conducteurs l'exécutent sans en ressentir la difficulté ou la complexité.

Dans le premier chapitre, nous avons fait état de l'avancement des conceptions et modèles de la cognition du conducteur et avons exposé plus en détail, le contexte de modélisation cognitive dans lequel nous nous inscrivons au travers des travaux visant au développement de COSMODRIVE ([Bellet et al., 2003]) en cours depuis une vingtaine d'années au laboratoire LESCOT.

Nous avons ensuite, au cours du second chapitre, mis un accent particulier sur les questionnements scientifiques et la littérature concernant l'évaluation subjective du risque en conduite automobile. Ce faisant, nous avons mis en avant les avancées actuelles sur cette thématique dans le cadre des travaux pour le développement de COSMODRIVE notamment en évoquant les évolutions terminologiques et conceptuelles concernant les processus cognitifs sous-tendant l'évaluation cognitive du risque. Nous avons fait émerger de cette revue de la littérature, l'intérêt de la notion de conscience du risque ([Bellet and Banet, 2012]) ainsi que l'utilisation de la théorie des zones enveloppes pour prévoir et expliquer les décisions et les évaluations subjectives du risque dans le cadre de la manœuvre de tourne à gauche ([Bornard, 2012]). Nous avons également attiré l'attention sur la divergence des théories les plus discutées dans le domaine de l'évaluation du risque, que sont la théorie du risque zéro ([Näätänen and Summala, 1974], [Summala, 2007]) et la théorie de l'homéostasie du risque ([Wilde, 1982], [Wilde, 2014]).

Notre manœuvre d'intérêt étant le CDV, nous avons, dans le troisième chapitre, fait état des travaux dans ce domaine en montrant comment cette manœuvre était étudiée et quelles avaient été les avancées principales la concernant dans le cadre des travaux de développement de COSMODRIVE. Nous avons ainsi pu constater un certain nombre de manques dans la littérature à propos des changements de voie avec insertion dans un gap, ainsi que dans la prise en compte de l'évaluation subjective du risque dans les processus de décision dans le contexte de cette manœuvre. En conjuguant les éléments de problématique soulevés lors des deux précédents chapitres et les questionnements posés concernant cette manœuvre, nous avons pu identifier et définir la situation que nous cherchions à comprendre. Nous en avons déduit que nous devons étudier le changement de voie libre sur autoroute, par insertion dans un gap du trafic. Nous avons pu utiliser la théorie des zones enveloppes, la théorie du risque zéro et la théorie de l'homéostasie du risque pour proposer des hypothèses opérationnelles concernant la manière dont les conducteurs évaluaient le risque, prennent la décision et effectuent le CDV dans cette situation.

Notre ambition, dans ce travail de thèse, ne se limitait pas à l'étude et la modélisation des processus cognitifs du conducteur lors de cette situation. Nous avons également fait le constat des enjeux industriels actuels de l'automatisation de cette manœuvre et de l'intérêt de nous inscrire dans une démarche de conception centrée sur l'humain, de développement puis d'évaluation d'un système d'automatisation du CDV *Human-like*. Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté les recherches actuelles

Conclusion

pour l'automatisation de la conduite, et nous avons également traité la problématique de l'acceptabilité et de l'acceptation de ces nouvelles technologies ainsi que des questions relatives à la conception d'un système de CDV automatisé *Human-like*. Nous avons ainsi pu proposer des spécifications pour la conception d'un tel automate en soulevant les questions qui restaient à résoudre concernant à la fois sa capacité à mimer l'humain, mais aussi les problématiques d'acceptation et d'évaluations subjectives du risque par les utilisateurs. Nous avons enfin, dans ce dernier chapitre théorique, présenté nos interrogations quant à l'éventualité d'effets induits par l'utilisation de ce type de technologie. Nous avons alors posé la question de la plage de gaps d'insertion dans laquelle cet effet était susceptible de se manifester et avons proposé des pistes pour sa résolution.

Sur cette base, nous avons pu affirmer plus précisément, dans le cinquième chapitre, notre problématique scientifique en développant les trois axes de notre questionnement :

- Les questions relatives à la modélisation de processus cognitifs impliqués dans l'évaluation subjective du risque, la prise de décision et l'exécution du CDV en conduite manuelle
- Les questions relatives à la conception et à l'évaluation de l'acceptation d'un système de CDV automatisé *Human-like*
- Les questions relatives à l'existence et à la mesure d'effets induits par l'expérience d'utilisation de cet automate, lors de situations de CDV en conduite manuelle post-automatisation.

Cette problématique nous a guidés pour la conception et la mise en place d'un protocole expérimental en trois volets et dont les particularités étaient (1) d'impliquer les mêmes participants pour chaque volet, (2) d'implémenter et de tester une fonction de CDV automatisé *Human-like* sur simulateur de conduite, et (3) de permettre une adaptation en direct du troisième volet du protocole à chaque participant, sur la base de l'analyse des décisions prises au cours du premier volet de conduite manuelle.

Ce protocole, exposé dans le sixième chapitre, visait, pour le volet de conduite manuelle, à amener les participants à prendre 36 décisions d'acceptation ou de refus de CDV par insertion dans un gap du trafic défini par deux véhicules blancs (i.e. GO et GC). Douze tailles de gap étaient testées et répétées 3 fois chacune, aléatoirement. Pour chacune des situations de conduite, il était demandé au participant de produire des évaluations subjectives du risque, de difficulté et de maîtrise de la manœuvre, ou encore d'acceptabilité à priori d'un éventuel système de CDV automatisé.

Pour le second volet d'utilisation de l'automate, nous avons d'abord implémenté les situations de conduite de sorte qu'elles soient identiques à celles du volet de conduite manuelle, mais que cette fois, ce soit l'automate qui prenne la décision et exécute le CDV en ajustant sa vitesse dans un premier temps, puis en procédant au déplacement latéral et à l'insertion au centre du gap en suivant une trajectoire calculée au moyen d'une courbe de Bézier. Pour chacune des 36 situations de CDV automatisé, le participant était invité à produire des jugements concernant le risque de la manœuvre, la maîtrise de la situation par l'automate et enfin son acceptation et sa confiance en celui-ci.

Le dernier volet expérimental implémentait un algorithme d'analyse des décisions individuelles de chaque participant dans le but d'approximer son seuil de décision personnel, puis de proposer des situations de CDV en conduite manuelle dont les caractéristiques les rapprochaient du seuil de décision établi au moyen de l'algorithme.

L'implémentation de ce protocole sur la plate-forme de simulation V-HCD a donné lieu au recueil de données auprès de 33 participants (29 exploités) volontaires, chaque passation ayant une durée approximative de 4h30. Les résultats issus de ce recueil sont exposés dans le septième chapitre de cette thèse. Parmi ces résultats, nous retenons ici que, pour la conduite manuelle, la théorie de l'homéostasie du risque semble plus appropriée que la théorie du risque zéro pour expliquer les décisions et les

stratégies des conducteurs humains (i.e. la prise de risque intentionnelle et contrôlée de la part des participants lors de leurs changements de voie). Nous avons également mis en évidence l'existence de différentes plages de tailles de gap d'insertion caractérisées par des taux de prises de décision de CDV et de risque subjectif différents. Enfin, nous avons mis au jour une stratégie relativement universelle d'insertion au niveau du premier tiers du gap, caractérisée par une maximisation de la sécurité avec le véhicule arrivant à l'arrière. L'intégration de cette stratégie a permis l'établissement d'une nouvelle matrice de conflit de zones enveloppes permettant de rendre compte des décisions et évaluations du risque par les participants.

Pour la conduite avec automatisation du CDV, nous avons montré que l'acceptation des décisions et manœuvres de CDV était supérieure à celle attendue. Cette meilleure acceptation était également associée à une bonne impression de maîtrise de la situation par l'automate, ainsi qu'à une évaluation à la baisse, du risque subjectif et de la difficulté de la manœuvre, par rapport aux situations identiques en conduite manuelle. Cet effet concernait autant les participants favorables au véhicule autonome que les participants réfractaires. Par ailleurs, nous avons également validé le caractère *Human-like* de la trajectoire de changement de voie adoptée par l'automate.

Nous avons enfin, au travers de l'analyse des résultats du troisième volet expérimental, montré que l'expérience de l'utilisation de l'automate de CDV entraînait la baisse du seuil de décision de CDV chez les participants. Cet effet se manifestait par une augmentation du nombre de décisions de CDV au niveau du seuil de décision, ainsi que par une diminution des évaluations de risque associé à ces situations de conduite. L'effet observé ne concernait que les gaps seuils de décision et n'affectait pas la stratégie d'exécution du CDV.

Ces résultats, pris dans leur ensemble, nous ont permis de mieux comprendre les processus de prise de décision, d'évaluation du risque et d'exécution d'une manœuvre de CDV, ainsi que l'acceptation de l'automate et les implications découlant de son utilisation. Plus généralement, ce travail de recherche en ingénierie cognitive a été pour nous l'occasion d'approfondir l'étude de la cognition et du comportement des conducteurs mais également des relations qu'entretiennent les utilisateurs et les technologies d'automatisation de la conduite. Nous avons pu constater l'intérêt d'intégrer la compréhension et la modélisation de l'utilisateur dans une démarche de conception en Ingénierie Cognitive en vue du développement des systèmes d'automatisation de l'activité. Plus encore, nous avons pu prendre la mesure des effets et implications de l'utilisation de ces nouvelles technologies. Nous avons soulevé de nouveaux questionnements, tant sur le plan de la modélisation cognitive fine du conducteur que sur celui de la conception d'assistances avancées à la conduite. Nous avons également pu approcher des problématiques plus éthiques que peuvent engendrer ces nouvelles technologies se traduisant par une augmentation de l'humain ([Claverie, 2010]).

Plus généralement, nous savons désormais qu'il est possible de concevoir des assistances et systèmes d'automatisation de l'activité respectant les procédures et performances humaines (i.e. *Human-like*) et permettant une amélioration de leur acceptation par les utilisateurs, ce qui autorise éventuellement ces nouvelles technologies à agir au-delà des limites de l'humainement faisable tout en restant acceptables. Nous savons également, que cette démarche peut être accompagnée d'effets sur les évaluations subjectives de risque de la part des utilisateurs. Ce point est important, car dans un certain nombre de cas, il est attendu de l'humain dont on automatise l'activité, qu'il se place en tant que superviseur de l'automate. Ce qui implique, entre autres, une évaluation des risques situationnels en vue d'une décision de reprise de contrôle ou de correction de l'action en cours. En outre, cette évaluation du risque est également susceptible d'intervenir dans l'appréciation que l'utilisateur / superviseur fera du

Conclusion

bon fonctionnement du système automatisé. Or, si les évaluations subjectives sont, comme nous avons pu le montrer dans notre travail, biaisées en faveur d'une sous-évaluation, nous pouvons penser qu'un retard à la détection d'anomalie risque d'être induit ; ou encore qu'un réajustement de la cible de risque est possible grâce aux bénéfices apportés par l'automate. De tels effets doivent être mesurés et pris en compte lors de la conception des systèmes d'automatisation. Les effets pernicioeux *d'inconscience du risque* peuvent possiblement être gérés au moyen d'interfaces homme-machine adaptées (ce dont notre travail ne faisait pas l'objet) en vue d'une coopération homme-machine efficace et harmonieuse.

Par ailleurs, nous avons pu mettre en évidence, le fait que l'automatisation de certaines parties de l'activité peut affecter des aspects similaires de cette activité lorsqu'elle est effectuée par l'humain. Ce nouvel élément pose des questions éthiques sur l'induction d'effets par l'utilisation d'automates. Si notre travail nous a permis de montrer l'intérêt de la conception d'automates en terme d'acceptation, il pose également la question des conséquences plus ou moins directes de leur utilisation. Jusqu'où pouvons nous aller dans le développement de systèmes d'automatisation fortement acceptables et performants, sans ouvrir le champ à l'apparition d'effets induits potentiellement néfastes aux utilisateurs comme à leur environnement ?

La démarche de conception centrée sur l'humain présente l'avantage d'offrir aux concepteurs des outils permettant non seulement, l'inclusion des connaissances actuelles à propos de l'utilisateur dès les premières étapes du développement, mais également des méthodes d'étude des modes d'utilisation par les usagers des systèmes ainsi développés et des conséquences de leur usage. Cette démarche présente donc l'intérêt particulier de proposer la prise en compte de considérations éthiques en lien avec le développement de nouvelles technologies.

En conséquence, nous devons, à notre niveau, poursuivre nos travaux dans le but d'approfondir notre compréhension de la cognition du conducteur, mais aussi d'apporter de nouveaux progrès dans la conception de technologies d'automatisation de la conduite. Dans la poursuite de cet objectif, nous devons prêter une attention particulière aux implications et effets à plus grande échelle, sur les plans humain, sécuritaire, sociétal et organisationnel (interaction avec le trafic environnant), de l'utilisation de ces nouveaux outils destinés, entre autres, à servir l'amélioration de l'autonomie de populations spécifiques (e.g. personnes âgées ou diminuées). Pour cela nous devons nous inscrire plus largement dans le cadre de la pyramide AUTOS de [Boy, 2011], en suivant l'exemple des travaux menés par [Paris, 2014] dans sa thèse portant sur la conception d'assistances à la conduite pour les seniors.

Notre époque, qui a vu l'expansion du recours à la méthode scientifique [Claverie, 2019] sur laquelle s'appuie le progrès technologique, ne peut passer outre la prise en compte de l'humain qui en est à la fois la source et le bénéficiaire espéré. Nous devons donc poursuivre son inclusion dans les processus de recherche et développement. L'ingénierie cognitive en est le moyen et la discipline. Nous poursuivrons donc nos efforts dans cette direction, en espérant, à notre mesure, contribuer au progrès scientifique et technologique.

Liste des tableaux

1	Comparaison entre les niveaux identifiés par Michon et Rasmussen (Bellet, 1998, p.107), (adaptée de Hale, Stoop et Hommels, 1990)	12
2	Tableau de bilan de la littérature sur la durée des changements de voie, adapté de [Gurupackiam and Lee Jones, 2012]	62
3	Tableau de prédictions potentielles concernant les décisions et évaluations du risque suivant la taille des gaps	78
4	Tableau des valeurs de TIV et des types de conflits de ZE avec les véhicules définissant le gap suivant la taille de l'espace	91
5	Tableau de prédictions potentielles concernant les décisions et évaluations du risque suivant la taille des gaps	103
6	Tableau des valeurs de TIV et des types de conflits de ZE avec les véhicules définissant le gap suivant la taille de l'espace	104
7	Répartition et taille des gaps présentés.	108
8	Tableau récapitulatif des données à recueillir	114
9	Tableau de détail des données oculométriques enregistrées	119
10	Détail des données de questionnaire post-situationnels	119
11	Exemple de données fictives pour l'algorithme à fenêtre glissante	131
12	Distribution de l'âge des participants	141
13	Distribution de l'expérience des participants en années d'expérience et en nombre de kilomètres par an	141
14	statistiques descriptives des réponses fournies pour les trois questions d'intérêt du questionnaire général d'acceptabilité a priori (cf. annexe B, p. 259)	142
15	Tableau de prédictions potentielles concernant les décisions et évaluations du risque suivant la taille des gaps	143
16	Détail des différents types de décisions	144
17	Répartition des gaps pris et refusés sans erreur	145
18	Répartition des gaps pris et refusés par erreur	146
19	Proportions de gaps acceptés par erreur sur l'ensemble des gaps acceptés	147
20	Proportions de gaps refusés par erreur sur l'ensemble des gaps refusés	148
21	Tableau de répartition des seuils estimés	150
22	Tableau de répartition des moyennes de criticité	152
23	Tableau de répartition des moyennes des écart-types de criticité	153
24	Tableau de répartition des moyennes de moyennes d'intentionnalité de risque pris	158
25	Répartition des participants dans les groupes, après catégorisation	188
26	Distribution des différences absolues entre la position du véhicule autonome et la médiane des positions des participants	194

Liste des tableaux

27	Tableau des proportions de décisions de CDV aux gaps seuils, supérieurs et inférieurs .	195
28	Tableau des proportions de décisions de CDV aux gaps seuils en pré-automatisation et en post-automatisation	196
29	Tableau des proportions de décisions de CDV au gap immédiatement supérieur au seuil avant et après l'utilisation de l'automate	197
30	Tableau des proportions de décisions de CDV aux gaps immédiatement inférieur au seuil en pré-automatisation et en post-automatisation	198
31	Tableau comparatif des distributions de criticité au gap seuil des situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation	199
32	Tableau comparatif des distributions de criticité au gap de 0.2s supérieur au seuil des situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation	199
33	Tableau comparatif des distributions de criticité au gap de 0.2s inférieur au seuil des situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation	200
34	Tableau comparatif des distributions de difficulté au gap seuil, des situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation	200
35	Tableau comparatif des distributions de difficulté au gap de 0.2s supérieur au seuil, des situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation	201
36	Tableau comparatif des distributions de difficulté au gap de 0.2s inférieur au seuil, des situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation	201
37	Tableau comparatif des distributions d'acceptabilité au gap seuil, des situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation	202
38	Tableau comparatif des distributions d'acceptabilité au gap de 0.2s supérieur seuil, des situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation	202
39	Tableau comparatif des distributions d'acceptabilité au gap de 0.2s inférieur seuil, des situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation	203
40	Tableau comparatif des distributions de TIV entre Ego et GO au gap seuil de décision pour les situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation	204
41	Tableau comparatif des distributions de TIV entre GC et Ego, au gap seuil de décision pour les situations de conduite pré-automatisation et post-automatisation	204
42	Matrice de conflits de Zones Enveloppes ré-instanciée suivant la stratégie réelle d'insertion dans le gap et les données de la phase de conduite manuelle	215
43	détail des données RT Maps enregistrées	257
44	Questionnaire d'acceptabilité générale a priori	259
45	Comparaison des groupes d'acceptabilité générale a priori	261

Liste des figures

1	Cycle perception - cognition - action issu de [Bornard, 2012] (adapté de [Bellet et al., 2010b])	13
2	architecture cognitive élémentaire de COSMODRIVE	17
3	Niveaux de conscience, boucles de contrôle et boucles d'apprentissage dans le modèle COSMODRIVE	20
4	Schéma de conduite de Tourne-à-gauche, [Bellet et al., 2003]	23
5	Zones Enveloppes dans le modèle COSMODRIVE [Bellet, 1998] (p.153) [Kontaratos, 1974], [Otha, 1993] (adapté par [Bornard, 2012], p.51)	25
6	Illustration d'un conflit de zones enveloppes entre deux véhicules à une intersection . .	26
7	Modèle conceptuel du jugement de Hogarth (1980) (issu de [Cadet and Kouabéna, 2005])	31
8	Modèle du risque zéro [Näätänen and Summala, 1974]	35
9	Modèle d'homéostasie du risque [Wilde, 1982]	36
10	Exemple d'oscillations homéostatiques [Wilde, 2014]	37
11	Courbe d'estimation de l'utilité [Wilde, 2014]	39
12	Modèle d'évitement de la menace [Fuller, 1984]	42
13	Modèle hiérarchique du risque [Van Der Molen and Böttcher, 1988]	44
14	Modèle d'interface Tâche - Capacité [Fuller, 2000]	47
15	Mécanisme d'homéostasie de la difficulté de la tâche [Fuller, 2005]	48
16	Modèle d'allostasie du risque [Fuller, 2011]	48
17	Modèle du moniteur de risque [Vaa, 2007]	50
18	Modèle cadre pour l'analyse de la conscience du risque [Banet, 2010]	51
19	Exemple de matrice de conflit de Zones Enveloppes en situation de tourne à gauche [Bornard, 2012] (p.178)	53
20	Illustration d'une situation de tourne à gauche avec conflit de ZE	54
21	Conflits de Zones Enveloppes en situation de Tourne-à-gauche issu de [Bornard, 2012] (p.178)	55
22	Conflits de Zones Enveloppes et pourcentages de décisions de franchissement issu de [Bornard, 2012] (p.179)	56
23	Criticité moyenne du tourne-à-gauche suivant la taille des gaps dans le trafic issu de [Bornard, 2012] (p.181)	56
24	Schéma tactique simplifié du dépassement sur autoroute, [Mathern, 2012]	60
25	Schéma synthétique de différentes méthodes de segmentation de CDV à partir de [Peng et al., 2015], [van Winsum et al., 1999], [Salvucci et al., 2001], [Salvucci and Liu, 2002], [Kanaris et al., 2001]	65
26	Représentations des traces d'un changement de voie dans le logiciel ABSTRACT . . .	71
27	Représentation du schéma cognitif de changement de voie libre établi par [Georgeon, 2008]	72
28	Graphe « <i>État-Transition</i> » du changement de voie à l'état initial (issu de [Mathern, 2012], p. 81)	73
29	Légende et code couleur pour les Zones Enveloppes et temps inter-véhiculaire	77

Liste des figures

30	Exemple d'un cas de changement de voie pour un gap de taille supérieure à 2.6 s . . .	77
31	Exemple d'un cas de changement de voie pour un gap de taille inférieure à 1.4 s . . .	78
32	Stratégie de maximisation de la sécurité arrière	79
33	Stratégie de maximisation de la sécurité avant	79
34	Stratégie de « compromis cognitif »(équilibrage des risques)	80
35	Classification des niveaux d'automatisation de la conduite selon la SAE	85
36	Version simplifiée de la classification de la SAE (adaptée par la NHTSA)	85
37	Illustration des situations de changement de voie dans le projet HOLIDES ([Bellet et al., 2016])	93
38	Vue générale de la cabine SIMAX - 308	116
39	Illustration de la situation de CDV	121
40	CDV automatisé : État initial	125
41	CDV automatisé : État pré-insertion	125
42	Distribution des pourcentages des prise de gaps et des erreurs	144
43	Modèle d'association entre le pourcentage de décision de changement de voie et la taille du gap	149
44	Distribution de la taille des plages de changement de décision	150
45	Diagramme de fréquence d'occurrence des gaps seuils	150
46	Moyenne de criticité par gap en conduite manuelle	152
47	Moyenne des écarts types de criticité par gap en conduite manuelle	153
48	Distribution des moyennes de criticité par taille de gap	154
49	Modèle d'association entre la criticité et la taille du gap	155
50	Diagramme de comparaison des distributions de criticité entre le gap seuil et les gaps supérieurs et inférieurs	156
51	Diagramme de distribution des moyennes de risques pris suivant la taille des gaps pour les gaps acceptés uniquement	157
52	Distribution des moyennes de difficulté suivant la taille des gaps	159
53	Modèle d'association entre la difficulté et la taille du gap	160
54	Modèle d'association entre la difficulté et criticité	160
55	Diagramme de comparaison des distributions de difficulté entre le gap seuil et le gap supérieur et inférieur	161
56	Distribution des moyennes d'acceptabilité suivant la taille des gaps	162
57	Modèle d'association entre l'acceptation et la taille du gap	163
58	Modèle d'association entre la criticité et l'acceptabilité d'un potentiel système de CDV automatique	163
59	Diagramme de comparaison des distributions d'acceptabilité entre le gap seuil et le gap supérieur et inférieur	164
60	Distribution TIV entre Ego et GO au moment du CDV suivant la taille des gaps . . .	165
61	Distribution des TIV entre GC et Ego au moment du CDV suivant la taille des gaps .	166
62	modèle d'association entre la taille du gap et le TIV entre Ego et GO	167
63	modèle d'association entre la taille du gap et le TIV entre GC et Ego	167

64	Distribution des positions d'insertion dans le gap (en pourcentage de la taille du gap) par rapport à GO	167
65	Distribution des positions d'insertion dans le gap (en pourcentage de la taille du gap) par rapport à GC	167
66	Stratégie d'insertion dans un gap utilisée par les participants	169
67	Distribution des moyennes de criticité en mode automate activé, suivant la taille des gaps	170
68	Modèle d'association entre la criticité et la taille du gap en conduite avec automatisation du CDV	171
69	Distribution comparative des moyennes de criticité suivant la taille des gaps en mode automatisé et en mode manuel	172
70	Modèles d'association entre la criticité et la taille du gap suivant le mode de conduite	173
71	Distribution comparative des moyennes de difficulté suivant la taille des gaps, en mode de CDV automatisé	173
72	Modèles d'association entre la difficulté et la taille du gap suivant le mode de conduite	174
73	Distribution comparative des moyennes de difficulté suivant la taille des gaps et le mode de conduite	174
74	Modèles d'association entre la difficulté et la taille du gap suivant le mode de conduite	175
75	Modèle d'association entre la criticité et la difficulté en conduite automatisée	176
76	Modèle d'association entre la criticité et la difficulté suivant le mode de conduite . . .	177
77	Distribution comparative des moyennes d'acceptation suivant la taille des gaps en conduite avec CDV automatisé	177
78	Modèle d'association entre l'acceptation et la taille du gap en conduite automatisée . .	178
79	Distribution comparative des moyennes d'acceptation suivant la taille des gaps et le mode de conduite	179
80	Modèle d'association entre l'acceptation et la taille du gap en conduite automatisée . .	179
81	Modèle d'association entre l'acceptation et la criticité en conduite avec automate . . .	180
82	Modèle d'association entre l'acceptation et la criticité en suivant le mode de conduite .	181
83	Distribution des moyennes de maîtrise de la situation de conduite suivant la taille des gaps en conduite avec système d'automatisation du CDV	182
84	Modèle d'association entre la maîtrise de la situation et taille des gaps en conduite automatisée	182
85	Modèle d'association entre la maîtrise de la situation et la criticité en conduite automatisée	183
86	Modèle d'association entre la maîtrise de la situation et l'acceptation en conduite automatisée	184
87	Distribution des moyennes de confiance en l'assistance suivant la taille des gaps (en conduite automatisée)	185
88	Modèle d'association entre la confiance dans l'assistance et la taille du gap en conduite automatisée	185
89	Modèle d'association entre la confiance dans l'assistance et l'acceptation du système de CDV automatisé	186
90	Trajectoires (positions x, y) du véhicule en conduite manuelle et du véhicule en conduite autonome	192
91	Diagramme en boîtes à moustaches de comparaison de la distribution des positions lors des CDV en mode manuel et en mode d'automatisation du CDV	193

Liste des figures

92	Exemple de conflit pour un petit gap (zone de refus de CDV)	217
93	Exemple de conflit pour un gap moyen (zone de changement de décision)	218
94	Exemple de conflit pour un gap de grande taille (zone d'acceptation)	218
95	Distribution des criticités suivant la taille des gaps et les décisions prises	263

Bibliographie

- [cod, 2011] (2011). Code de la route article r412 - 12. (Cité en page 76.)
- [Adams, 1970] Adams, J. (1970). Personality variables associated with traffic accidents. *Behavioral Research in Highway Safety*, 1(1) :3 – 18. (Cité en page 33.)
- [Alexandre et al., 2018] Alexandre, B., Reynaud, E., Osiurak, F., and Navarro, J. (2018). Acceptance and acceptability criteria : a literature review. *Cognition, Technology & Work*, 20(2) :165–177. (Cité en page 88.)
- [Allen et al., 1971] Allen, T., Lumenfeld, H., and Alexander, G. (1971). Driver information needs. *Highway Research Board*, pages 102–115. (Cité en page 9.)
- [Amalberti, 1996] Amalberti, R. (1996). *La conduite des systèmes à risques*. PUF Paris. (Cité en pages 31, 80 et 91.)
- [Aschenbrenner et al., 1987] Aschenbrenner, K., Biehl, B., and Wurm, G. (1987). Einfluss der risikokompensation auf die wirkung von verkehrssicherheitsmassnahmen am beispiel abs. Technical report, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). (Cité en page 40.)
- [Baddeley, 1990] Baddeley, A., editor (1990). *Human memory : Theory and practice*. Hove : Lawrence Erlbaum Associates. (Cité en page 17.)
- [Baddeley, 1992] Baddeley, A. (1992). Working memory. *Nature*, (255) :556–559. (Cité en page 15.)
- [Bainbridge, 1983] Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19(6) :775–779. (Cité en page 86.)
- [Bakdash and Marusich, 2017] Bakdash, Jonathan, Z. and Marusich, Laura, R. (2017). Repeated measures correlation. *Frontiers in Psychology*, 8 :1–13. (Cité en page 140.)
- [Banet, 2010] Banet, P. A. (2010). *Conscience du risque et attitudes face aux risques chez les motocyclistes*. PhD thesis. (Cité en pages 8, 27, 28, 51, 52, 112, 220 et 239.)
- [Banks et al., 2014] Banks, V. A., Stanton, N. A., and Harvey, C. (2014). Sub-systems on the road to vehicle automation : Hands and feet free but not ‘mind’ free driving. *Safety Science*, 62 :505–514. (Cité en page 87.)
- [Bartlett, 1932] Bartlett, F. (1932). *Remembering : A Study in Experimental and Social Psychology*. Cambridge University Press, London. (Cité en page 21.)
- [Bellet, 1998] Bellet, T. (1998). *Modélisation et simulation cognitive de l’opérateur Humain : une application à la conduite automobile*. PhD thesis, Université de Paris V. (Cité en pages 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 21, 25 et 239.)
- [Bellet et al., 2007] Bellet, T., Bailly, B., Mayenobe, P., and Georgeon, o. (2007). *Cognitive modelling and computational simulation of drivers mental activities*, pages 315–343. Springer Verlag, London. (Cité en pages 24 et 25.)
- [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(9) :1205–1221. (Cité en pages 17, 20, 24 et 53.)

Bibliographie

- [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 & Prevention*, 49 :154–164. (Cité en pages 50, 52 et 233.)
- [Bellet et al., 2016] Bellet, T., Bornard, J., and Richard, B. (2016). Modelling techniques and tools (d 2.7) section 3.5, deliverable of holistic human factors and system design of adaptive cooperative human-machine systems. Technical report. (Cité en pages 73, 92, 93, 124, 127 et 240.)
- [Bellet et al., 2010a] Bellet, T., Boverie, S., Boy, G., and Hoc, J. (2010a). *Interaction Homme-machine dans les transports. personnalisation, assistance et informations du voyageur*, chapter De l'interaction à la coopération Homme-machine, pages 151–177. Hermes Sciences, Lavoisier, Paris. (Cité en pages 87 et 89.)
- [Bellet et al., 2019] Bellet, T., Deniel, J., Bornard, J., and Richard, B. (2019). Driver modeling and simulation to support the virtual human centered design of future driving aids. In *Proceedings of the INCOSE International Conference on Human-Systems Integration (HSI2019)*. (Cité en pages 74, 87, 92, 116, 124 et 127.)
- [Bellet et al., 2010b] Bellet, T., Mayenobe, P., Bornard, J., Gruyer, D., and Mathern, B. (2010b). COSMO-SIVIC : a first step towards a virtual platform for Human Centred Design of driving assistances. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(13) :210–215. (Cité en pages 13 et 239.)
- [Bellet et al., 2018] Bellet, T., Paris, J.-C., and Marin-Lamellet, C. (2018). Difficulties experienced by older drivers during their regular driving and their expectations towards advanced driving aid systems and vehicle automation. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 52 :138 – 163. (Cité en pages 88 et 112.)
- [Bellet et al., 2003] Bellet, T., Tattegrain-Veste, H., Chapon, A., Bruyas, M., Pachiaudi, G., Deuleurance, P., and Guilhon, V. (2003). *L'ingénierie cognitive : IHM et cognition*, chapter Ingénierie cognitive dans le contexte de l'assistance à la conduite automobile, pages 383–414. In [Boy, 2003]. (Cité en pages i, ii, 22, 23, 87, 89, 233 et 239.)
- [Bernard, 1859] Bernard, C. (1859). *Leçons sur les propriétés physiologiques et les altérations pathologiques des liquides de l'organisme*. Paris : J.-B. Baillière, 1859. (Cité en page 37.)
- [Bifulco et al., 2008] Bifulco, G. N., Simonelli, F., and Di Pace, R. (2008). Experiments toward an human-like adaptive cruise control. In *2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 919–924. (Cité en page 89.)
- [Bisseret, 1970] Bisseret, A. (1970). Mémoire opérationnelle et structure du travail. *Bulletin de psychologie*, (24) :5–6. (Cité en page 17.)
- [Bolker et al., 2008] Bolker, B. M., Brooks, M. E., Clark, C. J., Geange, S. W., Poulsen, J., Stevens, M. H., and White, J. S. S. (2008). Generalized linear mixed models : a practical guide for ecology and evolution. *Trends in Ecology and Evolution*, 24(3) :127–135. (Cité en page 140.)
- [Bornard, 2012] Bornard, J. C. (2012). *Développement d'un modèle du conducteur automobile : De la modélisation cognitive à la simulation numérique*. PhD thesis, Université de Bordeaux I. (Cité en pages 9, 10, 13, 14, 15, 18, 19, 21, 22, 24, 25, 53, 54, 55, 56, 74, 76, 112, 117, 212, 216, 230, 233 et 239.)

- [Bornard et al., 2016] Bornard, J.-C., Sassman, M., and Bellet, T. (2016). Use of a computational simulation model of drivers' cognition to predict decision making and behaviour while driving. *Biologically Inspired Cognitive Architectures*, 15 :41–50. (Cité en page 25.)
- [Boy, 2003] Boy, G., editor (2003). Hermes Sciences, Paris. (Cité en pages 87 et 244.)
- [Boy, 2011] Boy, G., editor (2011). CRC Press. (Cité en pages 87 et 236.)
- [Brysbaert and Stevens, 2018] Brysbaert, M. and Stevens, M. (2018). Power analysis and effect size in mixed effects models : A tutorial. *Journal of Cognition*, 9(1) :1 – 20. (Cité en page 140.)
- [Cadet and Kouabénan, 2005] Cadet, B. and Kouabénan, D. R. (2005). Évaluer et modéliser les risques : apports et limites de différents paradigmes dans le diagnostic de sécurité. *Le travail humain*, 68(1) :7 – 35. (Cité en pages 30, 31 et 239.)
- [Cannon, 1929] Cannon, W. B. (1929). Organization for physiological homeostasis. *Physiological Reviews*, 9(3) :399–431. (Cité en page 37.)
- [Chang and Lane, 2016] Chang, Yu-Husan, A. and Lane, David, M. (2016). Generalizing across stimuli as well as subjects : A non mathematical tutorial on mixed-effects models. *The Quantitative Methods for Psychology*, 12(3) :201–2019. (Cité en page 140.)
- [Chimi and Russell, 2009] Chimi, C. J. and Russell, D. L. (2009). The Likert Scale : A Proposal for Improvement Using Quasi-Continuous Variables. In *Proceedings of the Information Systems Educator's Conference (ISECON)*, page 10. (Cité en page 112.)
- [Claverie, 2005] Claverie, B. (2005). *Cognitique*. L'Harmattan. (Cité en page 231.)
- [Claverie, 2010] Claverie, B. (2010). *L'homme augmenté*. L'Harmattan. (Cité en pages 232 et 235.)
- [Claverie, 2019] Claverie, B. (2019). *Introduction à l'épistémologie et à la méthode de recherche*. L'Harmattan. (Cité en page 236.)
- [Cownie and Calderwood, 1966] Cownie, A. R. and Calderwood, J. H. (1966). Feedback in accident control. *Journal of the Operational Research Society*, 17(3) :253–262. (Cité en page 33.)
- [Damasio, 1994] Damasio, A. (1994). *L'erreur de Descartes*. Odile Jacob. (Cité en pages 32, 48 et 49.)
- [Davis, 1989] Davis, F. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, 13(3) :319–340. (Cité en page 88.)
- [Deniel et al., 2019] Deniel, J., Bornard, J., Claverie, B., and Bellet, T. (2019). Innovative methodological framework for virtual human centered design : An application to automated driving effects on driver's decisions-making. In *Proceedings of the INCOSE International Conference on Human-Systems Integration (HSI2019)*. (Cité en pages 116, 129 et 130.)
- [Distler et al., 2018] Distler, V., Lallemand, C., and Bellet, T. (2018). Acceptability and acceptance of autonomous mobility on demand : The impact of an immersive experience. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing System*, 612, pages 1–10. ACM. (Cité en pages 88, 89, 112, 113, 142 et 187.)
- [Endsley, 1995] Endsley, M. R. (1995). Measurement of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1) :65–84. (Cité en pages 20 et 50.)
- [Etienne et al., 2009] Etienne, L., Devogele, T., and Bouju, A. (2009). Analyse de similarité de trajectoires d'objets mobiles suivant le même itinéraire : Application aux trajectoires de navires. *Revue*

Bibliographie

- des Sciences et Technologies de l'Information - Série ISI : Ingénierie des Systèmes d'Information*, 14(5/2009) :pp.85–106. (Cité en page 225.)
- [Finnegan and Green, 1990] Finnegan, P. and Green, P. (1990). The time to change lanes : a literature review. Technical report, The University of Michigan Transportation Research Institute. (Cité en pages 62, 66 et 111.)
- [Fuller, 1984] Fuller, R. (1984). A conceptualization of driving behaviour as threat avoidance. *Ergonomics*, 27(11) :1139–1155. (Cité en pages 42 et 239.)
- [Fuller, 2000] Fuller, R. (2000). The task-capability interface model of the driving process. *Recherche - Transport - Sécurité*, 66 :47–57. (Cité en pages 46, 47, 220 et 239.)
- [Fuller, 2005] Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behaviour. *Accident Analysis & Prevention*, 37(3) :461–472. (Cité en pages 47, 48 et 239.)
- [Fuller, 2011] Fuller, R. (2011). Driver Control Theory. In *Handbook of Traffic Psychology*, pages 13–26. Elsevier. (Cité en pages 48 et 239.)
- [Fuller et al., 2008] Fuller, R., McHugh, C., and Pender, S. (2008). Task difficulty and risk in the determination of driver behaviour. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée/European Review of Applied Psychology*, 58(1) :13–21. (Cité en pages 47 et 212.)
- [Geoffrey Louie et al., 2014] Geoffrey Louie, W., McColl, D., and Nejat, G. (2014). Acceptance and attitudes toward a human-like socially assistive robot by older adults. *Assistive Technology*, 26(3) :140–150. PMID : 26131794. (Cité en page 89.)
- [Georgeon, 2008] Georgeon, O. (2008). *Analyse de traces d'activité pour la modélisation cognitive : application à la conduite automobile*. PhD thesis, Université de Lyon II. (Cité en pages 69, 70, 71, 72, 74, 75, 112, 124 et 239.)
- [Gibson and Crooks, 1938] Gibson, J. and Crooks, L. (1938). A theoretical field-analysis of automobile-driving. *The American Journal of Psychology*, (51) :453–471. (Cité en page 24.)
- [Gouy et al., 2014] Gouy, M., Wiedemann, K., Stevens, A., Brunett, G., and Reed, N. (2014). Driving next to automated vehicle platoons : How do short time headways influence non-platoon drivers' longitudinal control? *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 27 :264 – 273. Vehicle Automation and Driver Behaviour. (Cité en pages 95 et 229.)
- [Grayson et al., 2003] Grayson, G. B., Maycock, G., Groeger, J. A., Hammond, S. M., and Field, D. T. (2003). Risk, hazard perception and perceived control. Technical report. (Cité en page 50.)
- [Green and MacLeod, 2016] Green, P. and MacLeod, C. J. (2016). Simr : an r package for power analysis of generalizedlinear mixed models by simulation. *Methods in Ecology and Evolution*, 7. (Cité en page 140.)
- [Gurupackiam and Lee Jones, 2012] Gurupackiam, S. and Lee Jones, S. (2012). Empirical Study of Accepted Gap and Lane Change Duration within Arterial Traffic Under Recurrent and Non-Recurrent Congestion. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 2(4) :306–322. (Cité en pages 59, 62, 67, 70, 75 et 237.)
- [Hall, 1992] Hall, E. (1992). *The Hidden Dimension*. Peter Smith Pub. Inc. (Cité en pages 24 et 25.)
- [Harrison et al., 2018] Harrison, X. A., Donaldson, L., Correa-Cano, M. E., Evans, J., Fisher, D. N., Goodwin, C. E. D., Robinson, B. S., Hodgson, D. J., and Inger, R. (2018). A brief introduction to mixed effects modelling and multi-model inference in ecology. *PeerJ*. (Cité en page 140.)

- [Henning et al., 2007] Henning, M. J., Georgeon, O., and Krems, J. F. (2007). The Quality of Behavioral and Environmental Indicators Used to Infer the Intention to Change Lanes. In *Proceedings of the 4th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle*, pages 231–237, Stevenson, Washington, USA. University of Iowa. (Cité en pages 66, 67, 68 et 71.)
- [Hermand and Chauvin, 2008] Hermand, D. and Chauvin, B. (2008). Contribution du paradigme psychométrique à l'étude de la perception des risques : une revue de littérature de 1978 à 2005. *L'année psychologique*, 108(2) :343–386. (Cité en page 28.)
- [Hogarth, 1980] Hogarth, R. (1980). *Judgment and Choice*. New York : Wiley. (Cité en page 30.)
- [Jula et al., 2000] Jula, H., Kosmatopoulos, E., and Ioannou, P. (2000). Collision avoidance analysis for lane changing and merging. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 49(6) :2295–2308. (Cité en pages 60, 66, 68 et 69.)
- [Jurgensohn, 2007] Jurgensohn, T. (2007). *Modelling driver behaviour in Automotive Environments*, chapter Control Theory Models of the Driver, pages 277–292. (Cité en page 10.)
- [Kahneman, 2011] Kahneman, D. (2011). *Système 1 système 2 : les deux vitesses de la pensée*. Flammarion. (Cité en pages 29 et 30.)
- [Kanaris et al., 2001] Kanaris, A., Kosmatopoulos, E., and Ioannou, P. (2001). Strategies and spacing requirements for lane changing and merging in automated highway systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 50(6) :1568–1581. (Cité en pages 63, 65, 66, 67, 68, 69 et 239.)
- [Kim et al., 2017] Kim, Y., Thayne, J., and Wei, Q. (2017). An embodied agent helps anxious students in mathematics learning. *Educational Technology Research and Development*, 65(1) :219–235. (Cité en page 89.)
- [Koerner and Zhang, 2017] Koerner, Tess, K. and Zhang, Y. (2017). Application of linear mixed-effects models in human neuroscience research : A comparison with pearson correlation in two auditory electrophysiology studies. *Brain Sciences*, 7(3)(26) :1–11. (Cité en page 140.)
- [Kontaratos, 1974] Kontaratos, A. N. (1974). A systems analysis of the problem of road casualties in the united states. *Accident Analysis and Prevention*, 6(3) :223 – 241. (Cité en pages 24, 25 et 239.)
- [Laflaquière and Prié, 2003] Laflaquière, J. and Prié, Y. (2003). Modélisation d'utilisation de système pour une assistance à base de trace : une application de Musette à la tâche de veille documentaire. In *Workshop Traces, Interactions, co-constructions collectives et relations à la cognition. CoMETE AS du RTP38*, Paris, France. (Cité en page 71.)
- [Lewis-Evans and Rothengatter, 2009] Lewis-Evans, B. and Rothengatter, T. (2009). Task difficulty, risk, effort and comfort in a simulated driving task—Implications for Risk Allostasis Theory. *Accident Analysis & Prevention*, 41(5) :1053–1063. (Cité en page 48.)
- [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 Transactions on Computer-Human Interaction*, 13(1) :37–70. (Cité en page 14.)
- [Macgill and Siu, 2005] Macgill, S. and Siu, Y. (2005). A new paradigm for risk analysis. *Futures*, 37(10) :1105–1131. (Cité en page 28.)
- [Mathern, 2012] Mathern, B. (2012). *Decouverte interactive de connaissances a partir de traces d'activite : Synthese d'automates pour l'analyse et la modelisation de l'activite de conduite automobile*. PhD thesis, Université de Lyon I. (Cité en pages 15, 21, 59, 60, 70, 73, 74, 124 et 239.)

Bibliographie

- [Mc Knight and Adams, 1970] Mc Knight, A. and Adams, B. (1970). Driver education task analysis. volume i : Task descriptions. final report. Technical report, Human Ressources Research Organization International, Alexandria. (Cité en page 9.)
- [McKenna, 1982] McKenna, F. P. (1982). The human factor in driving accidents An overview of approaches and problems. *Ergonomics*, 25(10) :867–877. (Cité en page 33.)
- [Michon, 1985] Michon, J. (1985). *Human behavior and traffic safety*, chapter A critical view of driver of driver behavior models : what do we know, what should we do?, pages 485–520. New York Plenum Press, New York. (Cité en pages 14 et 44.)
- [Minsky, 1975] Minsky, M. (1975). *The Psychology of Computer Vision*, chapter A Framework for Representing Knowledge, pages 211–277. Mc Graw-Hill, New - York. (Cité en page 21.)
- [Morris et al., 2011] Morris, B., Doshi, A., and Trivedi, M. (2011). Lane change intent prediction for driver assistance : On-road design and evaluation. In *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pages 895–901, Baden-Baden, Germany. IEEE. (Cité en pages 67 et 68.)
- [Neisser, 1976] Neisser, U. (1976). *Cognition and Reality : principles and implications of cognitive psychology*. W.H. Freeman, San Francisco. (Cité en pages 18 et 19.)
- [Nilsson et al., 2015] Nilsson, J., Brannstrom, M., Coelingh, E., and Fredriksson, J. (2015). Longitudinal and lateral control for automated lane change maneuvers. In *2015 American Control Conference (ACC)*, pages 1399–1404, Chicago, IL, USA. IEEE. (Cité en page 123.)
- [Nilsson et al., 2016] Nilsson, J., Silvin, J., Brannstrom, M., Coelingh, E., and Fredriksson, J. (2016). If, when, and how to perform lane change maneuvers on highways. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 8(4) :68–78. (Cité en pages 59, 64, 75 et 123.)
- [Norman, 1990] Norman, D. (1990). The "problem" of automation : inappropriate feedback and interaction, not "overautomation". *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 327(1241) :585 – 593. (Cité en page 87.)
- [Näätänen and Summala, 1974] Näätänen, R. and Summala, H. (1974). Model for the role of motivational factors in drivers' decision-making. *Accident Analysis & Prevention*, 6 :243 – 261. (Cité en pages 33, 34, 35, 78, 92, 102, 210, 219, 230, 233, 239 et 255.)
- [Näätänen and Summala, 1976] Näätänen, R. and Summala, H. (1976). *Road-User Behaviour and Traffic Accidents*. North-Holland Publishing Company. (Cité en pages 34, 39, 42 et 210.)
- [Ochanine, 1977] Ochanine, D. (1977). *Concept of operative image in engineering and general psychology*. Engineering Psychology. Science Publisher, Moscow. (Cité en page 19.)
- [ONISR, 2019] ONISR (2019). Accidentalité routière 2018 – résultats définitifs. Technical report, Observatoire national Interministériel de la sécurité routière. (Cité en page 8.)
- [Osswald et al., 2012] Osswald, S., Wurhofer, D., Trösterer, S., Beck, E., and Tscheligi, M. (2012). Predicting information technology usage in the car : Towards a car technology acceptance model. In *Proceedings of the 4th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, AutomotiveUI '12, pages 51–58, New York, NY, USA. ACM. (Cité en page 88.)
- [Otha, 1993] Otha, H. (1993). *Vision in vehicles 4*, chapter Individual differences in driving distance headway, pages 91–100. North-Holland. (Cité en pages 24, 25, 77 et 239.)

- [Paris, 2014] Paris, J. C. (2014). *Ingénierie Cognitive pour l'aide à la conduite automobile de la personne âgée : analyse et modélisation de l'activité de conduite en situation naturelle pour la conception de fonctions de monitoring*. PhD thesis, Université de Bordeaux I. (Cité en pages 9, 11, 67, 71, 83, 87 et 236.)
- [Payre, 2015] Payre, W. (2015). *Conduite complètement automatisée : acceptabilité, confiance et apprentissage de la reprise de contrôle manuel*. PhD thesis, Université de Paris VIII. (Cité en page 88.)
- [Peng et al., 2015] Peng, J., Guo, Y., Fu, R., Yuan, W., and Wang, C. (2015). Multi-parameter prediction of drivers' lane-changing behaviour with neural network model. *Applied Ergonomics*, 50 :207–217. (Cité en pages 64, 65, 66, 67, 69 et 239.)
- [Peng et al., 2013] Peng, J. S., Guo, Y. S., and Shao, Y. M. (2013). Lane Change Decision Analysis Based on Drivers' Perception-Judgment and Game Theory. *Applied Mechanics and Materials*, 361-363 :1875–1879. (Cité en pages 60, 64, 66 et 69.)
- [Piaget and Inhelder, 1975] Piaget, J. and Inhelder, B. (1975). *La psychologie de l'enfant*. Presses Universitaires de France, Paris. (Cité en page 21.)
- [Planek, 1971] Planek, T. (1971). Driver education research in the united-states—can the new directions be supported? In *Proceedings of the international symposium on psychological aspects of driver behaviour*. (Cité en page 33.)
- [Rasmussen, 1983] Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE transactions on Systems, Man and Cybernetics*, (3) :257–266. (Cité en page 11.)
- [Raufaste and Hilton, 2001] Raufaste, E. and Hilton, D. J. (2001). Les mécanismes de la décision face au risque. *Alliage*, (48 – 49). (Cité en page 30.)
- [Reason, 1990] Reason, J. (1990). *Human Error*. Cambridge University Press, Cambridge - UK. (Cité en page 46.)
- [Richard, 1990] Richard, J., editor (1990). *Les activités mentales : comprendre raisonner, trouver des solutions*. Armand Colin. (Cité en page 16.)
- [Ring et al., 2018] Ring, P., Hammouda, M., Wang, L., Mai, M., and Prokop, G. (2018). Modelling anticipative and predictive driver behavior in the context of prospective safety assessment. In *Presentation at 11th Graz Symposium Virtual Vehicle(GSVF)*, volume 1. An optional note. (Cité en page 89.)
- [Salvucci et al., 2001] Salvucci, D. D., Boer, E. R., and Liu, A. (2001). Toward an Integrated Model of Driver Behavior in Cognitive Architecture. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1779(1) :9–16. (Cité en pages 14, 63, 65, 67, 68, 111 et 239.)
- [Salvucci and Liu, 2002] Salvucci, D. D. and Liu, A. (2002). The time course of a lane change : Driver control and eye-movement behavior. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 5(2) :123–132. (Cité en pages 62, 63, 65, 66, 67 et 239.)
- [Salvucci et al., 2007] Salvucci, D. D., Mandalia, H. M., Kuge, N., and Yamamura, T. (2007). Lane-Change Detection Using a Computational Driver Model. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 49(3) :532–542. (Cité en pages 68 et 69.)
- [Sassman et al., 2018] Sassman, M., Deniel, J., Bellet, T., and Claverie, B. (2018). Effects of vehicle automation in normal and critical driving situations : from empirical studies on a driving simulator to cognitive modelling. *Cognitive Engineering*, 2(Issue 1). (Cité en pages 86, 87 et 95.)

Bibliographie

- [Schade and Schlag, 2003] Schade, J. and Schlag, B. (2003). Acceptability of urban transport pricing strategies. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 6(1) :45–61. (Cité en page 88.)
- [Schank and Abelson, 1977] Schank, R. and Abelson, R. (1977). *Scripts, plans, goals, and understanding : an inquiry into human knowledge structures*. L. Erlbaum Associates. (Cité en page 21.)
- [Schilder, 1950] Schilder, P. (1950). *The Image and Appearance of the Human Body*. International Universities Press, New - York. (Cité en page 24.)
- [Schmidt et al., 2014] Schmidt, K., Beggiato, M., Hoffmann, K. H., and Krems, J. F. (2014). A mathematical model for predicting lane changes using the steering wheel angle. *Journal of Safety Research*, 49 :85.e1–90. (Cité en pages 60, 66 et 67.)
- [Schneider and Shiffrin, 1977] Schneider, W. and Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic human information processing : I. detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84(1) :1–66. (Cité en page 21.)
- [Sheridan and Verplank, 1978] Sheridan, T. and Verplank, W. (1978). Human and computer control of undersea teleoperators. Technical report, DTIC. (Cité en page 84.)
- [Simonelli et al., 2009] Simonelli, F., Bifulco, G. N. and De Martinis, V., and Punzo, V. (2009). Human-like adaptive cruise control systems through a learning machine approach. In Avineri, E., Köppen, M., Dahal, K., Sunitiyoso, Y., and Roy, R., editors, *Applications of Soft Computing*, pages 240–249, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg. (Cité en page 89.)
- [Skottke et al., 2014] Skottke, E.-M., Debus, G., Wang, L., and Huestegge, L. (2014). Carryover effects of highly automated convoy driving on subsequent manual driving performance. *Human Factors*, 56(7) :1272–1283. PMID : 25490807. (Cité en pages 95 et 96.)
- [Slovic, 1987] Slovic, P. (1987). Perception of risk. *Science*, 236(4799) :280–285. (Cité en page 30.)
- [Slovic et al., 2004] Slovic, P., Finucane, M. L., Peters, E., and MacGregor, D. G. (2004). Risk as Analysis and Risk as Feelings : Some Thoughts about Affect, Reason, Risk, and Rationality. *Risk Analysis*, 24(2) :311–322. (Cité en pages 30, 32, 48 et 89.)
- [Slovic et al., 2007] Slovic, P., Finucane, M. L., Peters, E., and MacGregor, D. G. (2007). The affect heuristic. *European Journal of Operational Research*, 177(3) :1333–1352. (Cité en page 48.)
- [Smirnov, 1966] Smirnov, A. (1966). *La mémoire et l'activité. Recherches psychologiques en URSS*. Editions du Progrès, Moscou. (Cité en page 17.)
- [Somat et al., 2012] Somat, A., Jamet, E., Menguy, E., Forzy, J., and El-Jaafari, M. (2012). Acceptabilité individuelle, sociale & acceptation. Technical report, ANR Projet PARTAGE. (Cité en page 88.)
- [Sperandio, 2003] Sperandio, J. (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. (Cité en page 15.)
- [Stanton et al., 2001] Stanton, N., Young, M., Walker, G., Turner, H., and Randle, S. (2001). Automating the driver's control tasks. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 5(3) :221–236. (Cité en page 87.)
- [Starr, 1969] Starr, C. (1969). Social Benefit versus Technological Risk. *Science, New Series*, 165(3899) :1232–1238. (Cité en page 29.)

-
- [Summala, 1988] Summala, H. (1988). Risk control is not risk adjustment : the zero-risk theory of driver behaviour and its implications. *Ergonomics*, 31(4) :491–506. (Cité en pages 33, 36, 78, 80, 91, 103 et 143.)
- [Summala, 2007] Summala, H. (2007). *Towards understanding motivational and emotional factors in driver behaviour : comfort through satisficing*, pages 189–207. Springer Verlag, London. (Cité en page 233.)
- [Taylor, 1964] Taylor, D. H. (1964). Drivers' galvanic skin response and the risk of accident. *Ergonomics*, 7(4) :439–451. (Cité en page 33.)
- [Tomar and Verma, 2012] Tomar, R. S. and Verma, S. (2012). Safety of Lane Change Maneuver Through A Priori Prediction of Trajectory Using Neural Networks. *Network Protocols and Algorithms*, 4(1). (Cité en pages 63 et 69.)
- [Tsimhoni and Liu, 2003] Tsimhoni, O. and Liu, Y. (2003). Steering a driving simulator using the queueing network-model human processor (qn-mhp). In *Proceedings of the 2nd Int. Driving Symposium on Human factors in driver assesment, training and vehicle design*. (Cité en page 14.)
- [Vaa, 2001] Vaa, T. (2001). Cognition and emotion in driver behaviour models : some critical viewpoints. In *Proceedings of the 14th ICTCT workshop*. (Cité en pages 49 et 212.)
- [Vaa, 2007] Vaa, T. (2007). *Modelling Driver Behaviour on Basis of Emotions and Feelings : Intelligent Transport Systems and Behavioural Adaptations*, pages 208–232. Springer London, London. (Cité en pages 49, 50 et 239.)
- [Vaa, 2011] Vaa, T. (2011). Drivers' information processing, decision-making and the role of emotions : Predictions of the risk monitor model. In Cacciabue, P. Carloand Hjälm Dahl, M., Luedtke, A., and Riccioli, C., editors, *Human Modelling in Assisted Transportation*, pages 23–32, Milano. Springer Milan. (Cité en page 49.)
- [Vaa, 2014] Vaa, T. (2014). From gibson and crooks to damasio : The role of psychology in the development of driver behaviour models. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 25 :112–119. (Cité en page 49.)
- [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. (Cité en pages 12, 43, 44 et 239.)
- [van Winsum et al., 1999] van Winsum, W., de Waard, D., and Brookhuis, K. (1999). Lane change manoeuvres and safety margins. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 2(3) :139–149. (Cité en pages 63, 65, 66, 68, 70, 224 et 239.)
- [Venkatesh et al., 2003] Venkatesh, V., Morris, M., G.B., D., and Davis, F. (2003). User acceptance of information technology : Toward a unified view. *MIS Quarterly*, 27(3) :425–478. (Cité en page 88.)
- [Vermeersch, 1994] Vermeersch, P. (1994). *L'entretien d'explicitation en formation initiale et continue*. ESF Editeur, Paris. (Cité en page 67.)
- [Wang et al., 2018a] Wang, C., Li, Z., Fu, R., Zhang, M., and Sun, Q. (2018a). Lane change safety assessment of coaches in naturalistic driving state. *Safety Science*. (Cité en pages 69 et 75.)
- [Wang et al., 2018b] Wang, C., Sun, Q., Fu, R., Li, Z., and Zhang, Q. (2018b). Lane change warning threshold based on driver perception characteristics. *Accident Analysis & Prevention*, 117 :164–174. (Cité en pages 66, 67, 69 et 123.)

Bibliographie

- [Wang et al., 2013] Wang, J., Zhang, L., Zhang, D., and Li, K. (2013). An adaptive longitudinal driving assistance system based on driver characteristics. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(1) :1–12. (Cité en page 90.)
- [Wierda et al., 1992] Wierda, M., Aasman, J., and te Groningen Verkeerskundig Studiecentrum, R. (1992). Seeing and driving : Computation, algorithms and implementation. Technical report, Traffic Research Centre VSC, University of Groningen. (Cité en page 14.)
- [Wilde, 1982] Wilde, G. J. S. (1982). The Theory of Risk Homeostasis : Implications for Safety and Health. *Risk Analysis*, 2(4) :209–225. (Cité en pages 36, 40, 78, 80, 91, 92, 102, 103, 143, 210, 219, 233, 239 et 254.)
- [Wilde, 2014] Wilde, G. J. S. (2014). *Target Risk 3*. Digital Edition. (Cité en pages 37, 39, 40, 95, 210, 229, 233 et 239.)
- [Xiaokai He et al., 2011] Xiaokai He, Jiajun Hu, Jialiang Lu, Min-You Wu, and Guerin, B. (2011). Driver lane changing behavior. In *Proceedings of 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology*, pages 2385–2389, Harbin, China. IEEE. (Cité en pages 63, 66, 67 et 68.)
- [Zheng et al., 2014] Zheng, J., Suzuki, K., and Fujita, M. (2014). Predicting driver’s lane-changing decisions using a neural network model. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 42 :73–83. (Cité en page 68.)

Glossaire

- ABS** Acronyme pour Anti-lock Braking System ou système anti blocage des roues. 40, 95, 229
- ACC** Acronyme pour Adaptive Cruise Control qui désigne en français le régulateur de vitesse adaptatif. 89
- ADAS** Acronyme pour Advanced Driver Assistance System : système d'aide à la conduite. 81, 83, 90
- AUTOS** Acronyme pour Artefact - Utilisateur - Tâche - Organisation - Situation. 87
- CAN** Acronyme pour Controller Area Network, il s'agit d'un standard de bus de communication très communément utilisé dans l'industrie automobile. 67, 116
- CDV** Acronyme pour Changement De Voie manœuvre décrite au chapitre 3. i, vii, 1, 3, 4, 59–79, 86, 89–97, 101–113, 117, 120–129, 132–134, 143, 145–149, 151, 154–159, 161, 164, 165, 168–172, 175, 176, 178, 180–184, 186, 187, 189–191, 194–200, 202–205, 209–231, 233–235, 240, 241
- COSMODRIVE** COgnitive Simulation MOdel of the DRIVEr. i, ii, 1–3, 9, 11, 13, 15–21, 24, 33, 50, 54, 59, 65, 70, 73, 74, 76, 77, 92, 93, 101, 111, 117, 124, 127, 212, 219, 224, 230, 233
- CRITIC** Acronyme pour Common RiSk awareness measurement meThod for Inter-population Comparisons. Outil d'étude de l'évaluation de la conscience du risque à de fins de comparaisons entre populations (2.3). 51, 53
- CTAM** Acronyme pour Car Technology Acceptance Model que l'on traduit en français par : Modèle d'Acceptation des Technologies de Véhicules. 88, 89
- Ego** Véhicule Ego, véhicule conduit par le participant. 114, 120, 121, 125, 126, 133, 164, 165, 168, 191
- FoG-CoQS** Acronyme pour Focus Group based-on Collective Questionnaire Sessions. 88
- gap** Espace d'insertion potentiel entre deux voitures dans lequel le véhicule qui change de voie va éventuellement s'insérer. 55, 74, 75, 77–80, 91, 92, 96, 97, 102, 103, 107, 145, 146, 148, 155–159, 162, 164–167, 171, 172, 175, 178, 180, 181, 190, 199–201, 203, 204, 210, 219, 229
- GC** Gap Closer, véhicule fermant le gap. 114, 120, 121, 125, 128, 132, 146, 164, 165, 168, 169, 190, 203–205, 213–216, 219, 234, 238
- GLMM** Acronyme pour désigner les modèles linéaires généralisés mixtes. 140, 157, 171
- GO** Gap Opener, véhicule ouvrant le gap. 114, 120, 121, 125, 127, 128, 132, 164, 165, 168, 169, 190, 191, 203–205, 213, 214, 216, 219, 234, 238
- GPS** Acronyme pour Global Positioning System que l'on traduit parfois en français par : géo-positionnement par satellite. 83
- GSR** Acronyme pour Galvanic Skin Response ou conductance cutanée (également appelée réponse électro-dermale). 34

- HCD** Acronyme pour Human Centered Design équivalent anglais de Conception Centrée sur l'Humain. 81
- KB** Knowledge-Based behaviour ou comportement basé sur les connaissances dans la hiérarchie de Rasmussen. 11
- KS** Acronyme pour désigner le test de normalité Kolmogorov-Smirnov. 165, 166
- LESCOT** Acronyme pour Laboratoire d'Ergonomie et de Sciences Cognitives pour les Transports. 1, 3, 9, 112, 233
- MDT** Acronyme pour Mémoire De Travail. 16, 17, 19, 22
- MLT** Acronyme pour Mémoire à Long Terme. 16–19, 21
- MSS** Acronyme pour Minimum Safety Spacing équivalent anglais de distance de sécurité minimale. 68
- MSSLC** Acronyme pour Minimum Safety Spacing for Lane Change équivalent anglais de distance de sécurité minimale pour le changement de voie. 68, 69
- NHTSA** Acronyme pour National Highway Traffic Safety Administration est une agence du département des transports américain. 81
- ONISR** Acronyme pour Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière. 8
- Pro-SIVICTM** Logiciel de simulation de capteurs et d'environnement développé par la société ESI S.A.. 116, 117, 126
- QR Codes** Acronyme pour le terme anglais Quick Response Code, il s'agit d'un type de code barre matriciel le plus souvent associé à une adresse internet. 118
- RB** Rule-Based behaviour ou comportement basé sur les règles dans la hiérarchie de Rasmussen. 11
- RHT** Acronyme pour Risk Homeostasis Theory qui désigne en français la théorie de l'homéostasie du risque de [Wilde, 1982]. 36, 92, 143, 146, 156, 158, 210–212
- RTMapsTM** RTMapsTM est un logiciel développé par la société Intempora S.A. permettant l'acquisition de données multi-capteurs asynchrones.. 117, 118
- SA** Acronyme pour Situation Awareness équivalent anglais de la Conscience de la situation. 20, 67
- SAE** Acronyme pour Society of Automotive Engineers International association professionnelle d'ingénieurs basée aux USA. 84, 88
- SB** Skill-Based behaviour ou comportement basé sur les habiletés dans la hiérarchie de Rasmussen. 11
- SIMAX** La cabine SIMAX est une cabine de simulation développée et maintenue par le laboratoire LEPSIS à l'IFSTTAR. 115

- TAM** Acronyme pour Technology Acceptance Model que l'on traduit en français par : Modèle d'Acceptation des Technologies. 88
- TIV** Temps Inter-Véhiculaire aussi appelé Time HeadWay en Anglais. 24, 55, 66, 69, 76, 77, 91, 95, 107, 111, 114, 117, 118, 120, 125, 127, 139, 164–169, 190, 203, 205, 213–216, 223
- TLC** Temps au franchissement de voie, acronyme du terme anglais Time to Lane Crossing. 66, 68, 70
- TTC** Temps à la Collision, acronyme du terme anglais Time To Collision. 66, 69, 96, 125
- UTAUT** Acronyme pour Unified theory of Acceptance and Use of Technology que l'on traduit en français par : Théorie Unifiée de l'Acceptation et de l'Utilisation des Technologies. 88
- UX** Acronyme pour User Experience que l'on traduit en français par : Expérience Utilisateur. 88
- V-HCD** Virtual Human Centered Design : Plateforme pour la conception virtuelle centrée sur l'humain. 107, 116, 118, 124, 126, 127
- VA** Acronyme pour Véhicule / Voiture Autonome. 141, 187–190
- ZE** Acronyme pour Zones Enveloppes concept décrit en 1.3.5. 24, 25, 53–55, 76, 77, 79, 92, 102, 143, 204, 212, 213, 215–218, 229
- ZRT** Acronyme pour Zero Risk Theory qui désigne en français la théorie du risque zéro de [Näätänen and Summala, 1974]. 34, 92, 124, 143, 145, 146, 150, 151, 156, 158, 168, 210–213

Table des enregistrements RTMaps

Source de Données	Données enregistrées
Pro-Sivic données voitures : <i>Ego, Gap Opener, Gap Closer</i>	Time Stamp Speed X Speed Y Speed Z Steering Angle Vehicle Coord X Vehicle Coord Y Vehicle Coord Z AccX AccY AccZ AngleX AngleY AngleZ
Pro-Sivic valeurs calculées	Angle volant Pédale accélérateur Pédale frein Ego accélération Clignotant gauche Clignotant droit Ego vitesse Ego angle volant Ego to GO TIV Ego to GO TTC Ego to GO eTTC GC to Ego TIV GC to Ego GC TTC GC to Ego GC eTTC Gap Length
Pro-Sivic Marqueurs temporels	Gap Opening Cars Overtaking Gap Comming Not in gap In gap Init Freeze End

Tableau 43 – détail des données RT Maps enregistrées

Questionnaire d'acceptabilité générale

Numéro	Item
Item 1	Si l'occasion m'était donnée ; j'aimerais bien essayer une voiture autonome.
Item 2	Je pense qu'une voiture autonome me serai utile dans mes pratiques personnelles de déplacement.
Item 3	Je pense que j'utiliserais une voiture autonome fréquemment.
Item 4	Je pense que les voitures autonomes vont devenir une partie importante du système de transport de demain.
Item 5	Je pense que l'utilisation de voitures autonomes pour mes déplacements journaliers serait plus confortable que la manière dont je me déplace actuellement.
Item 6	Je pense que les voitures autonomes seraient plus efficaces (rapides) que la manière dont je me déplace actuellement.
Item 7	Je pense que les voitures autonomes seraient plus sûres que la manière dont je me déplace actuellement.
Item 8	Je pense que j'aurais une plus grande confiance en une voiture autonome. que les moyens de transport que j'utilise actuellement.
Item 9	Je pense qu'il serait facile de comprendre comment utiliser une voiture autonome.
Item 10	Il ne me faudrait pas longtemps pour apprendre à utiliser une voiture autonome.
Item 11	Je pense que mon entourage serait favorable à ce que j'utilise une voiture autonome.
Item 12	Je serais plus enclin à utiliser une voiture autonome si mes amis et ma famille en utilisaient aussi.
Item 13	Si elles étaient abordables et disponibles ; j'utiliserais les voitures autonomes.
Item 14	Je souhaiterais pouvoir utiliser une voiture autonome pour mes loisirs (sorties ; week-ends ; vacances).
Item 15	Je souhaiterais pouvoir utiliser une voiture autonome pour mes déplacements quotidiens (école ; travail).
Item 16	Les voitures autonomes correspondraient mieux à mes attentes que mon moyen de transport dominant actuel.
Item 17	Je souhaiterais pouvoir m'abonner à un service de mobilité a la demande avec des voitures autonomes.
Item 18	Utiliser une voiture autonome est une bonne idée.
Item 19	Utiliser une voiture autonome pourrait être source d'inquiétude ou de risque pour moi.
Item 20	Les voitures autonomes rendraient les déplacements plus agréables.
Item 21	L'interaction avec une voiture autonome devrait être amusante.

Tableau 44 – Questionnaire d'acceptabilité générale a priori

Acceptabilité générale a priori, résultats détaillés

Item	Groupe	Moyenne	Ecart-type	Significativité
Item 1	Sceptiques	6.7	2.79	$p < .05$
	Enthousiastes	9.44	1.13	
Item 2	Sceptiques	2.8	2.39	$p < .01$
	Enthousiastes	7.33	2.59	
Item 3	Sceptiques	2.8	2.25	$p < .05$
	Enthousiastes	7.88	1.90	
Item 4	Sceptiques	5.6	1.17	$p < .01$
	Enthousiastes	9.22	0.97	
Item 5	Sceptiques	2.7	2.79	NS
	Enthousiastes	6.55	3.71	
Item 6	Sceptiques	2.1	2.42	$p < .01$
	Enthousiastes	6.11	3.14	
Item 7	Sceptiques	2	1.94	$p < .01$
	Enthousiastes	9	1.11	
Item 8	Sceptiques	2.4	1.95	$p < .05$
	Enthousiastes	7.66	1.5	
Item 9	Sceptiques	5.9	3.14	NS
	Enthousiastes	8.22	1.64	
Item 10	Sceptiques	5.4	2.41	NS
	Enthousiastes	7.22	1.85	
Item 11	Sceptiques	3.5	2.17	NS
	Enthousiastes	6.33	3.42	
Item 12	Sceptiques	4.4	2.98	NS
	Enthousiastes	6.33	3.08	
Item 13	Sceptiques	2.8	2.52	$p < .01$
	Enthousiastes	9	1	
Item 14	Sceptiques	2.8	2.52	$p < .01$
	Enthousiastes	7.88	1.26	
Item 15	Sceptiques	2.5	2.41	$p < .01$
	Enthousiastes	7.44	2.55	
Item 16	Sceptiques	1.9	2.07	$p < .01$
	Enthousiastes	5.66	3.16	
Item 17	Sceptiques	3.1	2.64	NS
	Enthousiastes	4.33	3.20	
Item 18	Sceptiques	3.6	2.75	$p < .01$
	Enthousiastes	9	1.11	
Item 19	Sceptiques	7.1	1.91	$p < .01$
	Enthousiastes	2	1.93	
Item 20	Sceptiques	4.7	2.31	$p < .05$
	Enthousiastes	8.22	2.16	
Item 21	Sceptiques	3.6	2.98	NS
	Enthousiastes	5.88	3.58	

Tableau 45 – Comparaison des groupes d'acceptabilité générale a priori

Criticité suivant la décision de changement de voie

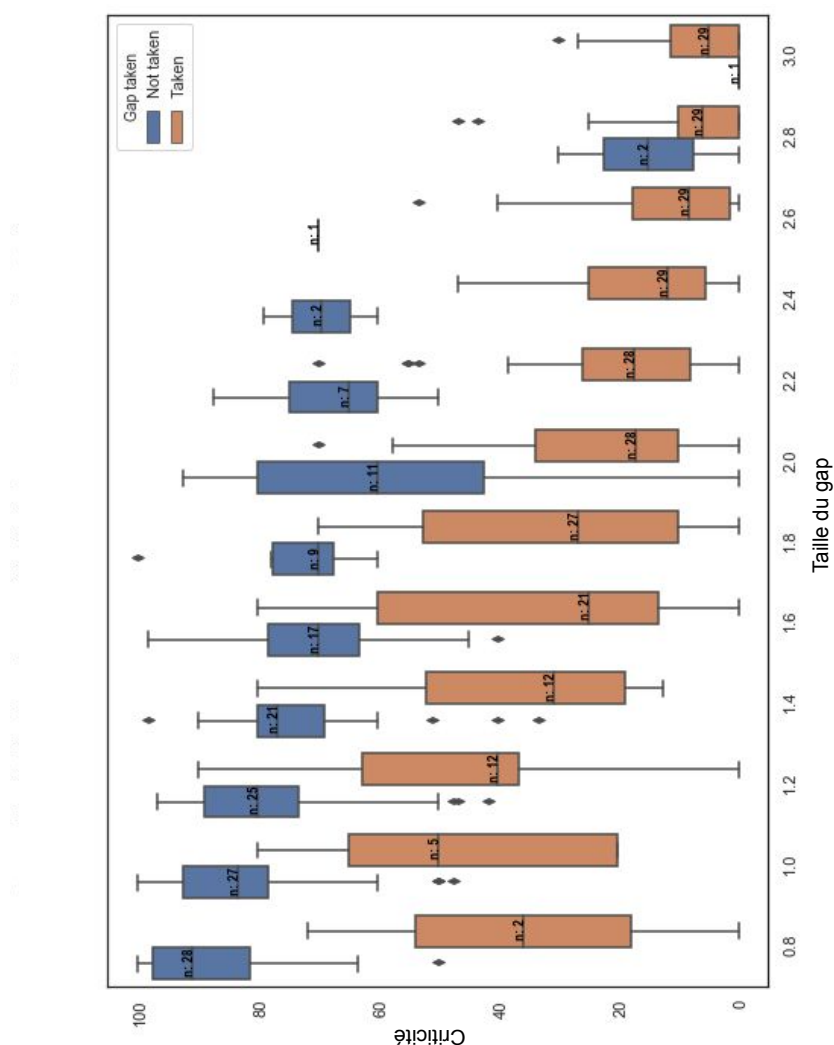


Figure 95 – Distribution des criticités suivant la taille des gaps et les décisions prises

