



HAL
open science

Évaluation du risque ressenti par un passager de véhicule autonome naviguant parmi des piétons

Jeffery Petit

► **To cite this version:**

Jeffery Petit. Évaluation du risque ressenti par un passager de véhicule autonome naviguant parmi des piétons. Psychologie. Université de Nantes, 2022. Français. NNT: . tel-03759762

HAL Id: tel-03759762

<https://hal.science/tel-03759762v1>

Submitted on 24 Aug 2022

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 DE NANTES

ÉCOLE DOCTORALE N° 603

Éducation, Langages, Interactions, Cognition, Clinique

Spécialité : *Psychologie*

Par

Jeffery PETIT

Évaluation du risque ressenti par un passager de véhicule autonome naviguant parmi des piétons

Thèse présentée et soutenue à École Centrale Nantes, le lundi 16 mai 2022

Unité de recherche : Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes (LS2N)

Rapporteurs avant soutenance :

Aurélie DOMMES Directrice de Recherche à l'Université Gustave Eiffel
Dominique VAUFREYDAZ Maître de Recherche HDR à l'Université Grenoble Alpes

Composition du Jury :

Président :	Christine CHAUVIN	Professeure des Universités à l'Université Bretagne Sud
Examineurs :	Aurélie DOMMES	Directrice de Recherche à l'Université Gustave Eiffel
	Dominique VAUFREYDAZ	Maître de Recherche à l'Université Grenoble Alpes
	Christine CHAUVIN	Professeure des Universités à l'Université Bretagne Sud
	Stéphanie COEUGNET	Directrice du Département R&D à ITE VEDECOM
Co-dir. de thèse :	Camilo CHARRON	Maître de Conférences HDR à l'Université Rennes 2
Co-dir. de thèse :	Franck MARS	Directeur de Recherche au CNRS (Nantes Université)

REMERCIEMENTS

Je voulais d'abord remercier les personnes m'ayant aidé à réaliser mes travaux empiriques. Je pense à Damien Schnebelen et Paul Marti, qui m'ont accordé du temps pour me former sur le fonctionnement du simulateur de conduite. Je suis également reconnaissant pour l'investissement de Denis qui a su faire preuve d'une grande disponibilité et me dépanner à de nombreuses reprises. Merci également à tous les participants de mes expérimentations.

Cette thèse ne se serait pas bien déroulée sans un environnement scientifique propice au questionnement et à l'innovation intellectuelle. Je remercie d'abord les membres du projet HIANIC, les membres de l'équipe PACCE et les membres de mon CSI. Ils m'ont apporté des commentaires précieux et constructifs au cours des diverses réunions qui ont rythmé le projet. Je remercie également d'autres personnes qui m'ont accordé du temps à différents moments. Je pense à Jérôme Idier et Saïd Moussaoui qui m'ont permis d'approfondir ma réflexion sur des points de modélisation. Mais aussi à Jean-François Petiot qui m'a accordé du temps à divers moments pour me renseigner et me former sur plusieurs aspects méthodologiques.

Enfin, je tiens tout particulièrement à remercier mes directeurs, Franck et Camilo. Je sais que j'ai été chanceux d'avoir pu bénéficier de leurs contributions actives dans mes travaux. Ils ont toujours été disposés à répondre à mes questions. Ils m'ont aidé à progresser, à approfondir ma réflexion et à prendre du recul quand je butais sur certains aspects techniques et théoriques. Ils ont toujours su rester patients et compréhensifs. J'espère leur avoir apporté satisfaction en retour.

Finalement, j'avouerai que ce projet doctoral m'a mis à rude épreuve. Comme beaucoup, mon rythme de travail a été bouleversé par la crise sanitaire. En tant que doctorant et père de famille, j'ai dû faire des concessions autant dans le domaine professionnel que dans le domaine personnel. Je tiens donc à manifester toute ma gratitude à mon entourage proche, mes amis et ma famille. En particulier, je dois l'achèvement de ce long projet à ma femme qui m'a toujours soutenu.

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	5
Liste des figures	10
Liste des tables	13
Introduction générale	15
I Cadre théorique et objectifs des travaux	19
1 Les véhicules autonomes dans les espaces partagés	21
1.1 L'automatisation de la conduite automobile et son intérêt	21
1.2 Caractérisation d'un véhicule autonome	22
1.3 La législation encadrant l'utilisation du véhicule autonome	24
1.4 Le véhicule autonome en espace partagé	26
2 L'individu face au risque	31
2.1 Caractérisation du risque	31
2.1.1 Le construit théorique du risque d'après Yates et Stone (1992)	31
2.1.2 L'évaluation objective du risque	35
2.1.3 L'importance de l'évaluation du risque dans la prise de décision	37
2.2 La perception du risque	41
2.2.1 Risque : sensation ou analyse	41
2.2.2 Les réactions physiologiques à la perception du risque	43
2.2.3 L'évaluation subjective de la perception du risque	46
2.3 Perception du mouvement et risque	48
2.3.1 La perception du temps avant collision	48
2.3.2 La perception du temps avant intersection	52
2.3.3 Synthèse	55

2.4	La régulation de la conduite basée sur la perception du risque . . .	55
2.4.1	Modèle de Näätänen et Summala (1974)	55
2.4.2	Modèle de Wilde (1982)	57
2.4.3	Field of safe travel (Gibson et Crooks, 1938)	58
2.4.4	Le modèle de marge de sécurité défini par Boer (2006) . . .	60
2.4.5	Synthèse	62
2.5	Concepts associés à la perception du risque	63
2.5.1	Les réactions émotionnelles	63
2.5.2	Inconfort et stress	66
2.5.3	Confiance	69
2.5.4	Synthèse	71
3	Axes de travail de la partie empirique	73
3.1	Présentation des enjeux et des deux axes de recherche	73
3.2	Solutions envisagées pour répondre aux deux axes de recherche . .	75
3.3	Expérimentations menées pour répondre aux deux axes de recherche	76
II	Contributions empiriques	79
4	Méthodologie Générale	81
4.1	Matériel expérimental	81
4.1.1	Le simulateur de conduite	81
4.1.2	Les outils de mesure de perception du risque	82
4.2	Exploitation des données	84
4.2.1	Analyse de la perception implicite du risque grâce à l'activité électrodermale	84
4.2.2	Analyse de la perception explicite du risque	86
5	Modélisation par réponse impulsionnelle de la dynamique de percep- tion explicite du risque	89
5.1	Introduction et objectifs	90
5.2	Méthode	92
5.2.1	Participants	92
5.2.2	Plan d'expérience	92

5.2.3	Facteurs manipulés	93
5.2.4	Variable dépendante et calcul d'indicateurs	94
5.2.5	Procédure	96
5.3	Présentation de la modélisation par réponse impulsionnelle	97
5.4	Résultats	100
5.4.1	Validation de l'effet des facteurs	100
5.4.2	Performance de la modélisation	102
5.5	Discussion et conclusion	106
6	Modélisation par réseau bayésien de la perception implicite et explicite du risque dans des situations de dépassement de piétons	109
6.1	Introduction et objectifs	110
6.1.1	Coexistence de deux types de perception du risque	110
6.1.2	Mesures afférentes à chacun des types de perception du risque	111
6.1.3	Objectifs de l'étude	111
6.2	Méthode	113
6.2.1	Participants	113
6.2.2	Indicateurs de perception implicite et explicite du risque . . .	113
6.2.3	Procédure	115
6.3	Analyse de données	115
6.4	Résultats	121
6.4.1	Relation entre les mesures des types de perception du risque	121
6.4.2	Influence des facteurs indépendants sur les mesures de perception du risque	124
6.5	Discussion et conclusion	129
7	Modélisation par réseau bayésien de la perception implicite et explicite du risque dans des situations de croisement	133
7.1	Introduction et objectifs	134
7.1.1	Les espaces partagés et les interactions véhicule-piéton . . .	134
7.1.2	Navigation autonome parmi des piétons	135
7.1.3	Ressenti d'un passager de véhicule autonome	135
7.1.4	Analyse de la perception du risque de collision	137
7.1.5	Objectifs de l'étude	137

7.2	Méthode	138
7.2.1	Participants	138
7.2.2	Plan d'expérience	138
7.2.3	Variables dépendantes	142
7.2.4	Procédure	142
7.3	Analyse de données	144
7.4	Résultats	148
7.4.1	Résultats pour les indicateurs iSA et nSCR	149
7.4.2	Résultats pour les indicateurs mSA and mSCR	151
7.5	Discussion et conclusion	155
Discussion générale, perspectives de recherche et conclusion		159
	Synthèse des travaux	159
	Perception implicite et explicite du risque	161
	Perception du risque et inconfort	164
	Apports méthodologiques	167
	Apports pour la navigation d'un véhicule autonome en espace partagé	170
	Limites et perspectives associées	172
	Conclusion	173
A	Annexes	175
A.1	Estimation et optimisation des coefficients de modélisation par réponse impulsionnelle	175
A.1.1	Identification d'un modèle ARX et optimisation de la distance d'arrêt	175
A.1.2	Optimisation globale des paramètres	176
A.2	Estimation et comparaison de réseaux bayésiens hybrides	178
A.2.1	Calcul du BIC d'un réseau bayésien hybride	178
A.2.2	Analyse par cluster	179
A.2.3	Fonctions annexes	180
A.3	Formulaire de consentement éclairé	187
A.4	Fiche d'information soumise aux participants	189
Liste des acronymes		190

Bibliographie

193

LISTE DES FIGURES

1	Organisation du manuscrit.	18
1.1	Les six niveaux d'automatisation de la conduite (SAE International, 2020).	23
1.2	Deux exemples d'espaces partagés.	27
1.3	Navettes autonomes expérimentées à Sion et Paris.	28
2.1	Amplitude d'une perte d'après Yates et Stone (1992)	33
2.2	Situation à risque d'après Yates et Stone (1992)	34
2.3	Valeur subjective attribuée au risque et aux pertes	40
2.4	« Street Calcul » (extrait de Slovic et al., 2004 ; ©Garry Trudeau). . .	43
2.5	Composition du système nerveux autonome (SNA).	44
2.6	Exemple de dispositifs permettant l'évaluation de la perception du risque en temps réel.	48
2.7	Représentation de l'angle optique.	49
2.8	Modèle d'adaptation de la vitesse (Lee, 1976).	52
2.9	Représentation du <i>bearing angle</i> (Ondrej et al., 2010).	54
2.10	Modèle de contrôle du risque subjectif de Näätänen et Summala (1974).	56
2.11	Extrait du modèle d'homéostasie du risque de Wilde (1982).	57
2.12	Représentation du <i>field of safe travel</i> défini par Gibson et Crooks (1938).	59
2.13	Modèle de marge de sécurité proposé par Boer (2006).	61
2.14	Organigramme des composantes liées à l'émotion d'après Scherer (2005)	64
2.15	Réactions de l'organisme liées au stress	68
2.16	Modèle de confiance d'après Mayer et al. (1995).	71
3.1	Axe de travail de la thèse.	74

3.2	Contexte expérimental et objectifs des contributions.	77
4.1	Simulateur de conduite à base fixe.	81
4.2	Matériel de mesure de l'activité électrodermale (AED).	83
4.3	Matériel d'évaluation explicite du risque.	83
4.4	Illustration de l'écran central où figure le retour visuel sur la position du potentiomètre.	84
4.5	Identification des composantes tonique et phasique de l'AED avec l'application Ledalab (Benedek et Kaernbach, 2010).	86
4.6	Exemple d'évaluation explicite du risque.	88
5.1	Schématisation de la trajectoire du véhicule parmi des piétons.	93
5.2	Aperçus des écrans pendant une manœuvre de dépassement par la gauche.	95
5.3	Échantillon de l'évaluation subjective enregistrée pour un participant lors de la première expérimentation.	96
5.4	Étape de modélisation la dynamique de perception du risque.	100
5.5	Moyennes des indicateurs iSA et mSA en fonction des facteurs TTC et Offset.	101
5.6	Quatre exemples de performance de la modélisation.	105
5.7	Exemple de résultat obtenu pour la validation de la modélisation.	106
6.1	Exemple de données d'évaluation subjective du risque et de SCRs associées.	114
6.2	Graphes des réseaux bayésiens testés dans la deuxième expéri- mentation.	118
6.3	Graphes des meilleurs réseaux bayésiens obtenus pour les quatre couples d'indicateurs.	123
6.4	Moyennes des indicateurs SA en fonction des facteurs TTC et Offset.	124
6.5	Évolution des indicateurs SCR en fonction du TTC et des valeurs d'indicateur SA.	126
6.6	Graphe du meilleur réseau bayésien pour les indicateurs mSA et mSCR.	126
6.7	Graphe du meilleur réseau bayésien pour les indicateurs mSA et nSCR.	127

6.8	Graphe du meilleur réseau bayésien pour les indicateurs iSA et mSCR.	127
6.9	Graphe du meilleur réseau bayésien pour les indicateurs iSA et nSCR.	128
7.1	Schématisation des facteurs manipulés dans la deuxième expérimentation.	140
7.2	Exemple de données récoltées lors de la deuxième expérimentation.	143
7.3	Capture d'écran réalisée pendant une situation de croisement de la deuxième expérimentation.	144
7.4	Relations possibles entre les facteurs et les indicateurs.	146
7.5	Coefficients estimés pour le meilleur réseau bayésien obtenu pour les indicateurs iSA et nSCR.	151
7.6	Moyennes des indicateurs iSA et nSCR.	152
7.7	Graphe des meilleurs réseaux bayésiens obtenus pour les indicateurs mSA and mSCR.	153
7.8	Coefficients estimés pour le meilleur réseau bayésien obtenu pour les indicateurs mSA et mSCR.	154
7.9	Moyennes des indicateurs mSA et mSCR.	155

LISTE DES TABLES

2.1	Caractéristiques des processus de type 1 et 2 (Evans et Stanovich, 2013).	42
2.2	Mise en relation de la dynamique d'approche avec les indicateurs de perception visuelle (Lee, 1976).	51
5.1	Fréquence des modalités pour les facteurs <i>time-to-collision</i> (TTC) et Offset manipulés au cours de la première expérimentation.	94
5.2	Performances médianes de la modélisation par participant.	103
6.1	Fréquence des modalités pour les facteurs TTC et Offset.	116
6.2	Effet de la transformation et de la normalisation des indicateurs d'évaluation subjective.	116
6.3	Degrés de preuve de Raftery (1995).	120
6.4	Transformation et normalisation des indicateurs d'évaluation subjective.	122
7.1	Facteurs manipulés dans la deuxième expérimentation.	139
7.2	Élaboration du plan d'expérience fractionnaire d'après Goupy et Creighton (2008).	141
7.3	Transformation des indicateurs SA.	147
7.4	Comparaison entre les 32 situations et les quatre collisions fictives de la deuxième expérimentation.	148
7.5	Moyennes marginales des indicateurs en fonction des sept facteurs manipulés dans la deuxième expérimentation.	150

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Contexte

Le véhicule autonome (VA) donne lieu actuellement à nombre de travaux de recherche. L'enjeu majeur qui gouverne une très grande partie de ces travaux est la sécurité : les systèmes d'automatisation de la conduite doivent la garantir pour tous les usagers avec qui les véhicules sont en interaction, qu'il s'agisse des passagers à l'intérieur du véhicule ou de tout autre individu à l'extérieur du véhicule. Cette problématique constitue un enjeu clé pour les constructeurs. Elle peut se résumer au simple fait qu'un VA ne doit pas être à l'origine d'un accident.

Néanmoins, le fait de pouvoir garantir la sécurité des usagers n'est pas le seul critère d'adoption des véhicules autonomes par le grand public. En effet, un VA est avant tout un moyen de transport de personnes. À ce titre, il doit être capable de naviguer de manière efficace en s'intégrant dans une circulation parfois complexe et soumise à des incertitudes sur le comportement des autres usagers. Pour l'heure, l'usage des VA est limité non seulement par les législations nationales et internationales, mais aussi par la grande difficulté de développer un comportement de navigation apte à s'intégrer parmi différents types d'usagers de la route. En témoignent les systèmes de pilotage les plus avancés actuellement ou prochainement commercialisés (e.g., ceux de Honda, Renault ou Daimler) qui sont limités à des utilisations sur routes réservées aux véhicules motorisés.

La navigation d'un VA dans des environnements mixtes est beaucoup plus complexe et reste pour le moment à l'état d'expérimentation. Pour cause, un VA naviguant parmi d'autres usagers doit non seulement respecter le code de la route, mais aussi un ensemble de conventions sociales implicites. En conduite traditionnelle, ces conventions sont adoptées par le conducteur en temps réel grâce aux interactions (les contacts visuels, par exemple) qu'il peut avoir avec les autres usagers. En conduite autonome, la nature des interactions est profondément modifiée, car le conducteur est relégué au rang de simple passager. De ce fait, les poten-

tielles interactions entre ce dernier et l'environnement extérieur n'ont plus d'impact sur le comportement du véhicule. Par conséquent, les conventions sociales doivent être intégrées au système de navigation. Cette intégration représente un facteur clé pour l'acceptation des VA. Il s'agit d'une problématique majeure permettant à un VA d'avoir un comportement à la fois compatible avec les déplacements des autres usagers et en adéquation avec les risques perçus par ses passagers.

L'étude de la perception des risques en navigation autonome s'avère être un défi majeur pour le développement et l'adoption des VA. Ce défi sera d'autant plus essentiel lorsqu'un VA va devoir « négocier » une trajectoire dans un espace partagé (Hamilton-Baillie, 2008). Ce type d'espace est aménagé dans des zones urbaines souvent très fréquentées à la fois par des piétons et des véhicules. Pour fluidifier la circulation, ce type d'aménagement urbain favorise l'occupation de tout l'espace disponible en supprimant les séparations entre les usagers (e.g., absence de marquage au sol et panneaux de signalisation). Dans ce contexte et pour maintenir sa progression, il est indispensable pour un conducteur d'adapter sa vitesse et de parfois diminuer ses distances de sécurité. Il est donc logique que le passager d'un VA s'attende à ce que le véhicule adopte ce type de comportement. Toutefois, il apparaît que ce type de stratégie de navigation doit être implémenté avec précaution. En effet, la vitesse et la trajectoire suivies par le VA sont censées ne jamais susciter un sentiment de risque chez les passagers.

Le risque auquel s'expose un véhicule autonome en situation dynamique est abordé dans la littérature par deux grandes approches complémentaires. La première approche est centrée sur la technique et la dynamique du véhicule dans son environnement. Elle consiste à étudier et/ou à développer un comportement de navigation basé sur une définition mathématique du risque en tenant compte des caractéristiques physiques du véhicule, de sa dynamique et de celle de son environnement (e.g., Wang et al., 2015, 2016 ; Zhang et al., 2020). La deuxième approche est centrée sur le ressenti des passagers d'un VA. Elle consiste à étudier les facteurs du comportement d'un VA qui influencent la perception du risque de ses passagers (e.g., Kolekar et al., 2020, 2021 ; He et al., 2022). Cette approche a pour avantage de permettre le développement d'un comportement autonome au plus proche de la conduite d'un opérateur humain. Cela permet notamment de déterminer des critères d'acceptabilité applicables dans des situations où il n'existe

pas, à priori, de règles formelles. Cette approche a pour avantage de placer le ressenti des passagers au centre du développement des VA et ainsi de favoriser leur acceptation.

C'est dans cette optique que s'inscrit ce projet de thèse. Il a pour objectif d'étudier la perception du risque d'un passager de VA quand ce dernier navigue parmi des piétons en espace partagé. Le but principal est de développer une méthodologie d'analyse du risque en temps réel afin d'apporter des éléments de compréhension sur les facteurs dynamiques qui influencent le ressenti des passagers. Une telle méthodologie permettrait de tester et de valider le comportement des VA avant leur déploiement auprès du grand public. Ce projet permet donc de contribuer au développement d'une navigation autonome centrée sur l'humain plutôt que sur des règles de décisions mathématiques et catégoriques décorrélées de la perception réelle des usagers.

Organisation du manuscrit

Le plan de ce manuscrit est illustré sur la figure 1. Il est constitué de deux grandes parties aboutissant à une discussion générale.

La première partie permet de poser un cadre théorique afin de mieux comprendre le contexte du projet et les travaux réalisés. Cette partie est composée de trois chapitres. Le chapitre 1 consiste à présenter les VA de manière générale, puis à définir les problématiques rencontrées lors de la navigation en espace partagé. Le chapitre 2 permet de définir la notion de risque et la manière dont il est perçu par l'individu. La notion du risque est d'abord définie dans un contexte général, puis dans le contexte de la conduite automobile. Ce chapitre se termine par la présentation de quelques notions essentielles relatives à l'analyse du ressenti par un passager à bord d'un VA. Enfin, le chapitre 3 permet de présenter les axes de travail traités au cours de ce projet de thèse.

La deuxième partie porte sur les contributions empiriques du projet. Cette partie est composée de quatre chapitres. La méthodologie générale employée dans les expérimentations est présentée dans le chapitre 4. Le chapitre 5 présente une étude de la dynamique du risque subjectif, en cherchant à modéliser le risque subjectif par le passager au fil de manœuvre de dépassement de piétons. Le chapitre 6 présente une étude du ressenti du risque dans des situations dans cette même

situation, mais en cherchant cette fois à modéliser les liens entre des facteurs déterminant la relation véhicule-piéton et la perception du risque évaluée au travers de l'évaluation subjective des participants, mais aussi de leurs réponses physiologiques au risque de collision. Enfin, le chapitre 7 présente une autre étude répondant aux mêmes objectifs, mais dans des situations plus complexes où davantage de facteurs déterminent les trajectoires relatives des piétons et du VA.

Pour terminer, à partir de la synthèse des contributions empiriques, la discussion générale tirera les enseignements de la thèse sur la mesure de la perception du risque, tant d'un point de vue méthodologique que théorique. De nouvelles perspectives de recherche seront brièvement esquissées.

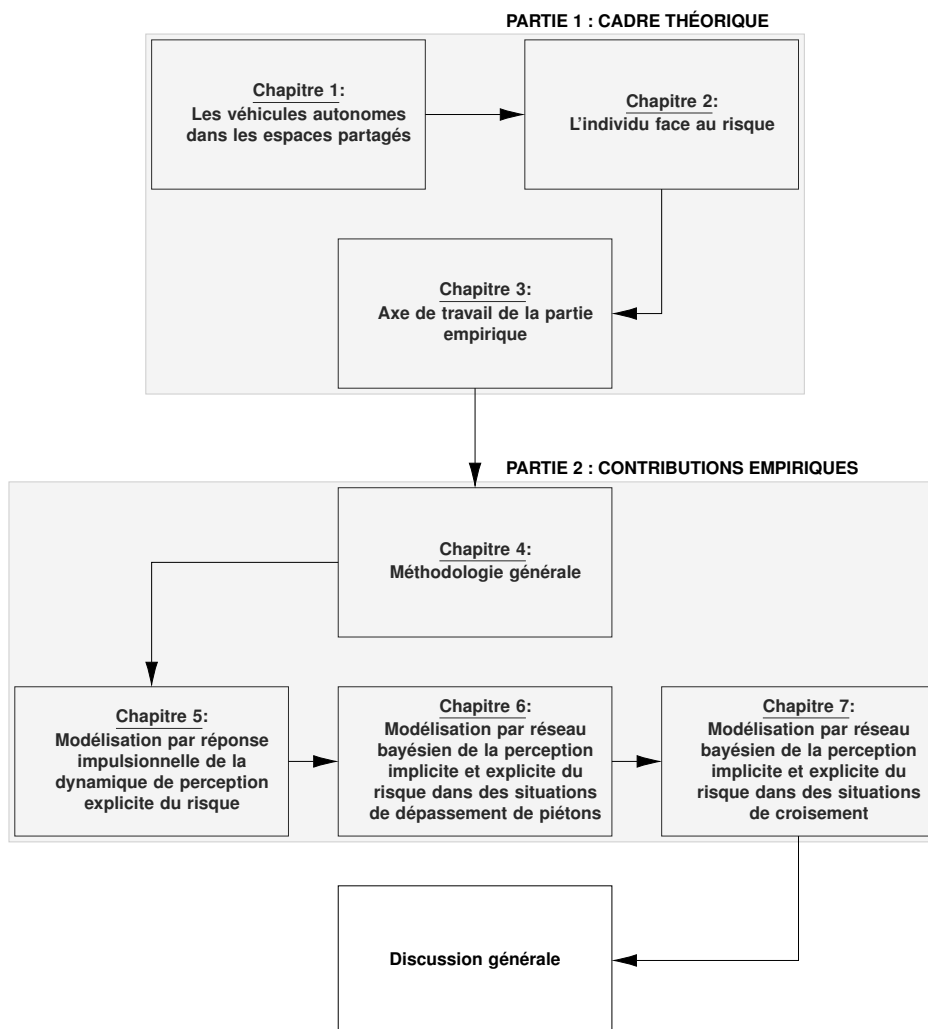


FIGURE 1 – Organisation du manuscrit.

PREMIÈRE PARTIE

Cadre théorique et objectifs des travaux

LES VÉHICULES AUTONOMES DANS LES ESPACES PARTAGÉS

L'objectif de ce chapitre est d'introduire l'intérêt des véhicules autonomes (VA) et de discuter de son utilisation dans le cadre des espaces partagés. La section 1.1 présente l'intérêt de l'autonomisation de la conduite et les raisons qui favorisent son développement. La section 1.2 permet d'introduire le référentiel permettant de caractériser un VA. La section 1.3 présente quelques éléments de cadre législatif national et international qui régulent l'utilisation des VA. La section 1.4 présente le concept d'espace partagé, ses intérêts et les principaux défis qu'il pose pour la navigation des VA.

1.1 L'automatisation de la conduite automobile et son intérêt

L'activité de conduite a beaucoup évolué au cours de ces dernières décennies. Le nombre d'usagers automobiles a grandi de manière conséquente, les véhicules sont conçus pour sécuriser de mieux en mieux les occupants et les conducteurs sont de plus en plus assistés par des systèmes automatisés communément appelés *advanced driver-assistance systems* (ADAS). Ces ADAS visent à faciliter le rôle des conducteurs (e.g., régulateur de vitesse, allumage automatique des feux, déclenchement automatique des essuie-glaces) et augmentent la sécurité des déplacements (e.g., alerte de collision, détection d'angle mort, détection de franchissement de ligne blanche).

La sécurité prend une part importante dans l'engouement pour l'automatisation de la conduite automobile, car il est reconnu que l'erreur humaine est la princi-

pale cause des accidents de la route. L'analyse de Dingus et al. (2016) sur les déplacements de plus de 3 500 conducteurs américains de tous âges (Antin et al., 2019) rapporte que le facteur humain serait responsable de près de 90 % des accidents de la route constatés. Ce fort taux est en ligne avec les résultats reportés par la NHTSA (2008). En Europe, les principales instances du secteur automobile considèrent que l'aspect sécuritaire comme l'un des principaux moteurs de développement des VA. L'automatisation de la conduite devrait permettre de réduire les accidents causés par l'erreur humaine (ERTRAC, 2015 ; ETSC, 2016). En France, l'enjeu est important, car cela permettrait d'accélérer la baisse du nombre d'accidents de la route encore estimé à plus de 53 000 en 2021 d'après le bilan provisoire dressé par l'Observatoire national interministériel de la sécurité routière (ONISR, 2021).

En plus de cet aspect sécuritaire, les VA présentent d'autres intérêts pour les usagers. Par exemple, l'adoption générale des VA permettrait de fluidifier les déplacements et de réduire les émissions de gaz à effet de serre (Fagnant et Kockelman, 2015 ; Kopelias et al., 2020). Les VA permettraient également d'assurer la mobilité de tous, y compris des seniors et des personnes en situation de handicap (Harper et al., 2016).


1.2 Caractérisation d'un véhicule autonome


À l'échelle mondiale, les spécifications techniques des VA sont définies par un consortium de plus de 128 000 chercheurs, ingénieurs et parties prenantes des secteurs aérospatiale et automobile. Ces experts du domaine sont réunis au sein de l'association internationale des ingénieurs automobiles (SAE International, 2020). Cette association d'experts permet la mise au point de normes, de protocoles et de référentiels communs afin de guider et d'harmoniser le développement des systèmes d'automatisation de la conduite.

Ces systèmes sont classifiés d'après six niveaux progressifs illustrés sur la figure 1.1. Les systèmes de niveau 0 n'assurent aucune tâche de conduite (e.g., système d'avertissement). À l'opposé, les systèmes de niveau 5 se substituent entièrement au conducteur (e.g., systèmes équipant les navettes autonomes). Jusqu'au niveau 2, les ADAS permettent uniquement d'assister le conducteur dans

ses tâches. Le changement de paradigme s'opère à partir du niveau 3, le conducteur peut se désengager de la tâche de conduite, mais doit être en mesure de reprendre la main si le système le demande. Il s'agit d'une automatisation conditionnelle : le système est capable d'assurer totalement la tâche de conduite dans certaines conditions, mais lorsqu'il sort de son domaine de validité, le conducteur est la solution de repli. À partir du niveau 4 seulement, l'automatisation assume la totalité des tâches de conduite et est capable d'assurer une mise en sécurité du véhicule en cas d'événement imprévu.

	Assistance du conducteur			Automatisation de la conduite		
Niveau	0	1	2	3	4	5
Dénomination	Aucune automatisation	Assistance du conducteur	Automatisation partielle	Automatisation conditionnelle	Automatisation avancée	Automatisation complète
Capacité du système	Support ou alerte	Contrôle de direction ou de vitesse	Contrôle de direction et de vitesse	Contrôle complet dans certaines conditions	Contrôle complet et mise en sécurité si besoin	
Situation du conducteur	Le conducteur assure seul le contrôle du véhicule	Le conducteur assure le reste de la tâche de conduite, supervise le système en intervenant si nécessaire pour maintenir le fonctionnement du véhicule		Lorsque le système le demande Le conducteur reprend le contrôle du véhicule	Le conducteur n'a pas à assurer le contrôle du véhicule, ni à se tenir prêt à en reprendre le contrôle	





 Outil de transport Partenaire de transport Navette de transport

FIGURE 1.1 – Les six niveaux d'automatisation de la conduite (SAE International, 2020).

À l'heure actuelle, la plupart des véhicules commercialisés sont équipés d'ADAS de niveau 1, voire 2, capables de gérer le contrôle latéral et/ou longitudinal du véhicule. Bien que certains de ces ADAS soit très perfectionnés (e.g., système Autopilot de Tesla), ils nécessitent que le conducteur reste attentif à la conduite et reste prêt à agir sur les commandes. Au premier semestre 2021, le constructeur japonais, Honda, a été le premier au monde à avoir reçu les autorisations nécessaires pour

commercialiser un véhicule équipé d'ADAS de niveau 3. Ces systèmes baptisés *Honda Sensing Elite* et *Traffic Jam Pilot* permettent au conducteur de déléguer la totalité du contrôle de son véhicule sur voie rapide ou dans les embouteillages. En 2022, le constructeur allemand Mercedes prévoit de commercialiser un véhicule équipé d'ADAS de niveau 3 appelé *Drive Pilot*. Ce système permettra de contrôler un véhicule à des faibles vitesses, c'est-à-dire ne dépassant pas 60 km/h. Les véhicules commercialisés par Honda et Mercedes signent l'arrivée officielle des ADAS de niveau 3 pour le grand public. Il y a fort à parier que d'autres constructeurs commercialiseront à leur tour de tels véhicules. Par exemple, le groupe Renault travaille depuis 2017 sur un mode autonome de niveau 3. Il s'agit d'un système permettant au conducteur de se dégager totalement de l'activité de conduite lors des phases de conduite dites « ennuyeuses » sur voie rapide, en particulier dans les embouteillages. Le constructeur a prévu d'équiper des modèles de séries avec ce système d'ici la fin de l'année dans le cadre du projet *Drive the Future 2017-2022* (Groupe Renault, 2017).

1.3 La législation encadrant l'utilisation du véhicule autonome

Malgré les avantages apportés par l'automatisation de la conduite, les législations ne sont pas suffisamment matures pour encadrer l'usage des VA par le grand public. L'Office des Nations Unies regroupant une soixantaine de pays dont le Japon, le Canada et les membres de l'Union Européenne, a fait un premier pas en 2020 pour réglementer les systèmes d'automatisation de la conduite (ONU, 2020). Cette réglementation précise en particulier les conditions d'utilisation des systèmes de maintien de la trajectoire, le contexte d'utilisation d'écrans de divertissement et les exigences à la fois en matière de restitution de la conduite par le système au conducteur et de manœuvres d'urgence, en cas de collision imminente. En outre, cette réglementation prévoit l'obligation d'introduire des systèmes de reconnaissance de la disponibilité des conducteurs pour contrôler à la fois la présence du conducteur (sur le siège conducteur, ceinture de sécurité bouclée) et sa disponibilité à reprendre le contrôle du véhicule. Cette réglementation en vigueur depuis 2021 représente une grande avancée mondiale, qui favorise le développement des

VA par les professionnels de l'industrie automobile. Néanmoins, la responsabilité du conducteur n'y est pas discutée et aucun article ne discute les conditions établies par les conventions de Genève (1949) et Vienne (1968). D'après ces conventions, un conducteur doit être en pleine capacité mentale et physique d'assurer n'importe quelle manœuvre avec son véhicule. Il doit rester constamment maître de sa vitesse et conduire d'une manière raisonnable et prudente. À ce jour, le conducteur demeure donc le seul responsable en cas d'accident.

Ce cadre législatif restrictif ne freine cependant pas le développement des VA. Plusieurs pays ayant ratifié l'une ou l'autre des conventions (e.g., Allemagne, Pays-Bas, Belgique, Suisse, Royaume-Uni, Finlande, États-Unis, Australie et Japon) financent des plans nationaux visant à promouvoir le développement des VA et leur expérimentation auprès du public.

En France, l'expérimentation de VA a été facilitée grâce à l'ordonnance n°2016-1057 relative à l'expérimentation de véhicules à délégation de conduite sur les voies publiques. Cette ordonnance s'inscrit dans la feuille de route du plan industriel « Véhicule Autonome » (établi dans le cadre du projet « Nouvelle France Industrielle ») visant à faire de l'industrie française de l'automobile et du transport routier une des pionnières dans la conception du VA pour tous. Ainsi, la France exprime clairement son souhait de devenir un territoire d'expérimentation pour les VA et toutes les technologies embarquées. En 2020, le rapport du centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerebra, 2020) fait état de plus de 40 expérimentations de navettes ou de VA sur le territoire français. Par ailleurs, le 15 décembre 2020, une nouvelle stratégie nationale de développement de la mobilité routière automatisée a été publiée pour l'horizon 2020-2022. Elle a donné lieu à la loi d'orientation des mobilités du 24 décembre 2019 comportant plusieurs dispositions structurantes pour le développement de la mobilité automatisée et connectée ; notamment avec l'article 31 qui autorise le gouvernement à prendre par ordonnance les dispositions nécessaires au déploiement de véhicules à délégation de conduite. Cet article a permis l'ordonnance du 14 avril 2021 pour le déploiement des transports routiers automatisés. Cette ordonnance permet en particulier le déploiement de systèmes de transports jusqu'aux niveaux d'automatisation les plus élevés, sans conducteur à bord, avec supervision et fonctions d'intervention à distance, dès lors que ces systèmes sont déployés sur des

zones ou des parcours prédéfinis, sur lesquels leur sécurité a été démontrée. Le décret d'application de cette ordonnance, en date du 29 juin 2021, a permis à la France de disposer du cadre le plus avancé en Europe et au sein des pays du G7 (Italie, Royaume-Uni, États-Unis, Canada, Japon, Allemagne, France).

1.4 Le véhicule autonome en espace partagé

Pour l'heure, le cadre d'utilisation des ADAS et les projets de commercialisation auprès du grand public sont restreints à des espaces dédiés aux véhicules motorisés. La navigation parmi différents types d'usagers (e.g., cyclistes et piétons) constitue un vrai défi pour les experts du domaine. L'enjeu est de parvenir à faire circuler un véhicule dans des zones d'usagers mixtes et potentiellement très fréquentées tels que les centres-villes. Dans ces zones, les VA devront faire face et interagir avec des usagers au comportement parfois imprévisible. Les personnes à bord devront se sentir intégrées dans l'environnement, comme elles le seraient dans une voiture non-autonome. En plus des règles courantes établies par la sécurité routière, le VA devra être capable de respecter les conventions sociales et urbaines pour négocier sa trajectoire dans un environnement potentiellement encombré.

Cette thèse s'inscrit dans les travaux du projet de recherche « *Human Inspired Navigation in Crowd* (HIANIC) », initié en 2018 et financé par l'Agence Nationale de la Recherche. Ce projet fait partie de l'axe « Véhicules propres, sûrs, connectés, automatisés » du défi 6 « Mobilité et systèmes urbains durables ». Il porte sur le développement d'un système de navigation autonome (niveau 5) parmi des piétons dans un espace partagé. Le but est d'initier le développement d'un système de navigation sûr, suffisamment rapide et conforme aux normes sociales.

Le concept d'espace partagé a été développé à la fin des années 1970 aux Pays-Bas par l'ingénieur urbaniste Hans Monderman, dans le but de favoriser les déplacements et les interactions entre les piétons et les véhicules. Tels que décrits par le britannique Hamilton-Baillie (2008), expert en aménagement urbain, les espaces partagés sont des espaces urbains où toute forme de ségrégation entre les piétons et les véhicules est réduite au minimum voire supprimée (e.g., bordures, les marquages au sol, panneaux et feux de signalisation). En l'absence de signa-

lisation, la fluidité des déplacements repose davantage sur des normes culturelles et des protocoles sociaux informels. Cela force à la fois les piétons et les conducteurs à plus s'engager dans la dynamique sociale de leur environnement. En 2011, le département britannique des transports dédie un rapport complet aux espaces partagés. Ils y sont définis comme des zones conçues pour améliorer les déplacements piétons et le confort de ces derniers en réduisant la dominance des véhicules motorisés. De nos jours, plusieurs espaces partagés existent en Europe, principalement aux Pays-Bas et au Royaume-Uni, et sur d'autres continents, notamment en Australie, en Nouvelle-Zélande, et au Québec (cf. exemple figure 1.2).



FIGURE 1.2 – Deux exemples d'espaces partagés.

Note. A : Auckland, Nouvelle Zélande (Boffa Miskell, 2012). B : Brighton, Royaume-Uni (Johnson, 2015).

Toutefois, il existe encore peu de preuve dans la littérature attestant que les espaces partagés favorisent réellement les déplacements piétons. L'introduction de tels espaces s'avère délicate à la fois pour les piétons et les véhicules. D'après Hamilton-Baillie (2008), les espaces partagés nécessitent des adaptations comportementales de tous les usagers qui doivent apprendre progressivement à exploiter l'espace disponible. De plus, les espaces partagés augmentent les risques d'accident et la vulnérabilité des piétons. L'absence de signalisation force conducteurs et piétons à d'avantage surveiller leur environnement. L'étude de Kaparias et al. (2012) a révélé que les conducteurs se sentaient moins enclins à circuler dans des zones piétonnes denses, en particulier lorsqu'il y a des enfants ou des personnes âgées. Moody et Melia (2014) ont analysé les déplacements dans un espace partagé aménagé à Ashford (Grande-Bretagne). Leur étude a révélé que les piétons ont tendance à laisser la priorité aux véhicules et à revenir aux zones de déplacement qui leur étaient réservées avant la création de l'espace partagé.

L'arrivée des VA dans un tel contexte complexifie encore les interactions. Plusieurs études ont par exemple révélé que les piétons étaient plus réticents à traverser devant un VA par rapport à un véhicule avec conducteur (Jayaraman 2019 ; Nunez Velasco et al., 2019 ; Kalantari et al., 2021). Pourtant, les VA sont avant tout programmés pour préserver la sécurité de tous. La règle en vigueur est de s'arrêter dès lors qu'ils détectent un obstacle sur leur trajectoire. L'un des objectifs du projet HIANIC est de proposer un nouveau mode de navigation permettant au VA de se frayer un chemin parmi des piétons en limitant les temps d'arrêt. En matière de navigation, le principal défi à surmonter est connu sous le nom de *Freezing Robot* (Trautman et Kraus, 2010). Ce problème se traduit par l'immobilisation du véhicule lorsque ce dernier ne parvient pas à trouver une trajectoire de déplacement sans danger de collision. Un VA est fortement exposé à ce problème lors d'un déplacement en espace partagé, particulièrement lorsque la circulation est dense. En témoignent les expérimentations de navettes autonomes faisant état de déplacements saccadés ou trop lents en Suisse et en France (cf. figure 1.3).



FIGURE 1.3 – Navettes autonomes expérimentées à Sion et Paris.

A : projet suisse *SmartShuttle* piloté par CarPostal et le Mobility Lab Sion entre 2016 et 2017 (CarPostal, 2021). Bien que le bilan du projet ait été globalement positif, la présence de piétons et de cyclistes a parfois donné lieu à des déplacements saccadés. B : projet français *Navettes Autonomes* lancé à Paris par Île-de-France Mobilités (IDFM) en partenariat avec Keolis entre 2017 et 2019 (Défense-92, 2017). Le projet n'a pas été concluant, car les navettes avaient des difficultés à circuler parmi un flux important d'usagers (piétons, cyclistes, trottinettes, véhicules d'entretien).

Pour qu'un VA puisse naviguer de manière fluide en espace partagé, il faut qu'il soit capable de manifester clairement ses intentions aux usagers environnants. En l'absence de rapport social entre le conducteur et les piétons environnants (e.g., contact visuel ou simple orientation du regard), certains chercheurs du projet HIANIC ont étudié les manières dont un VA peut interagir avec les piétons. L'une des

solutions apportées a consisté à équiper le VA d'interfaces externes communément *external human-machine interface* (eHMI). Au regard de la littérature sur le sujet, ces systèmes sont inévitables et apportent un bénéfice clair pour les interactions avec les piétons. Par exemple, l'expérimentation de Faas et al. (2020) visant à tester différentes eHMI a révélé que la diffusion d'informations sur l'intention du véhicule améliorerait l'interaction entre les VA et les piétons. L'expérimentation de Métayer et Coeugnet (2021) a confirmé l'importance de telles interfaces en révélant que les eHMI facilitent la circulation des piétons. Ces derniers ont plus tendance à traverser devant un VA lorsque ce dernier est équipé d'eHMI.

En ce qui concerne la perception des passagers du VA, la communication à l'intérieur du véhicule représente un aspect qu'il est indispensable de développer. Cela a notamment été révélé par les interviews menés par Kyriakidis et al. (2019) auprès de 12 chercheurs experts dans le domaine des facteurs humains de la conduite automatisée. Ce type de communication, souvent appelé *internal human-machine interface* (iHMI), est nécessaire au sentiment de sécurité des passagers de véhicules autonome (Bengler et al., 2019). Néanmoins, même lorsque le passager VA bénéficie d'iHMI, il se peut qu'il juge que le comportement du VA est inadapté. L'étude des facteurs qui influencent le ressenti d'un passager de VA est donc nécessaire pour développer un comportement de navigation en adéquation avec les attentes de ce dernier et avec sa perception du risque. Cette étude apparaît cruciale et pourrait favoriser l'adoption des VA par le grand public et leur acceptation dans des espaces partagés avec des piétons.

L'INDIVIDU FACE AU RISQUE

Ce chapitre constitue un état de l'art sur la notion du risque et sa prise en compte en conduite automobile. Afin d'être en mesure de bien positionner le risque étudié dans les travaux empiriques par rapport à d'autres études, une caractérisation générale du risque est donnée dans la section 2.1. Ensuite, le concept de perception du risque est défini dans la section 2.2. Cela permet d'introduire les principales méthodologies de mesure du risque employées dans la littérature. La section 2.3 présente différents indicateurs permettant de comprendre comment un conducteur perçoit le risque dans un environnement dynamique. La section 2.4 présente différents modèles expliquant comment un conducteur adapte le comportement de son véhicule en fonction de sa perception du risque. Ces approches sont présentées en vue d'établir des éléments de compréhension quant aux facteurs pouvant influencer la perception du risque d'un passager à bord d'un véhicule autonome (VA). Enfin, la section 2.5 permet d'aborder différents concepts associés au risque et discutés dans la littérature comme les émotions, le stress et la confiance.

2.1 Caractérisation du risque

2.1.1 Le construit théorique du risque d'après Yates et Stone (1992)

Yates et Stone (1992) ont mené une méta-étude sur le risque en analysant plusieurs articles dans des domaines variés. À partir de cette revue de littérature sur le risque, ils ont identifié un construit du risque commun à toutes les nomenclatures. Cela leur a permis de définir (et classer) tout risque selon trois composantes : les pertes, l'importance de ces pertes et leur incertitude. Dans le cadre de ce projet, ce construit du risque a été employé pour qualifier le risque étudié et ainsi faciliter la compréhension et la réutilisation des résultats dans des analyses ultérieures. Les

trois catégories permettant de définir un risque sont détaillées dans les sections qui suivent en s'appuyant sur les conclusions de Yates et Stone (1992). De plus, un schéma de représentation d'une alternative, dite *situation à risque*, est représentée sur la figure 2.2.

Les pertes associées au risque

La définition d'un risque doit toujours être associée à une perte vis à vis d'une référence. Une référence est subjective et permet de définir l'amplitude d'une perte. D'après Yates et Stone (1992), il existe deux catégories de références. Les références, dites *status quo*, sont fixées à partir de ce que l'individu possède déjà (e.g., un dommage matériel ou physique). Les références, dites non *status quo*, sont fixées pour d'autres raisons psychologiques. Parmi ces raisons, Yates et Stone (1992) distinguent six grandes catégories illustrées sur la figure 2.1 et détaillées ci-après.

- Les références personnelles. Elles sont liées au vécu de l'individu qui espère obtenir un résultat similaire à ce qu'il a connu auparavant.
- Les références situationnelles. Elles sont comparables aux références personnelles à l'exception qu'elles sont liées à l'attente qu'un individu peut avoir dans une situation qu'il n'a jamais vécue. Ces références sont établies sur la base des connaissances qu'un individu possède d'une situation donnée.
- Les références sociales. Elles correspondent à ce que l'individu sait ce que l'on attend de lui, en particulier ce que l'entourage proche de l'individu espère.
- Les références cibles. Elles sont liées à l'objectif visé par individu. Ce type de références peut correspondre à un objectif personnel (e.g., lorsqu'un individu s'entraîne pour atteindre un certain niveau de performance sportive) ou un objectif extérieur (e.g., objectif de résultat professionnel fixé par la hiérarchie de l'individu).
- Les références maximums. Elles correspondent aux meilleurs résultats qu'un individu pourrait obtenir dans une situation donnée (e.g., une note de 20/20 là un examen)
- Les références par comparaison. Elles sont liées à une alternative. Lorsqu'un individu doit choisir entre plusieurs options, disons deux options notées A et

B, il se fixe en référence pour une option B ce qu'il pense obtenir s'il choisissait l'option A.

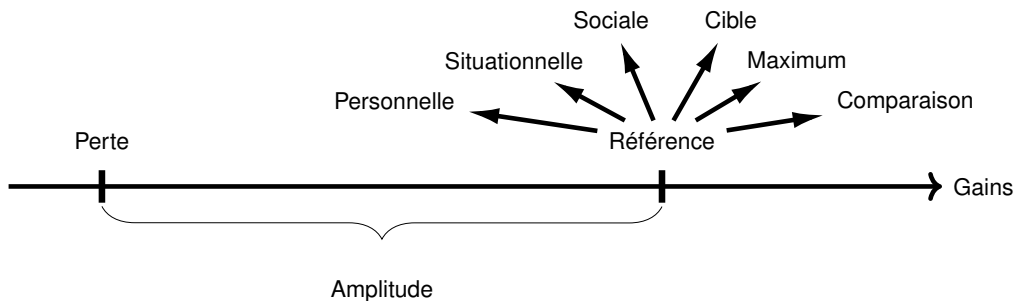


FIGURE 2.1 – Amplitude d'une perte d'après Yates et Stone (1992)

Note. Ce schéma illustre l'amplitude d'une perte qui est évaluée par un individu en fonction d'une référence subjective établie en fonction d'une des six catégories mentionnées par Yates et Stone (1992).

La multiplicité des pertes D'après Yates et Stone (1992), la plupart des *situations à risque* impliquent des options qui, si elles sont sélectionnées, produiront non pas un seul résultat qui compte pour l'individu, mais une multitude de résultats. Yates et Stone (1992) évoquent à ce sujet le concept de multiplicité des pertes. Une « situation à risque » n'est donc pas liée à une seule perte mais à une multitude. Ce constat est important car il révèle que l'évaluation du risque ressenti par des individus confrontés à une même situation peut en fait être fondée sur des analyses personnelles différentes. Le nombre et la nature des pertes peuvent différer. Il est donc très difficile d'établir des résultats à partir de comparaisons inter-individuelles.

La signifiante des pertes

Il s'agit de l'importance qu'accorde l'individu au gain ou à la perte. D'après Yates et Stone (1992), plus l'individu accorde de l'importance à une perte, plus son risque ressenti sera grand. Ce concept est représenté sur la figure 2.2 par l'épaisseur des flèches issue de l'option 1 vers les pertes. Le concept de signifiante d'une perte dépasse le simple fait d'évaluer son écart avec une référence donnée. Cela implique aussi de confronter la nature même de la perte aux valeurs d'un individu, dépendantes notamment de sa situation économique et sociale, de ses attentes et de

son expérience ; par exemple, lorsqu'un conducteur circule dans un espace dense et doit frôler d'autres véhicules en risquant d'abîmer le sien. Certains conducteurs pourraient juger que cette perte n'a pas d'importance, par exemple s'ils n'accordent pas une grande valeur à leur véhicule. Alors que d'autres conducteurs pourraient juger que ce serait très important, par exemple s'ils utilisent un véhicule de prêt soumis à une caution importante. Même dans ce cas simple, la référence de l'individu dépendra de plusieurs facteurs dont la majorité dans l'exemple mentionné sera liée au rapport qu'entretient l'individu avec son véhicule.

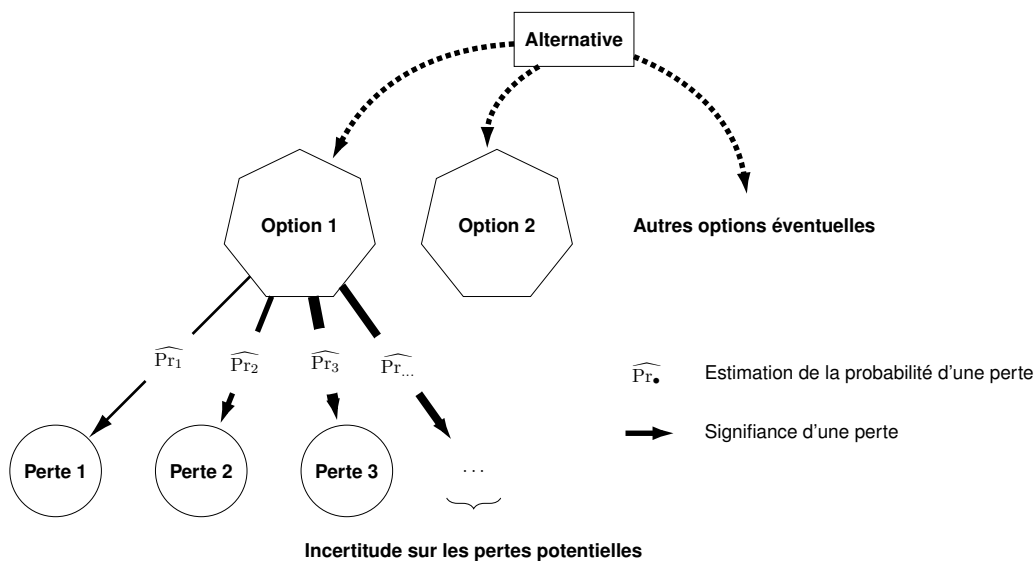


FIGURE 2.2 – Situation à risque d'après Yates et Stone (1992)

Note. Ce schéma met en évidence la complexité d'analyse du risque ressenti par un individu confronté à une alternative. Les trois principaux aspects du construit du risque d'après Yates et Stone (1992) y sont représentés : les pertes, l'importance des pertes et l'incertitude de ces pertes. Chaque option d'une alternative donne lieu à de multiples pertes potentielles. Une perte est définie d'après son écart à une référence subjective et l'importance que l'individu lui accorde. L'incertitude peut porter soit sur l'existence d'une perte soit sur sa probabilité d'occurrence.

L'incertitude accordée aux pertes

D'après Yates et Stone (1992), la prise en compte de l'incertitude dans le risque d'une alternative est prise en compte à différents niveaux dans la littérature.

Tout d'abord, l'incertitude d'une perte, à savoir sa probabilité d'occurrence, peut être vue comme un risque en soi. Ce niveau d'incertitude est représenté sur la figure 2.2 par la notation mathématique usuelle « Pr », signe de probabilité. C'est

à cette forme de risque que se réfèrent beaucoup d'analyses du comportement et notamment la théorie des perspectives de Kahneman et Tversky (1979). Le simple fait que la probabilité d'une perte soit non nulle peut constituer le risque d'une situation. Yates et Stone (1992) partent du principe que, plus la probabilité qu'une perte se produise est grande, plus le risque est grand.

Ensuite, l'incertitude peut porter sur les pertes possibles. Dans la plupart des cas, l'individu est incapable d'anticiper toutes les conséquences de son choix. Le caractère risqué d'une alternative augmente avec l'incertitude sur les pertes possibles. Ce niveau d'incertitude est représenté par le symbole « . . . » sur la figure 2.2 indiquant que l'individu ne connaît potentiellement pas toutes les pertes possibles associées à l'option 1.

Enfin, l'incertitude sur l'estimation de la probabilité d'une perte pourrait aussi influencer le risque ressenti par un individu. Les estimations sur les probabilités de perte sont représentées sur la figure 2.2. Cette notation permet de souligner le fait que l'individu connaît rarement la vraie probabilité d'une perte $P_{r\bullet}$. Il effectue plutôt une estimation de cette dernière par $\widehat{P}_{r\bullet}$. Selon Yates et Stone (1992), un individu aurait tendance à préférer une situation où il est capable d'évaluer la probabilité d'une perte avec précision (ou objectivité) plutôt qu'une situation où il manque de connaissances pour évaluer la probabilité d'une perte. Toutefois, Yates et Stone (1992) précisent qu'il s'agit d'une hypothèse controversée dans la littérature bien qu'il soit reconnu que dans de nombreux domaines professionnels, notamment ceux en lien avec le risque financier (e.g., trading, actuariat), l'incertitude sur la probabilité d'une perte est à éviter. À défaut d'être capable de calculer la probabilité objective d'une perte, les preneurs de décision préfèrent toujours minimiser leur incertitude.

2.1.2 L'évaluation objective du risque

Le construit du risque de Yates et Stone (1992) permet de souligner le fait que le risque évalué par un individu couvre potentiellement une multitude de pertes et que ces pertes ne sont pas toujours les mêmes entre les individus. En suivant ce construit, il est possible de définir une expression mathématique du risque associé

à une perte comme suit :

$$\text{Risque(perte)} = \text{Pr(Perte)} \otimes \text{Sign(Perte)}, \quad (2.1)$$

en notant :

- Pr(Perte) , l'incertitude de la perte en terme de probabilité ;
- Sign(Perte) , la signifiante que l'individu accorde à la perte ;
- \otimes , un opérateur permettant de multiplier les deux grandeurs étudiées.

Dans le domaine de la conduite automobile, le risque est fréquemment associé à la notion d'accident. En se référant au construit de Yates et Stone (1992), deux catégories de perte peuvent être anticipés par un conducteur lors d'un accident : les pertes matérielles liées aux dommages du véhicule et les pertes physiques liées aux blessure du conducteur et des éventuels passagers. Dans les deux cas, les références associées à ces pertes seraient plutôt *status quo*, c'est à dire basées sur l'état du véhicule, du conducteur et des éventuels passagers avant l'accident.

La norme ISO 26262-1 (2018) sur la sécurité fonctionnelle des véhicules routiers, définit le risque comme le produit entre la probabilité d'occurrence d'un accident et sa sévérité.

Le risque ainsi étudié relève des pertes matérielles dont la probabilité et la sévérité sont estimées à partir des caractéristiques du véhicule et de sa dynamique. Cette définition est très similaire à l'équation 2.1 si l'on considère l'accident comme une perte et la sévérité comme une mesure de sa signifiante. Cette définition du risque est très populaire dans la littérature. Elle est utilisée notamment pour le développement de modèles de navigation autonome (e.g., Damerow et Eggert, 2015; Wang et al. 2015, 2016; Hruschka et al. 2019, Zhang et al., 2020; Zhao et al., 2020).

Cette définition du risque n'est pas transposable au raisonnement de l'individu. D'après Tversky et Kahneman (1974), l'individu prendrait souvent des décisions en s'appuyant sur des heuristiques plutôt que sur une évaluation objective. Ces heuristiques sont spécifiques à l'intelligence humaine et sont en quelque sorte des stratégies cognitives permettant d'économiser des ressources (temps, énergie mentale) par rapport à des processus algorithmiques. Les heuristiques ont l'avantage de permettre à l'individu de prendre des décisions rapides. Elles sont à la fois néces-

saires et dangereuses, car elles peuvent mener à des décisions biaisées (Martinez, 2010).

2.1.3 L'importance de l'évaluation du risque dans la prise de décision

Sitkin and Pablo (1992) ont suggéré que le risque était une caractéristique des décisions se définissant comme « la mesure dans laquelle il existe une incertitude quant à la réalisation de conséquences significatives et/ou décevantes ». Cette définition s'inscrit très bien dans le construit du risque défini par Yates et Stone (1992). En particulier, Sitkin et Pablo définissent trois dimensions du risque.

- L'incertitude qualifie le fait qu'un individu ne connaît pas toutes les conséquences d'une décision, d'un choix. Cette dimension est similaire au concept de multiplicité des pertes.
- Les attentes justifient qu'une option comporte un risque pour un décideur. Ce dernier peut perdre ou ne pas obtenir ce qu'il souhaiterait. Cette dimension se rapproche de l'idée que toute perte est identifiée par une référence.
- Le potentiel d'un choix s'évalue en fonction de l'ampleur de ses conséquences possibles qui doit être perçue comme suffisamment importante pour que le décideur s'intéresse à la menace ou à l'opportunité potentielle inhérente à la situation. Cette dimension s'apparente à la notion de signifiante d'une perte.

D'après cette définition du risque, Sitkin et Pablo (1992) caractérisent le *comportement à risque* par le degré de risque associé aux décisions prises. Conformément aux trois dimensions du risque, ils définissent que des décisions peuvent être plus risquées dans la mesure où (a) leurs résultats attendus sont plus incertains ; (b) les objectifs de la décision sont plus difficiles à atteindre ; ou (c) l'ensemble des résultats potentiels comprend certains extrêmes.

Yates et Stone (1992) ont suggéré que la prise d'une décision risquée signifie que l'individu perçoit d'autres avantages subjectifs, en dehors des pertes apparentes et potentielles d'un choix. Charron (2016) considère que les comportements à risque sont assimilés à la transgression d'une ou des normes sociales ou professionnelles. Cette vision lui permet d'enrichir le concept de risque défini par Yates et Stone (1992) avec la notion d'enjeux. Pour Charron (2016), les enjeux qualifiés de ressentis cognitivo-émotionnels seraient à la base du comportement de l'individu

lors de la prise de décision. D'un côté, la composante cognitive permettrait d'apprécier les possibilités de pertes, de gains et l'estimation des incertitudes associées. D'un autre côté, la composante affective serait la source donnant de l'importance à ces pertes et gains potentiels et interviendrait pour majorer ou minorer les incertitudes perçues. Charron (2016) définit trois types d'enjeux.

- Les enjeux normatifs, lorsqu'un individu viole une règle sociale et s'expose à une perte, à l'inverse, en s'y conformant, il peut gagner en estime vis-à-vis des personnes qui respectent cette norme ;
- Les enjeux de sécurité, lorsqu'un individu s'expose à des gains ou des pertes d'ordre physiques ou biologiques ;
- Les enjeux temporels, lorsqu'un individu respecte ou non une échéance fixée.

Ces trois types d'enjeux peuvent interférer dans les décisions d'un conducteur lorsqu'il navigue parmi d'autres usagers. Les enjeux normatifs correspondraient à l'ensemble des normes sociales en vigueur dans l'environnement de l'individu. Les enjeux de sécurité seraient liés au risque de collision. Enfin, les enjeux temporels pourraient intervenir si le conducteur doit respecter une heure d'arrivée à destination.

Les comportements à risque peuvent aussi s'expliquer par la valeur subjective qu'un individu attribue aux pertes et aux gains potentiels liés à une décision. Kahneman et Tversky (1979) ont développé la théorie des perspectives pour expliquer certains comportements à risque. Cette théorie repose sur une stratégie de prise de décision issue de deux processus successifs. Le processus d'édition, où l'individu évalue les options, organise, trie et reformule le problème qui est donc transformé en une représentation subjective. Le processus d'évaluation, où l'individu traite les options et choisit celle qui maximise son utilité. Ce processus suppose que l'individu reformule les alternatives en terme de perte ou de gain subjectifs. Kahneman et Tversky (1979) suggèrent qu'un individu ne ressent pas des sentiments opposés (ou symétriques) selon qu'il perde ou qu'il gagne. En fonction de la situation, un individu peut présenter soit une aversion pour le risque soit un comportement de prise de risque. Pour justifier cette théorie, Kahneman et Tversky (1979, problèmes 11 et 12) révèlent les résultats suivants :

- Avec une dotation initiale de 1 000\$, 84% des participants préfèrent un gain

certain de 500\$ à un pari offrant 50% de chances de gagner 1 000\$ (choix indiquant une aversion pour le risque) ;

- Avec une dotation initiale de 2 000\$, 69% des participants préfèrent un pari offrant 50% de chances de perdre 1 000\$ à une perte certaine de 500\$ (choix indiquant un comportement de prise de risque).

Les exemples proposés par Kahneman et Tversky (1979) et leurs résultats sont venus contredire la théorie de l'utilité espérée (approche normative) qui était à l'époque très utilisée pour justifier la prise de décision. Cette théorie partait du principe que le processus de décision était basé sur un raisonnement rationnel de l'individu qui cherchait naturellement à maximiser son utilité en évaluant les conséquences de chaque option qui lui était présentée. Dans l'exemple donné ci-dessus, l'utilité de chacun des jeux était la même que celle des options certaines proposées aux participants. Il n'y avait donc a priori aucune raison que les participants préfèrent une option plutôt que l'autre. Ce principe d'attrait ou d'aversion pour le risque a été utilisé dans les travaux de Wang et Zhao (2019) dont le but était de mettre en relation les préférences individuelles pour le risque (à partir de caractéristiques psychométriques et économiques) avec le choix d'utiliser un VA pour les déplacements.

Kahneman et Tversky (1992, problèmes 13 et 13') ont suggéré également que les individus présentaient une courbe de préférence en forme de S. Un exemple est donné sur la figure 2.3. Sur cet exemple, l'échelle de valeur subjective (axe des ordonnées) et l'échelle permettant de quantifier les pertes ou les gains (axe des abscisses) sont arbitraires. Elles permettent de mieux discerner la forme caractéristique de la courbe représentée en vert. Cette courbe de préférence a pour origine la référence de l'individu. Elle est convexe dans le sens des pertes et concave dans le sens des gains. De plus, la pente de cette courbe est plus prononcée dans le sens des pertes que dans le sens des gains. Cette forme de courbe traduit le fait que les individus accordent plus d'importance aux pertes qu'aux gains. D'après ce concept, lorsqu'un individu navigue parmi d'autres usagers, le risque de collision serait associé à une importance subjective plus importante que la poursuite de la progression.

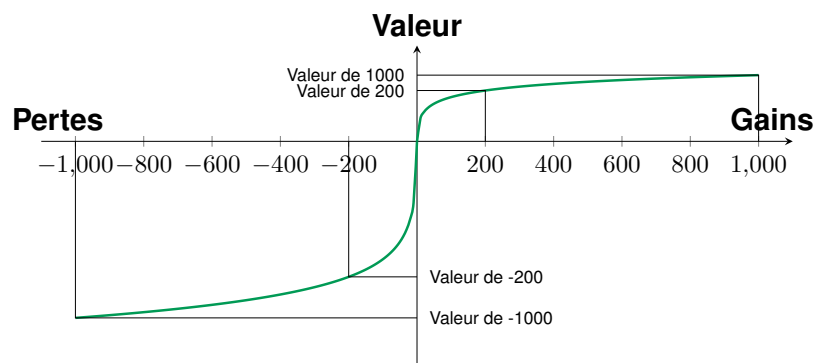


FIGURE 2.3 – Valeur subjective attribuée au risque et aux pertes

Note. Les phénomènes d'aversion pour le risque dans le sens des gains et d'attrait pour le risque dans le sens de perte sont modulés par le fait que l'individu accorde plus de valeur subjective aux pertes qu'aux gains (Kahneman et Tversky, 1999 ; Martinez, 2010).

Synthèse et transition

Le risque émerge d'une situation où un individu est confronté à une alternative comportant plusieurs choix possibles, le tout empreint d'incertitudes. Les caractérisations du risque données d'une part par Yates et Stone (1992) et d'autre part par Sitkin et Pablo (1992) sont très proches. Elles mettent en évidence trois dimensions importantes qu'un individu doit appréhender face à un choix pouvant mener à des conséquences décevantes :

- l'incertitude sur les conséquences possibles ;
- l'incertitude sur le niveau de déception des conséquences ;
- l'importance accordée à chacune des conséquences.

À partir de ces trois dimensions, il est possible de dégager une mesure du risque relative à une conséquence en particulier. Cette mesure est en général définie comme le produit entre la probabilité d'occurrence de la conséquence et l'importance de cette conséquence, souvent assimilée au niveau de déception ou de gravité encourue. Dans ce cadre, l'individu confronté à un choix doit prendre un risque potentiellement mesurable et perceptible. Cette prise de risque relève de la capacité de l'individu à anticiper les conséquences de son choix. Toutefois, les travaux de Kahneman et Tversky (1992) ont montré que la prise de décision n'est parfois pas rationnelle. C'est-à-dire qu'elle ne repose pas toujours sur l'estimation de la mesure du risque objective. Dans certains cas et en fonction de l'enjeu de la prise de décision, l'individu peut présenter une aversion au risque et dans d'autres

cas, il peut présenter un attrait pour le risque. Cela suggère que la perception du risque est un processus subjectif relatif à un individu. Ce concept fait donc l'objet de la section suivante.

2.2 La perception du risque

2.2.1 Risque : sensation ou analyse

L'étude de la perception du risque s'inscrit dans une problématique plus large faisant la distinction entre deux types de perception (Evans, 2008 ; Stanovich et Toplak, 2012 ; Evans et Stanovich, 2013). Un extrait des caractéristiques de ces deux types de processus est donné dans la table 2.1. Evans et Stanovich (2013) ont différencié les caractéristiques de référence des correspondances classiques. Les caractéristiques de référence sont les conditions nécessaires et suffisantes d'appartenance à un type. Les correspondances classiques sont les notions couramment évoquées dans la littérature et attribuées à chaque type. Les processus de type 1 sont définis comme autonomes et ne faisant pas appel à la mémoire de travail. Les processus de type 2 sont définis comme nécessitant la mémoire de travail et un découplage cognitif permettant à l'individu de réaliser des simulations mentales pour prédire les conséquences d'un choix ou d'une action (Stanovich et Toplak, 2012).

Cette théorie impliquant deux types de perception s'applique très bien aux travaux de Paul Slovic sur l'importance des affects dans la prise de décision et la perception du risque. Slovic et al. (2004) ont suggéré que la perception du risque d'un individu était opérée en deux modes de fonctionnement.

- Mode 1, nommé *risk as feelings* : rapide et instinctif.
- Mode 2, nommé *risk as analysis* : lent et basé sur un raisonnement logique.

Le mode 1 est nommé *heuristique des affects*. Il serait basé sur un système de pensée expérientiel et permettrait à l'individu de poser un jugement rapide sur une situation donnée (Slovic et al., 2004 et 2007). Le mode 2 serait quant à lui basé sur une évaluation conscientisée d'une situation. Cette appréciation interviendrait en second temps et permettrait à l'individu d'aboutir à des décisions rationnelles, c'est à dire basées sur une analyse de faits et de résultats concrets. D'après Slovic

TABLE 2.1 – Caractéristiques des processus de type 1 et 2 (Evans et Stanovich, 2013).

Processus de type 1	Processus de type 2
Caractéristiques de référence	
Ne nécessite pas de mémoire de travail	Nécessite la mémoire de travail
Autonome	Découplage cognitif ; simulation mentale
Correspondances classiques	
Rapide	Lent
Non conscient	Conscient
Spontané	Contrôlé
Prise de décision fondée sur l'expérience	Prise de décision basée sur les conséquences
Indépendant des capacités cognitives	Corrélé avec les capacités cognitives

et al. (2004), les processus de type 1 seraient prédominants chez l'être humain. La figure 2.4 illustre la mesure dans laquelle des jugements spontanés peuvent émerger dans les situations de vie quotidiennes en ironisant le raisonnement complexe qu'un individu devrait mener pour aboutir à un jugement rationnel.

Dans le domaine de la conduite automobile et en particulier de la conduite autonome, les méthodes employées pour étudier la perception du risque d'un passager peuvent être classées selon les deux types de processus définis par Evans et Stanovich (2013).

Il y a d'une part les méthodes basées sur des mesures physiologiques. Ces mesures révéleraient plutôt les processus de type 1 car les réactions physiologiques sont autonomes et peuvent apparaître de manière spontanée, c'est-à-dire sans faire appel à un traitement cognitif de la part de l'individu. Ces processus pourraient aussi correspondre à ce que Slovic et al. (2004) nomment « risk as feelings » car les variations physiologiques induites par la perception de risque ont pour objectif de préparer rapidement un individu à une réaction de fuite ou de lutte.

Il y a d'autre part les méthodes basées sur une évaluation subjective du risque de la part des participants. Ces méthodes révéleraient quant à elles les processus de perception du risque de type 2. Ces processus, impliqués par une évalua-



FIGURE 2.4 – « Street Calcul » (extrait de Slovic et al., 2004 ; ©Garry Trudeau).

tion subjective, sont nécessairement issus d'un traitement cognitif conscientisé. De plus, si l'individu évalue un risque important, cela signifie qu'il anticipe des conséquences indésirables (e.g., une trajectoire trop proche d'un obstacle ou un accident). L'évaluation subjective du risque correspondrait à ce que Slovic et al. (2004) nomment « risk as analysis » car elle suggère que l'individu a effectué une analyse rationnelle de la situation.

2.2.2 Les réactions physiologiques à la perception du risque

La perception du risque peut provoquer chez l'individu une réaction de fuite ou de lutte. Afin de préparer l'organisme à de telles réactions, il est possible d'étudier certaines adaptations physiologiques impulsées par le système nerveux autonome (SNA). Le SNA s'oppose au système nerveux somatique qui est associé au contrôle volontaire des mouvements du corps. À ce titre, le SNA est quant à lui en charge de la régulation de certaines fonctions automatiques de l'organisme,

comme la digestion, la respiration, le comportement oculaire ou encore l'activité de certaines glandes comme les glandes sudoripares. Le SNA se décompose en trois parties représentées sur la figure 2.5.

- Le système nerveux sympathique (ou orthosympathique) gère l'activité des organes viscéraux et les fonctions automatiques de l'organisme, comme la respiration ou le rythme cardiaque. Il intervient également dans plusieurs activités physiologiques inconscientes à travers deux neuromédiateurs : l'adrénaline, et la noradrénaline.
- Le système nerveux parasympathique est également responsable des fonctions automatiques de l'organisme. Il est associé à l'acétylcholine qui est un neurotransmetteur impliqué dans les capacités de mémoire et d'apprentissage.
- Le système nerveux entérique qui régule le système digestif, ainsi que les activités motrice et sécrétrices.

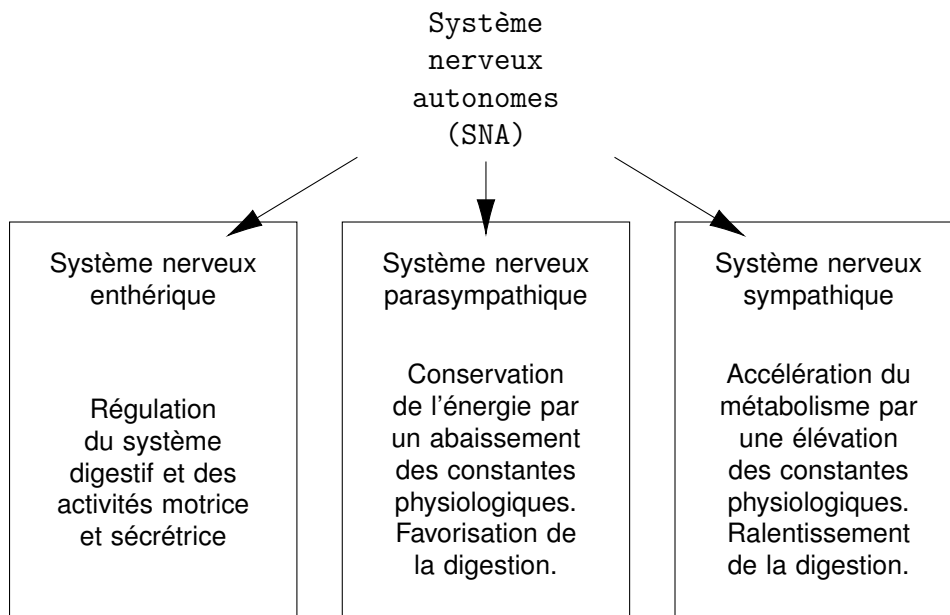


FIGURE 2.5 – Composition du SNA.

Le rôle du système nerveux parasympathique est multiple. Il ralentit les fonctions de l'organisme dans un objectif de conservation de l'énergie : il abaisse le rythme cardiaque et la tension artérielle par vasodilatation ou entraîne une bronchoconstriction. En revanche, il facilite la digestion en augmentant les sécrétions

salivaires, gastriques et intestinales. Le système nerveux sympathique joue globalement un rôle antagoniste à celui proposé par le système nerveux parasympathique. Il accélère le métabolisme et s'active par exemple en cas de danger ou de peur, pour préparer l'individu à la fuite. Lorsqu'il est stimulé, il influe sur le système cardiovasculaire : il augmente la fréquence cardiaque et induit une vasoconstriction périphérique, entraînant alors une augmentation de la pression artérielle. Au niveau digestif, il ralentit les contractions musculaires des intestins, mais favorise la libération de glucose par le foie. Il a également un effet bronchodilatateur, c'est-à-dire qu'il provoque l'augmentation du diamètre des bronches.

Les variations de certaines mesures physiologiques induites par l'activation du système nerveux parasympathique peuvent servir d'indicateur de la perception du risque chez l'individu. Ces variations peuvent être associées à une perception du risque implicite dans la mesure où elles seraient autonomes et ne relèveraient pas d'intentions volontaires ou conscientes de l'individu. Parmi les mesures employées figurent le comportement oculaire (Beggiato et al., 2018, 2019), la fréquence cardiaque (Beggiato et al., 2018, 2019 ; Perello-March et al., 2022) et l'activité électrodermale (AED) (Beggiato et al., 2018, 2019 ; Distefano et al., 2020 ; Daviaux et al., 2020 ; Perello-March et al., 2022). À noter cependant que dans les travaux de Beggiato et al. (2018, 2019), ce n'est pas la perception du risque, mais le niveau d'inconfort qui est évalué. La notion d'inconfort est détaillée dans la section 2.5. Elle révèle le fait qu'un individu est exposé à un stimulus désagréable. En se référant au construit de Yates et Stone (1992), elle peut être rattachée à la perception du risque si l'on considère qu'il s'agit d'une conséquence indésirable pour le passager d'un VA lorsque ce dernier opère un choix de navigation (ajustement de la vitesse ou de la trajectoire).

L'usage de l'AED est très répandu dans la littérature. D'après Perello-March et al. (2022) l'AED serait propice à l'étude de la perception du risque dans des situations évoluant rapidement. D'après Poh et al. (2010), l'AED est pertinente pour l'étude des états émotionnels et cognitifs, car elle n'est pas influencée par le système nerveux parasympathique. Elle présente donc l'avantage d'être plus facilement interprétable que d'autres variables physiologiques tels que le rythme cardiaque, la ventilation ou la température du corps (Braithwaite et al., 2013 ; Distefano et al., 2020). L'AED désigne la variation des propriétés électriques de la peau en

réponse à la sécrétion de la sueur par les glandes sudoripares, sous le contrôle du système nerveux sympathique (Morange-Majoux, 2017). Il s'agit en particulier des glandes sudoripares eccrines qui sont principalement situées dans l'épaisseur du derme des sites palmaires et plantaires. Elles sont sous le contrôle du SNA qui leur transmet les ordres de stimulation du système nerveux central. La méthode la plus répandue pour l'étude de l'AED est la mesure de conductance électrique à la surface de la peau. Elle se mesure en micro-siemens et consiste en la superposition de deux parties distinctes appelées respectivement tonique et phasique.

L'activité tonique (lente) fluctue spontanément, c'est-à-dire en l'absence de la présentation d'un stimulus. Ce niveau de conductance de base est compris entre 2 et 20 μ S selon les individus et peut être enregistrée lorsque l'individu est au repos (Droulers et al., 2013).

L'activité phasique se distingue de l'activité tonique par des variations rapides en réponse à des stimuli et par une amplitude beaucoup plus faible souvent inférieure à 1 μ S. Ces fluctuations sont souvent appelées par leur acronyme anglais *skin conductance responses* (SCRs). Seule l'activité phasique est l'indicateur du niveau d'activation d'un épisode émotionnel suscité par la présentation d'un stimulus. D'après Bousein (2012), trois sous-structures du système nerveux central seraient à l'origine des SCRs : les structures limbiques (hypothalamus, gyrus cingulaire, hippocampe) impliquées dans les réactions émotionnelles et la thermorégulation, le cortex moteur et les ganglions de la base impliqués dans la locomotion et enfin la formation réticulée impliquée dans le contrôle du niveau d'éveil. Aujourd'hui, un consensus existe entre les chercheurs pour reconnaître que les variations phasiques de l'AED, les SCRs, sont des marqueurs d'événements pertinents concernant le domaine des émotions et de l'attention (Sequeira et D'Hondt, 2013).

2.2.3 L'évaluation subjective de la perception du risque

De manière générale, une évaluation subjective consiste à demander à un individu d'évaluer sa perception ou son ressenti vis à vis d'une situation donnée. Il s'agit d'une évaluation explicite dans la mesure où elle relève d'une expression formalisée de la part de l'individu. Cette évaluation repose sur la capacité d'analyse réflexive d'un individu.

Une manière traditionnelle et relativement simple à mettre en œuvre dans les

expérimentations sur la perception du risque consiste à poser la question ou à soumettre un questionnaire à un participant en cours ou à la fin d'une expérimentation. Cette méthode a été employée par exemple dans les travaux de Gandrez et al. (2020) ou Herrero-Fernández et al. (2020) où il était demandé aux participants d'évaluer leur perception du risque sur une échelle graduée (type échelle de Likert). Une analyse par questionnaire a également été réalisée par Pascale et al. (2021) en vue de déterminer la perception du risque de participants vis-à-vis de certaines manœuvres d'un VA (accélération, arrêt, freinage, etc.). Cette méthodologie présente l'inconvénient évident de devoir interrompre l'action pour laisser le temps au participant de répondre. Pour pallier ce problème, d'autres méthodes ont été employées pour que les participants puissent évaluer leur ressenti en temps réel. En conduite autonome, ces méthodes ont essentiellement été utilisées comme mesure d'inconfort d'un passager de VA dans certaines situations. Par exemple, Telpaz et al. (2018) ont utilisé une télécommande avec un bouton rotatif pour permettre à des passagers d'évaluer leur niveau de confort vis à vis du comportement d'un VA en terme d'accélération, de vitesse et de distance de sécurité (cf. figure 2.6.A). Dans l'expérimentation de Radhakrishnan et al. (2020), les participants avaient à disposition une manette de console Xbox et devaient appuyer sur un bouton pour évaluer le style de conduite d'un VA en environnement rural ou urbain. Dans les travaux de Hartwitch et al. (2018) ainsi que ceux de Rossner et al. (2019, 2020), les participants avaient à disposition une télécommande avec bouton-poussoir pour évaluer leur niveau d'inconfort face à différents styles de conduite (cf. figure 2.6.B). De tels dispositifs sont de plus en plus utilisés dans les expériences visant à étudier la perception subjective. Ils présentent l'avantage d'être légers et facilement manipulables par des participants. En outre, l'usage de tels appareils a été plébiscité par Walker et al. (2019). Pour évaluer l'intention de traverser d'un piéton devant un véhicule autonome, ces derniers ont mis à disposition de leurs participants un boîtier avec un bouton glissière (cf. figure 2.6.C).

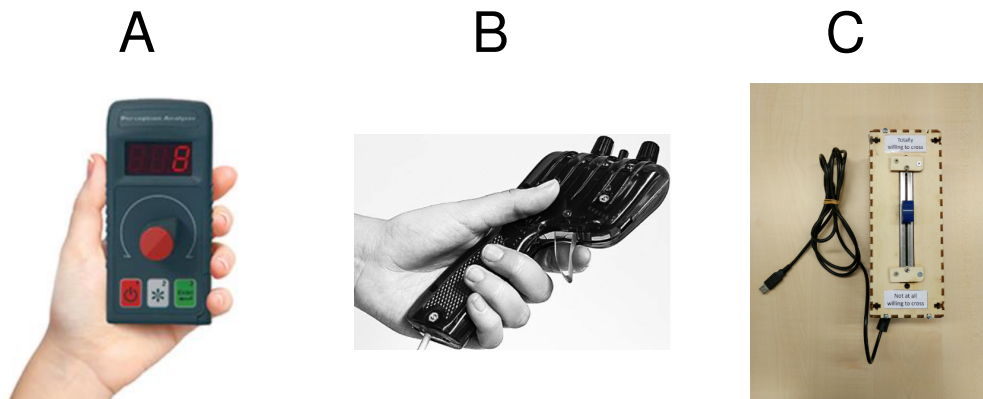


FIGURE 2.6 – Exemple de dispositifs permettant l'évaluation de la perception du risque en temps réel.

2.3 Perception du mouvement et risque

2.3.1 La perception du temps avant collision

La perception subjective du risque repose principalement sur la perception spatiale d'un individu. Il s'agit de sa capacité à être conscient de sa relation avec ce qui l'entoure (processus extéroceptifs) et lui-même (processus intéroceptifs). En d'autres termes, les processus extéroceptifs permettent à l'individu de construire des représentations de son espace à travers ses sens, les processus intéroceptifs lui permettent de construire des représentations de son corps, comme sa position ou son orientation.

La perception spatiale consiste également à comprendre la relation des objets quand il y a un changement de position dans l'espace. En particulier, le système visuel permet à l'individu de capter la dynamique d'approche ou d'éloignement par le biais d'une évolution de l'angle optique sous-tendu par un obstacle. Dans le cadre de la navigation parmi des piétons, l'angle d'observation d'un piéton du point de vue d'un conducteur est noté ϕ_t . Cet angle est schématisé sur la figure 2.7.

En considérant que l'angle ϕ_t est petit, par exemple dans le cas où la distance Z_t est très supérieure à longueur R entre deux points arbitrairement pris sur le piéton, Lee (1976) a proposé l'approximation suivante :

$$\phi_t = \tan \phi_t = \frac{R}{Z_t} \iff \frac{Z_t}{R} = \frac{1}{\phi_t}, \quad (2.2)$$

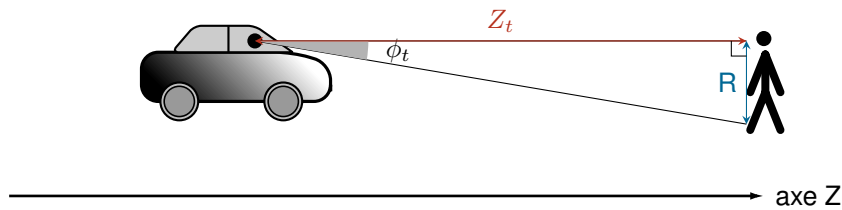


FIGURE 2.7 – Représentation de l'angle optique.

En dérivant l'équation 2.2 par rapport au temps, on obtient :

$$\frac{\dot{Z}_t}{R} = \frac{-v_t}{R} = -\frac{\dot{\phi}_t}{\phi_t^2}, \quad (2.3)$$

où v_t est la vitesse d'approche du véhicule par rapport au piéton. Ainsi défini, cette vitesse vérifie les conditions suivantes :

- $v_t > 0$ si la distance entre le véhicule et le piéton diminue, autrement dit si $\dot{Z}_t < 0$;
- $v_t < 0$ si la distance entre le véhicule et le piéton augmente, autrement dit si $0 < \dot{Z}_t$.

En utilisant les équations 2.2 et 2.3 il est possible d'écrire les égalités suivantes :

$$-\frac{Z_t}{\dot{Z}_t} = \frac{Z_t}{v_t} = \frac{\phi_t}{\dot{\phi}_t} = \tau_t. \quad (2.4)$$

Le rapport $\tau_t = \phi_t / \dot{\phi}_t$ équivaut à l'inverse du taux d'expansion rétinienne. L'équation 2.4 révèle que la valeur de τ est indépendante de la longueur R considérée entre deux zones sur le piéton. D'après Lee (1976), τ est indépendant du mouvement de l'œil. Le conducteur pourrait, en principe, percevoir l'approche ou l'éloignement d'un piéton simplement à partir du taux de dilatation (agrandissement ou rapetissement) de l'image du piéton sur sa rétine :

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{1}{\text{taux de dilatation de l'image rétinienne du piéton}} \\ &= \frac{\text{séparation angulaire de deux points d'image quelconques du piéton}}{\text{taux de séparation des points de l'image}} \end{aligned}$$

Lors d'une phase d'approche, c'est à dire quand $0 < v_t$, le rapport Z_t/v_t re-

présente le temps avant collision en supposant que la vitesse d'approche demeure constante. Ce rapport est communément appelé *time-to-collision* (TTC). Bien que le TTC n'ait de sens qu'en phase d'approche, la définition du TTC s'étend aussi aux phases d'éloignement. Dans ces cas, $v_t < 0$ et donc $TTC = Z_t/v_t < 0$.

Par la suite, Lee (1976) a révélé dans ses travaux l'existence d'une relation entre l'évolution de τ et la perception d'une collision par le conducteur.

En particulier en différenciant τ par rapport au temps, on obtient la relation suivante :

$$\dot{\tau}_t = \frac{Z_t \ddot{Z}_t}{\dot{Z}_t^2} - 1, \quad (2.5)$$

où \ddot{Z}_t représente le taux d'augmentation ou de diminution de la vitesse d'approche du véhicule telle que :

- $\ddot{Z}_t < 0$, si le véhicule accélère et qu'il s'approche de plus en plus vite du piéton ;
- $\ddot{Z}_t = 0$, si la vitesse d'approche est constante ;
- $\ddot{Z}_t > 0$, si le véhicule décélère et qu'il s'approche de moins en moins vite du piéton.

D'après cette considération, il vient que $\dot{\tau}_t < -1$ si la vitesse d'approche est constante ou si le véhicule accélère. Dans ce contexte, une collision entre le véhicule et le piéton ne peut être évitée que si le véhicule décélère suffisamment. En considérant qu'à partir d'un instant t_0 , la vitesse d'approche soit égale à $v_{t_0} = -\dot{Z}_{t_0}$ et que le véhicule commence à freiner de manière uniforme telle la décélération d'approche soit constante et égale à $\dot{v}_{t_0} = -\ddot{Z}_{t_0} (> 0)$.

L'évolution de la vitesse peut s'écrire :

$$\begin{aligned} v_t &= v_{t_0} + \dot{v}_{t_0} \cdot (t - t_0) \\ \Leftrightarrow \dot{Z}_t &= \dot{Z}_{t_0} + \ddot{Z}_{t_0} \cdot (t - t_0). \end{aligned} \quad (2.6)$$

En notant t_f le temps nécessaire pour que le véhicule s'arrête, l'équation 2.6 permet d'écrire :

$$t_f - t_0 = -\frac{\dot{Z}_{t_0}}{\ddot{Z}_{t_0}} \quad \text{car} \quad v_{t_f} = 0 = \dot{Z}_{t_f}. \quad (2.7)$$

Par ailleurs, en notant d_f la distance parcourue par le véhicule avant de s'arrêter, l'équation du mouvement avec décélération uniforme permet d'écrire :

$$\begin{aligned} d_f &= v_{t_0} \cdot (t_f - t_0) + \frac{\dot{v}_{t_0}}{2} \cdot (t_f - t_0)^2 \\ \Leftrightarrow d_f &= -\dot{Z}_{t_0} \cdot (t_f - t_0) - \frac{\dot{Z}_{t_0}}{2} \cdot (t_f - t_0)^2. \end{aligned} \quad (2.8)$$

En utilisant l'équation 2.7, l'équation 2.8 peut se réécrire comme suit :

$$d_f = \frac{\dot{Z}_{t_0}^2}{2\ddot{Z}_{t_0}}. \quad (2.9)$$

Par conséquent, la décélération initiale à l'instant t_0 ne sera suffisante que si et seulement si $d_f \leq Z_{t_0}$, autrement dit si et seulement si :

$$\frac{\dot{Z}_{t_0}^2}{2\ddot{Z}_{t_0}} \leq Z_{t_0} \Leftrightarrow -\frac{1}{2} \leq \dot{\tau}_{t_0}. \quad (2.10)$$

D'après ces relations, le seuil $-1/2$ est déterminant dans la mesure où il permettrait à un conducteur de juger si une collision va se produire. Si $\dot{\tau}_{t_0} < -1/2$, le conducteur peut s'attendre à ce que le véhicule entre en collision avec le piéton. Si $-1/2 \leq \dot{\tau}_{t_0}$, le conducteur peut percevoir que le véhicule va s'arrêter avant qu'une collision ne se produise.

Lorsqu'un conducteur souhaite rester à une distance constante d'un véhicule qui le précède, Lee (1976) suggère un modèle d'adaptation de la vitesse basée sur les valeurs τ et $\dot{\tau}$. Ce modèle est présenté sur la figure 2.8. Pour aider la compréhension de ce modèle, les principaux résultats détaillés ci-dessus sont rappelés dans la table 2.2.

TABLE 2.2 – Mise en relation de la dynamique d'approche avec les indicateurs de perception visuelle (Lee, 1976).

Type d'approche	Spécification	
	Physique	Visuelle
Constante ou accélérée	$\dot{Z}_t < 0, \ddot{Z}_t < 0$	$\tau_t > 0, \dot{\tau}_t \leq -1$
Décélérée (insuffisamment)	$\dot{Z}_t < 0, \frac{\dot{Z}_{t_0}^2}{2\ddot{Z}_{t_0}} > Z_{t_0}$	$\tau_t > 0, \dot{\tau}_t < -\frac{1}{2}$

Les expériences de Bootsma et Craig (2003) ont validé l'importance de la prise

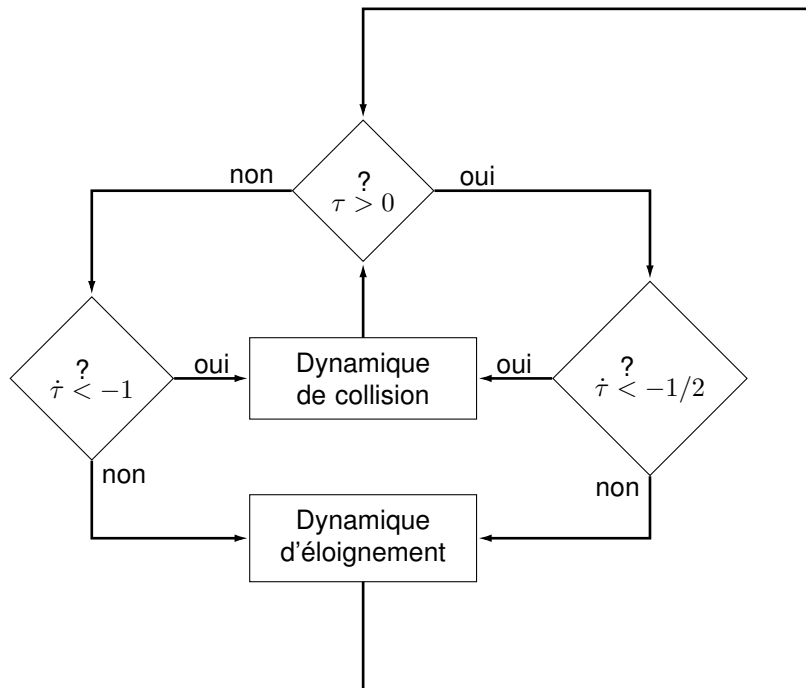


FIGURE 2.8 – Modèle d'adaptation de la vitesse (Lee, 1976).

en compte de τ_t dans la détection d'une collision par un conducteur. Ils nuancent cependant les résultats de Lee (1976) en révélant que les individus seraient plutôt sensibles à des variations de τ_t plutôt qu'aux variations de $\dot{\tau}_t$.

2.3.2 La perception du temps avant intersection

À la suite de ces travaux, d'autres chercheurs ont également confirmé l'importance de τ_t dans la détection des collisions. C'est le cas par exemple, des travaux de Kondoh et al. (2008) ou Chen et al. (2016). Cet indicateur est actuellement utilisé par l'industrie automobile pour déterminer les seuils d'alerte des systèmes d'avertissement de collision (National Highway Traffic Safety Administration, 2013).

Cependant, le TTC n'est applicable que lorsqu'un obstacle se trouve déjà sur la trajectoire du véhicule. D'autres indicateurs doivent être calculés pour étudier la perception du risque de collision lorsque qu'un obstacle ne se déplace pas sur la même trajectoire que l'observateur. Cela peut être le cas en espace partagé si par exemple un piéton traverse devant le véhicule. Dans ces situations, on peut supposer que les passagers vont essayer d'estimer le point de collision potentiel et évaluer si le véhicule adopte une bonne dynamique. Dans ce cadre, le temps restant

avant que cette collision ne se produise peut être évalué par le temps d'interaction (*time-to-interaction* (TTI)), qui est une généralisation du TTC aux trajectoires convergentes dans les dimensions latérales et longitudinales. Alors que le TTC ne peut être calculé que lorsque le piéton se trouve sur la trajectoire de l'observateur, le TTI a l'avantage de pouvoir être défini quelle que soit la position.

Sur la figure 2.9, les mouvements sont représentés dans un repère à deux dimensions. Les vitesses respectives du véhicule et du piéton sont notées respectivement \vec{v} , \vec{p} . Le TTI représente le temps restant avant que le véhicule et le piéton se trouvent à la position la plus proche l'un de l'autre. D'après Schwarz (2014), il peut se calculer en temps réel en tenant compte des équations de position (paramétriques) suivantes

$$\begin{cases} V_t = V_{t_0} + t \cdot \vec{v} \\ P_t = P_{t_0} + t \cdot \vec{p} \end{cases} \quad (2.11)$$

où

- v_{t_0} et p_{t_0} représentent les positions respectives du véhicule et du piéton au moment du calcul du TTI, noté t_0 ;
- V_t et P_t désignent les positions respectives du véhicule et du piéton à un instant $t > t_0$.

Ces équations supposent que les vitesses et les trajectoires du véhicule et du piéton (i.e., \vec{v} et \vec{p}) restent constantes à partir de l'instant t_0 .

En notant par ailleurs $\vec{d}(t)$, la différence vectorielle entre les deux trajectoires est définie par :

$$\vec{d}_t = P_t - V_t. \quad (2.12)$$

La distance entre le véhicule et le piéton à un instant $t > t_0$, notée D_t , se calcule d'après le produit scalaire usuel :

$$\vec{D}_t = \vec{d}_t \cdot \vec{d}_t = (\vec{p} - \vec{v})^2 \cdot t^2 + 2 \cdot \vec{d}_0 \cdot (\vec{p} - \vec{v}) \cdot t + \vec{d}_0 \cdot \vec{d}_0 \quad (2.13)$$

À partir de cette équation, il est possible de déterminer le TTI en considérant

qu'il s'agit de la valeur de t où la distance D_t sera minimum :

$$\frac{d}{dt} \vec{D}_t(\text{TTI}) = 0 \iff \text{TTI} = \frac{-\vec{d}_0 \cdot (\vec{p} - \vec{v})}{(\vec{p} - \vec{v})^2} \quad (2.14)$$

D'après Ondrej et al. (2010), l'estimation du TTI permettrait d'estimer si une collision peut se produire. Cependant, ils suggèrent que l'évaluation du TTI doit être réalisée en tenant compte simultanément de l'angle d'approche. Cette considération est basée sur les travaux de Cutting (1995) qui ont montré qu'un individu peut anticiper une collision grâce à l'évolution de l'angle de gisement. Il s'agit de l'angle entre la direction du mouvement du véhicule et la direction d'un piéton en approche. Cet angle, représenté sur la figure 2.9 est noté α d'après Ondrej et al (2010). Son évolution par rapport au temps renseigne sur l'ordre de passage du piéton souhaitant croiser la trajectoire du véhicule. Cette évolution se calcule à partir de la dérivée de l'angle α par rapport au temps, notée $\dot{\alpha}$. Elle vérifie les propriétés suivantes :

$$\begin{cases} \dot{\alpha} < 0 \Rightarrow \text{le piéton passera devant le véhicule} \\ \dot{\alpha} = 0 \Rightarrow \text{il y aura collision} \\ \dot{\alpha} > 0 \Rightarrow \text{le véhicule passera devant le piéton} \end{cases} \quad (2.15)$$

Bien que cela n'ait jamais été testé dans la littérature, le couple d'indicateurs (TTI, $\dot{\alpha}$) pourrait donc être lié à la perception du risque de collision d'un passager de VA au cours d'une interaction avec un piéton.

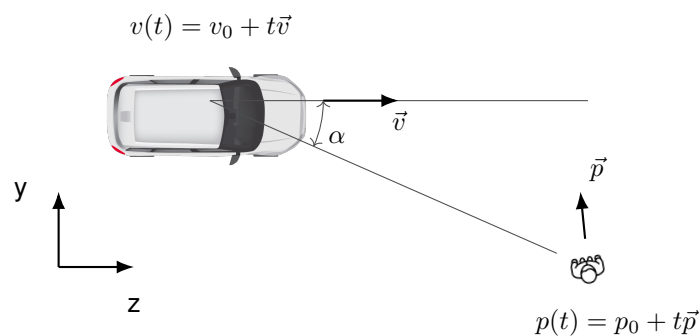


FIGURE 2.9 – Représentation du *bearing angle* (Ondrej et al., 2010).

2.3.3 Synthèse

Les travaux de Lee (1976) et de Cutting (1995) ont révélé qu'un individu était en mesure d'appréhender visuellement et de manière précise le risque de collision au travers de la dynamique de mouvement. La prise en compte de ces résultats se révèle pertinente pour l'analyse de la perception du risque d'un passager de VA naviguant parmi des piétons. En particulier, en phase d'approche, l'évolution du taux d'expansion de l'image d'un piéton sur la rétine d'un individu permet à ce dernier d'estimer sans calcul le temps restant avant d'entrer en collision (TTC) avec ledit piéton. De plus, lorsqu'un piéton traverse devant le véhicule, l'individu peut également estimer si une collision va se produire d'après l'évolution de l'angle de gisement. À partir de ces indicateurs visuels de perception du risque de collision, le passager peut s'attendre à ce que le VA adapte son comportement. Afin de pouvoir disposer d'éléments de compréhension sur les attentes que peut avoir un passager vis-à-vis du VA, la section suivante présente les principaux modèles de régulation de la conduite basés sur la perception du risque. Cela permet d'apporter des éléments de compréhension quant aux attentes que pourrait avoir un conducteur ayant cédé le contrôle de son véhicule à un système de conduite autonome.

2.4 La régulation de la conduite basée sur la perception du risque

2.4.1 Modèle de Näätänen et Summala (1974)

Näätänen et Summala (1974, 1976) ont proposé un modèle basé sur le contrôle du risque subjectif. D'après ces auteurs, le risque subjectif dépend du produit entre le niveau de probabilité subjective d'un événement dangereux et l'importance subjective des conséquences de cet événement. Dans leur modèle représenté sur la figure 2.10, lorsque le conducteur perçoit des informations, il évalue leur pertinence, les confronte avec ses attentes, ses motivations (e.g., son but, son état d'esprit et le temps qu'il s'accorde pour arriver à destination) puis à son niveau de risque ressenti. Cette confrontation module le niveau de vigilance du conducteur et intervient dans le processus de décision.

Näätänen et Summala (1974) discernent deux catégories de processus de dé-

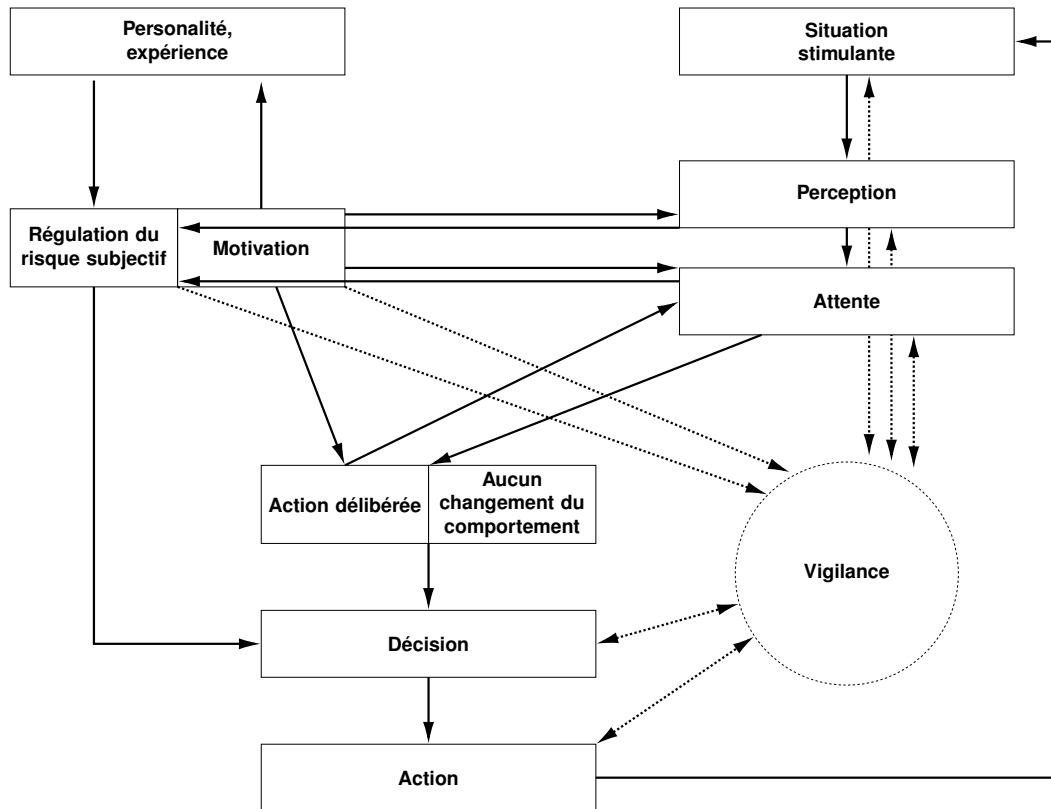


FIGURE 2.10 – Modèle de contrôle du risque subjectif de Näätänen et Summala (1974).

cision.

- Les processus actifs concernent les actions où le conducteur poursuit ses objectifs en fonction de ses motivations. L'influence du risque subjectif est dite désactivée.
- Les processus réactifs concernent les actions visant généralement à réduire le risque encouru ou la peur. Ces décisions permettent au conducteur de changer la situation de sorte que la source de risque subjectif disparaisse. L'influence du risque subjectif est dite activée.

Dans ce modèle de régulation, le comportement de conduite est supposé être directement lié au niveau de risque subjectif. Näätänen et Summala (1974) suggèrent que dans la plupart des circonstances, le conducteur cherche à maintenir un niveau de risque égal à zéro. En d'autres termes, dans des conditions de circulation normales, le conducteur prend des décisions de sorte à ne percevoir aucun risque. Toutefois, Näätänen et Summala (1974) ont suggéré que la perception du

risque était soumise à un seuil subjectif. Ce n'est que si ce seuil est dépassé que les mécanismes de compensation (processus réactifs) sont sollicités pour tenter d'abaisser le niveau de risque.

2.4.2 Modèle de Wilde (1982)

Le principe que Wilde (1982, 1998) propose est relativement simple et peut être résumé comme suit : le conducteur se définit un niveau de risque à respecter (dit niveau cible) et va continuellement opérer des ajustements afin que son déplacement soit conforme à ce niveau de référence. Dans cette théorie, il est considéré que le risque perçu par l'individu résulte essentiellement de sa connaissance du taux d'accident avéré. Le modèle qui en découle représenté sur la figure 2.11 illustre un processus en boucle. Compte tenu de ses attentes et de ses capacités perceptives, un individu confronte en permanence sa perception du risque avec son niveau de risque cible. De cette confrontation émergent des décisions d'ajustement qui auront un effet sur le taux d'accident et donc un effet à retard sur le niveau de risque perçu.

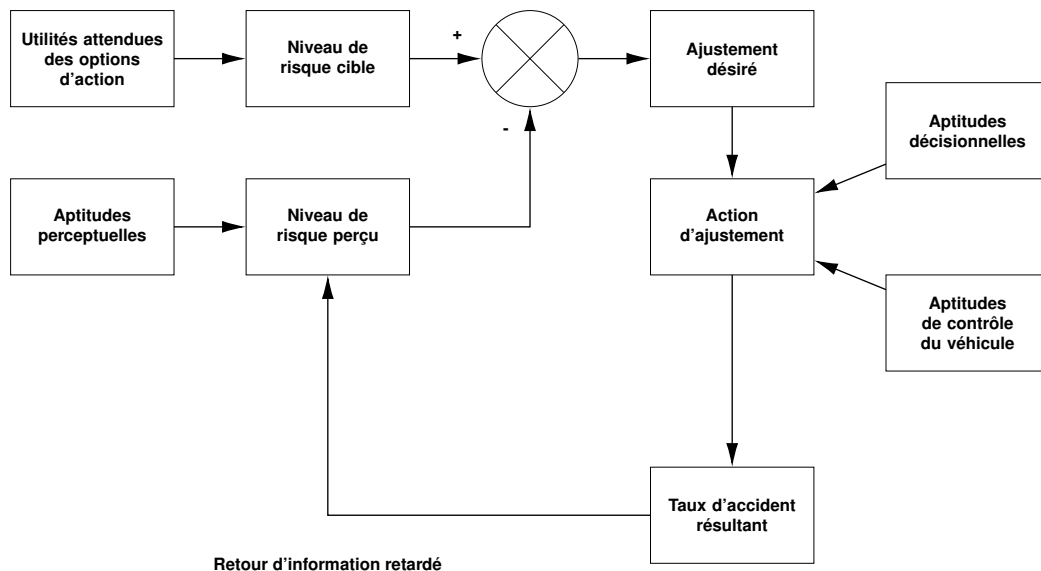


FIGURE 2.11 – Extrait du modèle d'homéostasie du risque de Wilde (1982).

Pour étayer sa théorie et justifier que le comportement de conduite est essentiellement basé sur la perception du taux d'accident, Wilde (1998) évoque plusieurs exemples où des mesures préventives n'ont pas eu les effets escomptés. Il cite

par exemple le changement de sens de circulation en Suède en fin d'année 1967 qui a fait baisser le taux d'accident momentanément ; un an et demi plus tard, ce taux est revenu à son niveau initial. Wilde (1998) explique cela par le fait que les conducteurs ont d'abord trouvé les routes plus dangereuses (hausse du niveau de risque perçu), mais que progressivement et notamment à travers les chiffres exposés dans les médias, ils se sont rendu compte que la dangerosité des routes n'avait pas changé et ont de ce fait réajusté leur niveau de risque perçu.

Ce mécanisme entre également en jeu dans le rapport au véhicule et à l'automatisation de la conduite. Lorsqu'un véhicule est perçu comme plus sûr, car il a de meilleures capacités de tenue de route (grâce aux assistances à la conduite, par exemple), il y a ce qu'on appelle des adaptations comportementales, comme une augmentation de la vitesse ou une diminution des marges de sécurité, qui réduisent les bénéfices attendus (Hoedemaeker et Brookhuis, 1998 ; Rudin-Brown et al., 2009 ; Breyer et al., 2010).

La théorie d'homéostasie du risque a été par la suite très discutée dans la littérature. O'Neill et Williams (1998) ont notamment consacré un article pour s'opposer à ce modèle. D'après eux, le concept de retour d'information que perçoivent les individus sur le taux d'accident réel serait un mécanisme trop élaboré. D'après Vaa (2001), le taux d'accident ne peut pas être le seul élément de perception du risque. Il reproche à Wilde d'avoir omis totalement le ressenti du conducteur. De plus Vaa (2001) suggère qu'un conducteur ne serait pas capable de maintenir un niveau de risque qui ne pourrait être évalué que d'une manière qualitative. D'après lui, les seuls niveaux de risque cible que l'individu serait capable de se fixer seraient : le niveau 0, où l'individu ne voudrait surtout pas être impliqué dans un accident, le niveau 1, où l'individu chercherait à provoquer un accident.

2.4.3 Field of safe travel (Gibson et Crooks, 1938)

Gibson et Crooks (1938) définissent la conduite comme étant une succession d'actions d'un conducteur ayant pour but de faire évoluer son véhicule dans une zone appelée *field of safe travel* (FoST). Il s'agit d'une zone physique dynamique dont le point de référence est le conducteur lui-même. Une représentation de cette zone est donnée sur la figure 2.12. Le FoST comprend l'ensemble des trajectoires que le véhicule peut emprunter sans danger, et ce, que le conducteur en

ait conscience ou non. Ainsi, les contours de cette zone prennent appui sur les éléments qui, dans le champ visuel du conducteur, sont à éviter ou représentent un danger.

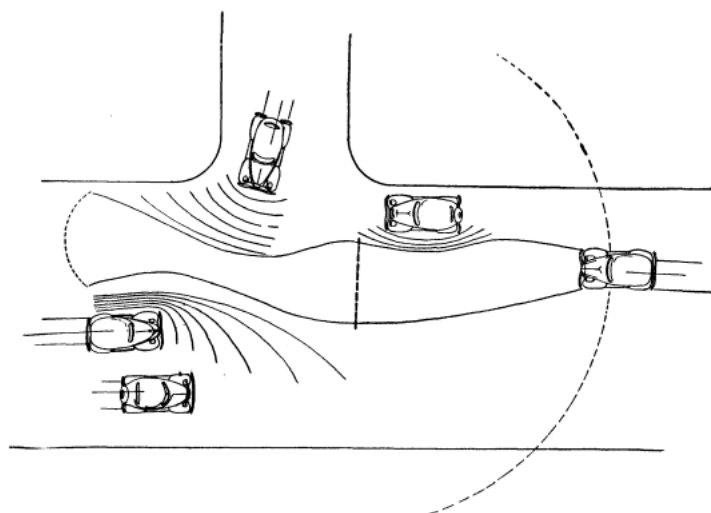


FIGURE 2.12 – Représentation du *field of safe travel* défini par Gibson et Crooks (1938).

La vitesse de conduite est déterminée par une autre zone appelée *stopping zone* dont l'amplitude dépend de la distance que mettrait le conducteur pour s'arrêter. Selon Gibson et Crooks (1938), le risque ressenti par le conducteur proviendrait de la confrontation entre la frontière de la *stopping zone* et celle du FoST. Lorsque les deux frontières se rapprochent, le conducteur est dans l'inconfort et réajuste sa vitesse. Lorsque l'une des frontières de la *stopping zone* dépasse le FoST, le conducteur ressent un danger imminent.

En fonction de ses compétences, le conducteur peut aussi réajuster son FoST qui relève d'une certaine subjectivité. Plusieurs facteurs peuvent limiter le FoST. Tout d'abord, il y a les restrictions naturelles dont une grande partie a pour effet de limiter le champ de vision du conducteur (e.g., condition climatique, période de la journée). Ensuite il y a les restrictions liées au pilotage lui-même. C'est-à-dire aux trajectoires envisageables par le conducteur compte-tenu de sa vitesse, des capacités de son véhicule et de potentiels facteurs externes comme l'état de la chaussée. Mais encore, le FoST est aussi délimité par les obstacles fixes ou mobiles ou potentiels considérés par le conducteur. Les obstacles fixes interviennent en créant des zones d'exclusion définies par ce que Gibson et Crooks (1938) nomment *clea-*

rance lines. Les obstacles mobiles imposent au conducteur de mener constamment des réajustements de la dynamique de son véhicule pour moduler son FoST. Les obstacles potentiels sont anticipés par le conducteur en fonction de son expérience et des signaux extérieurs qu'il perçoit. Par exemple, le conducteur peut se méfier d'une voiture stationnée, mais occupée par un individu sur le siège conducteur. La réglementation et les signaux d'alerte influencent également le FoST d'un conducteur (e.g., feu rouge, présence d'une voiture de gendarmerie).

Finalement, les conducteurs prennent également en compte le FoST des autres automobilistes. Chacun suppose que le FoST de l'autre n'empiète pas sur le sien. En cas de conflit, l'usage du klaxon, donné en exemple dans le papier, peut permettre d'éviter un danger.

2.4.4 Le modèle de marge de sécurité défini par Boer (2006)

Dans son étude sur la manière dont les conducteurs évoluent en fonction des risques qu'ils perçoivent, Boer (2006) définit l'environnement du conducteur comme un domaine de travail. La conduite est alors considérée comme une activité multitâche au cours de laquelle le conducteur passe son temps à changer de sujet d'attention. Pour chaque tâche de conduite, Boer (2006) suppose que l'individu se définirait des marges de sécurité et un état cible en dehors de ces zones autour desquelles il laisserait sa situation osciller. Les différentes zones définies par Boer (2006) sont représentées en figure 2.13. Elles dépendent de l'environnement du conducteur (e.g., route, autres usagers) et du conducteur lui-même (e.g., sa personnalité, le nombre de tâches qu'il veut effectuer).

L'idée est qu'une telle représentation existe pour chacune des tâches que le conducteur réalise comme par exemple, suivre un véhicule, rester au centre, respecter une limitation de vitesse. Chacun des états respectifs évolue donc dans ce qui est qualifié de zone de tolérance. Plus cette zone est large, plus l'état peut dévier et moins le conducteur devra opérer des ajustements. L'inverse est également vrai, plus la zone de tolérance est restreinte et plus le conducteur devra consacrer des ressources à la tâche en question.

D'après cette représentation, Boer (2006) définit le risque comme « la fréquence, la profondeur de pénétration et la durée de la pénétration des états du véhicule au-delà de la marge de sécurité ». En situation de risque, le conducteur tentera de

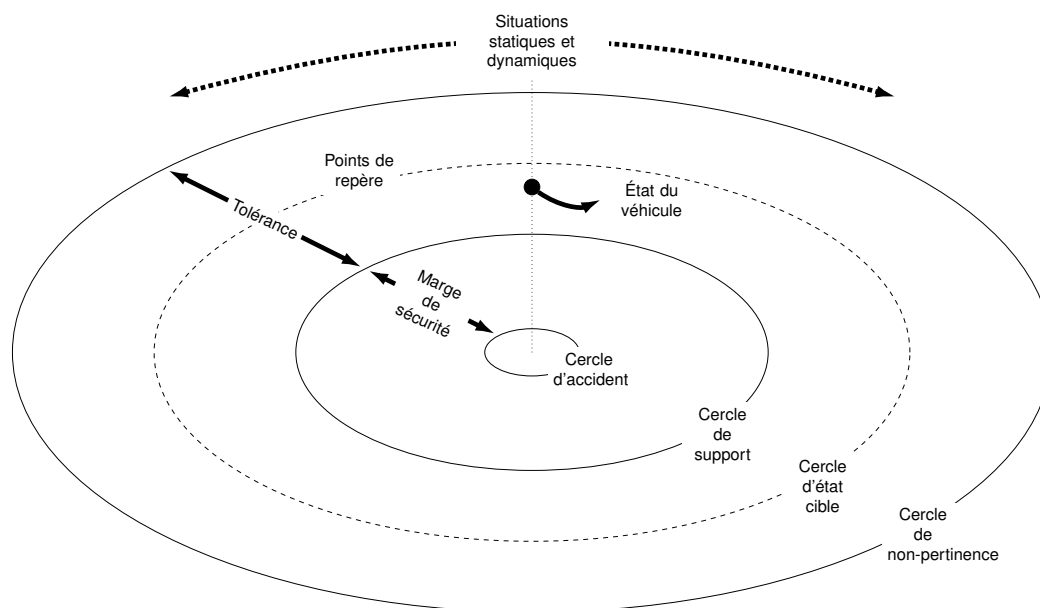


FIGURE 2.13 – Modèle de marge de sécurité proposé par Boer (2006).

ramener son état dans la zone de tolérance. Plusieurs facteurs influencent la largeur d'une marge de sécurité. Elle dépend par exemple du niveau de confiance que le conducteur a envers ses propres capacités, celles de son véhicule et de ses interactions avec les autres usagers. Une marge de sécurité est aussi influencée par le caractère imprévisible de menaces anticipées par le conducteur. Par exemple, la distance respectée par un conducteur dans une tâche de suivi d'un véhicule dépend de la probabilité (estimée subjectivement) que le véhicule suivi freine brusquement. Boer (2006) suggère également que les tâches de non conduite auxquelles un conducteur peut s'adonner, en particulier celle nécessitant des ressources visuelles, ont pour effet d'augmenter les marges de sécurité. C'est le cas par exemple des distances de sécurité lors d'une tâche de suivi.

De manière générale, les zones représentées dans le modèle de Boer (2006) dépendent largement de la quantité de ressources qu'un conducteur décide d'allouer à chacune des tâches. Il s'agirait d'une allocation fortement dynamique très dépendante des capacités du conducteur. Notamment, ce dernier disposerait grâce à son expérience de modèles mentaux lui permettant de s'adapter aux situations et d'anticiper d'éventuelles menaces. D'après Boer (2006), ces modèles mentaux sont des structures de base que le conducteur met continuellement à jour avec les informations de la situation qu'il vit afin de développer une stratégie prédictive.

Cette théorie mène à une vision de la conduite en deux dimensions, la première serait la complexité de l'environnement et la deuxième serait la complexité de comportement du conducteur (allocations des ressources, modèles mentaux). Dans ces deux dimensions, il appartient au conducteur de maintenir une attitude adéquate. S'il consacre trop de ressources vis-à-vis de la complexité environnementale (cas pouvant se produire si le conducteur est sous-expérimenté ou engagé dans trop de tâches secondaires), il aura tendance à franchir ses marges de sécurité plus souvent. Idem s'il sous-estime la complexité environnementale ou s'il évalue mal une situation.

Finalement, Boer (2006) suppose qu'il serait possible d'évaluer le risque pris par un conducteur en confrontant son comportement observé avec le comportement qu'il aurait s'il était totalement consacré à chacune des tâches de conduite. Cela permettrait de définir une *référence* relativement au conducteur étudié. La mesure du risque serait alors la différence entre le comportement observé chez le conducteur et la référence. Il apparaît néanmoins très complexe de définir cette référence, car cela suppose de déterminer le comportement du conducteur s'il consacrait un niveau d'effort optimal à la tâche de conduite.

2.4.5 Synthèse

Les théories présentées dans cette section suggèrent que la perception du risque par le conducteur est au cœur de la régulation du comportement du véhicule. Cependant, ces théories proposent de définir le risque de différentes façons qu'il est possible de regrouper en deux groupes.

Tout d'abord, le premier groupe concerne les modèles de Näätänen et Summala (1974, 1976) et Wilde (1982) qui suggèrent des stratégies de régulation de la perception du risque vis-à-vis d'un niveau cible. D'après Näätänen et Summala (1974), le conducteur se fixerait un seuil de risque dépendant notamment de sa personnalité, de son expérience et de ses motivations et ne voudrait jamais dépasser ce seuil. Par conséquent, il s'agit d'une théorie du risque zéro impliquant que le conducteur manœuvre son véhicule de sorte à ne jamais se sentir exposé à un risque. D'après cette théorie, le risque perçu par le conducteur est basé sur le produit entre la probabilité et l'importance d'un événement jugé dangereux ou indésirable. D'après Wilde (1982), le conducteur chercherait plutôt à ressentir un risque

dont il se fixerait un seuil qu'il chercherait à maintenir. Dans cette théorie, la perception du risque est essentiellement issue de l'estimation que ferait un conducteur du nombre d'accidents ayant eu lieu dans une situation donnée.

Ensuite, le deuxième groupe concerne les modèles de Gibson et Crooks (1938) et Boer (2006) qui suggèrent qu'un conducteur percevrait un risque si sa situation venait à dépasser des marges de sécurité. D'après Gibson et Crooks (1938), les marges de sécurité concernent le comportement global du véhicule. Le conducteur se représenterait un espace, nommé FoST, dans lequel son véhicule pourrait circuler sans encourir le risque d'accident. D'après Boer (2006), les marges de sécurité conditionnent aussi le comportement global du véhicule, mais sont définies pour chaque objectif que pourrait se fixer un conducteur (e.g., maintien d'une distance de sécurité ou d'une position sur la voie). Ainsi, le conducteur se sentirait exposé à un risque seulement si son état venait à trop dévier de l'objectif fixé.

Au travers de ces différents modèles et approches, il apparaît que la perception subjective du risque par le conducteur d'un véhicule est un concept clé qui influence ses décisions de manœuvre. Lors d'un déplacement en VA, le passager perd cette capacité d'adaptation et il se peut qu'il perçoive un risque dès lors qu'il juge que le comportement du VA ne répond pas à la stratégie de régulation qu'il aurait suivie s'il conduisait.

2.5 Concepts associés à la perception du risque

2.5.1 Les réactions émotionnelles

Selon la définition de Raufaste et al. (2004), une émotion correspondrait à une réaction temporaire, d'assez grande intensité, induite par des antécédents précis dans le temps. Ainsi, une émotion serait liée à une expérience subjective d'une situation en lien avec des facteurs personnels, sociaux et culturels. De plus, une émotion pourrait entraîner des manifestations d'ordre physiologique déclenchées soit par des stimuli externes ou internes soit par des processus cognitifs. Raufaste et al. (2004) distinguent deux types d'émotion. Les émotions de base, dites « primaires », basées sur des concepts universels comme la joie, la tristesse, la peur, le dégoût, la colère et la surprise. Les émotions plus complexes dites « secondaires » pouvant être vues comme des combinaisons d'émotions primaires. Par exemple,

le mépris peut être vu comme le cumul de la colère et du dégoût. Ou encore, la déception peut être vue comme le cumul de la surprise et de la tristesse.

Scherer (2005, 2009) a défini un modèle qu'il nomme *component process model (CPM)* pour caractériser l'ensemble des manifestations d'une réaction émotionnelle. Ce modèle est illustré sur la figure 2.14. Il suggère que l'événement et ses conséquences sont évalués à l'aide d'un ensemble de critères à plusieurs niveaux de traitement. Le résultat de l'évaluation peut modifier l'état motivationnel de l'individu, le prédisposant à certaines actions. Sur la base des résultats de l'évaluation et des changements motivationnels concomitants, des effets efférents se produiront dans le système nerveux autonome (e.g., sous forme de changements cardiovasculaires ou respiratoires) et dans le système nerveux somatique (e.g., sous forme d'expressions physiques du visage, de la voix et du corps). Toutes ces composantes, les résultats de l'évaluation, les prédispositions à l'action, les modifications somatoviscérales et les expressions physiques sont représentées de manière centrale et fusionnent constamment dans une zone d'intégration multimodale avec une mise à jour continue en fonction des événements et des évaluations. Des parties de cette représentation centrale peuvent alors devenir conscientes et faire l'objet d'une affectation à des catégories d'émotions et être étiquetées avec des mots, des expressions ou des métaphores d'émotion.

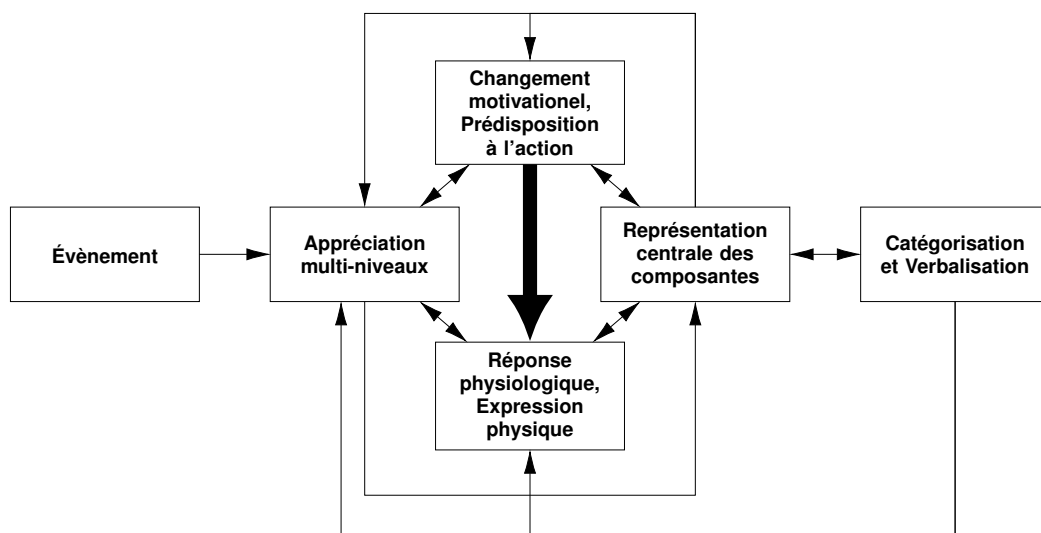


FIGURE 2.14 – Organigramme des composantes liées à l'émotion d'après Scherer (2005)

D'après Scherer (2005), il existerait deux types d'émotions. Les émotions utilitaires, par exemple l'énerverment, la peur, la joie, le dégoût, etc. Ces émotions facilitent l'adaptation aux événements. Elles sont capitales pour le bien-être et les relations extérieures. Elles sont caractérisées par leur haute intensité (*high intensity emergency emotions*) et par le fait qu'elles impliquent une forte synchronisation des ressources. Les émotions esthétiques, par exemple, être touché, être fasciné, être en harmonie, etc. Elles n'ont pas d'utilité et s'opposent en ce sens à la catégorie sus-mentionnée. Elles sont produites par les qualités intrinsèques de la beauté, de la nature ou du travail artistique. Elles se caractérisent notamment par leur impact sur notre comportement et leurs effets physiologiques. Les émotions seraient utiles à l'individu lorsque ce dernier est confronté à des événements significatifs. Au regard du CPM, Scherer (2005) suggère également qu'il n'existe pas d'état émotionnel persistant. Une émotion ne peut être qu'intense et de courte durée notamment à cause du fait qu'elle implique une mobilisation massive de ressources. En partant du principe que les émotions préparent des réponses appropriées aux événements, elles doivent correspondre à l'évaluation subjective des implications présumées d'un événement. En fonction de l'importance de cet événement déclencheur, tout ou partie des sous-systèmes de l'organisme doivent contribuer de manière coordonnée à la préparation d'une réponse émotionnelle. Scherer (2005) nomme cela la synchronisation de la réponse. D'après lui, il s'agit de l'une des caractéristiques les plus importantes de l'émotion pouvant même être mesurée de manière empirique.

Grâce à cette grille de caractérisation, Scherer (2005) différencie les émotions d'autres phénomènes relevant des affects. En particulier, les préférences et les attitudes.

Les préférences sont vues comme des jugements évaluatifs, relativement stables dans le sens d'aimer ou de ne pas aimer un stimulus, ou de le préférer ou non à d'autres objets ou stimuli. Ce sont des états affectifs produits par la rencontre de stimuli attractifs ou aversifs (focalisation sur l'événement) qui sont stables et d'intensité relativement faible. Ils ne produisent pas de synchronisation prononcée des réponses et génèrent des sentiments positifs ou négatifs non-spécifiques, avec un faible impact comportemental, à l'exception des tendances à l'approche ou à l'évitement.

Les attitudes sont des prédispositions relativement durables envers des objets ou des personnes spécifiques. Les psychologues sociaux ont depuis longtemps identifié trois composantes des attitudes (Breckler, 1984) : une composante cognitive (croyances concernant l'objet de l'attitude), une composante affective (consistant principalement en une valence différentielle) et une composante motivationnelle ou comportementale (une tendance stable à l'action par rapport à l'objet, par exemple l'approche ou l'évitement). Les objets des attitudes peuvent être des choses, des événements, des personnes, des groupes ou des catégories d'individus. Les attitudes n'ont pas besoin d'être déclenchées par des évaluations d'événements, bien qu'elles puissent devenir plus saillantes lorsqu'on rencontre ou qu'on pense à l'objet de l'attitude. Les états affectifs induits par une attitude saillante peuvent être désignés par des termes tels que haïr, apprécier ou désirer. L'intensité et la synchronisation des réponses sont généralement faibles et les tendances comportementales sont souvent dépassées par les contraintes situationnelles.

Les préférences et les attitudes peuvent aider à la compréhension du ressenti d'un passager de VA. Par exemple, les préférences ont fait l'objet d'études sur le style de conduite qu'un VA doit adopter dans certaines situations (Basu et al., 2017 ; Rossner et Bullinger, 2019, 2020 ; Natarajan et al., 2022). Les attitudes seraient quant à elles plus générales et justifieraient dans quelle mesure un passager accepterait de se faire transporter dans un VA (Wang et Zhao, 2019 ; He et al. 2020 ; Lokshina et al., 2022). Préférences et attitudes sont deux phénomènes susceptibles d'évoluer au fur et à mesure que le passager va acquérir de l'expérience avec son VA. Un VA respectueux des préférences de son passager favorisera une attitude positive de la part de ce dernier. La section suivante présente les notions de confort et de stress qui permettent d'analyser les préférences d'un passager.

2.5.2 Inconfort et stress

Une définition très globale du confort a été donnée par Slater (1985, 1986). Le confort y est décrit comme « un état agréable d'harmonie physiologique, psychologique et physique entre un être humain et son environnement ». Par la suite, la notion de confort a été souvent adaptée en fonction du domaine d'étude. Constantin et al. (2014) ont considéré le confort comme un état de relaxation subjectif et agréable résultant de la relation de confiance que l'individu entretient avec son

véhicule. Bellem et al., (2016) ont suggéré que le confort était « atteint par la suppression ou l'absence de malaise et de détresse ». Hartwich et al. (2018) ont suggéré que les travaux s'intéressant à cette notion s'accordaient sur les principes suivants : il s'agit d'un construit subjectif résultant d'une interaction de l'individu avec son environnement qui est affecté par des déterminants physiques, physiologiques et psychologiques.

Finalement, il n'y a pas de définition commune du confort dans la littérature. En pratique, le confort est souvent qualifié par l'absence de stress. Le concept de stress a été introduit dans un contexte médical par Hans Selye (1976) qui a mis en évidence que des événements désagréables produisaient des modifications physiologiques considérables. En particulier, il a constaté que des patients atteints de diverses maladies présentaient souvent les mêmes symptômes. Ces symptômes sont alors désignés comme « non spécifiques » car ils sont observables quelle que soit la source du stress. Selye (1976) établit alors la définition suivante : « Le stress est la réponse non-spécifique de l'organisme à une demande quelconque ».

Parmi les réactions de l'organisme, le stress est souvent associé à la sécrétion de trois types d'hormones.

- L'ACTH qui est sécrétée par l'hypophyse, une glande endocrine reliée à l'hypothalamus et située à la base du cerveau. Son rôle est de stimuler les glandes surrénales, qui à leur tour libèrent le cortisol.
- Le cortisol qui est sécrété par les glandes surrénales situées au-dessus des reins. Le cortisol a pour but de fournir au cerveau un apport en énergie suffisant pour nous préparer à faire face au stress. Il intervient notamment dans la régulation de la tension artérielle, de la fonction cardiovasculaire, de la fonction immunitaire.
- L'adrénaline, aussi connue sous le nom d'épinéphrine, qui est sécrétée par les glandes médullosurrénales. Elle est responsable d'une série de réactions physiologiques : accélération du rythme cardiaque, élévation de la pression artérielle, augmentation du rythme respiratoire avec plus grande consommation d'oxygène par le cerveau et les muscles, ralentissement de la digestion, dilatation des pupilles (mydriase), transpiration, etc.

Ainsi, le stress peut être considéré comme un ensemble de réactions physiologiques et de processus suscités par une demande environnementale. Les sécré-

tions hormonales liées au stress et leur effets sur l'organisme sont résumés sur la figure 2.15.

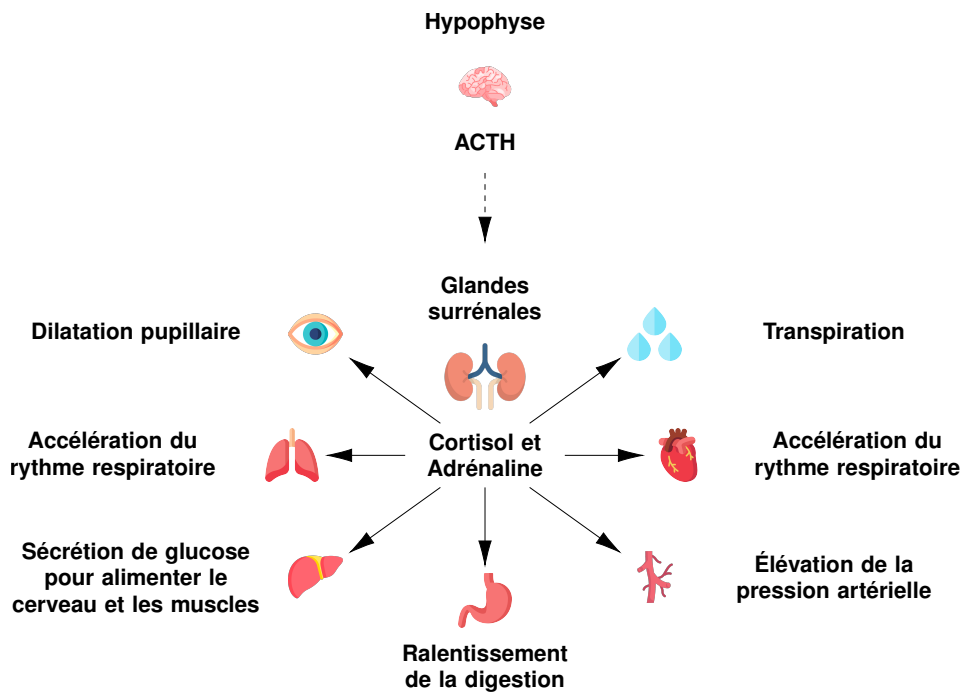


FIGURE 2.15 – Réactions de l'organisme liées au stress

Par la suite, d'autres définitions du stress ont émergé pour s'adapter à des situations différentes, par exemple dans le domaine cognitif. Le concept d'homéostasie, « stabilité par la constance », principal mécanisme par lequel l'organisme fait face au stress, a cédé la place à l'allostasie, « stabilité par le changement », obtenue par la régulation neuronale centrale des points de consigne qui ajustent les paramètres physiologiques pour répondre au défi du stress. Lazarus et Folkman (1984) ont défini le stress de la manière suivante : « relation dynamique et réciproque entre la personne et l'environnement, évaluée par le sujet comme dépassant ses ressources en mettant en jeu son bien-être ». Le stress est ainsi vu comme un processus issu d'un déséquilibre entre la demande de l'environnement et la capacité d'un individu à y faire face (Charron et al., 2020).

2.5.3 Confiance

La confiance est un facteur pouvant favoriser l'adoption de VA. Une définition très utilisée dans la littérature a été proposée par Mayer et al. (1995). La confiance y est définie comme un aspect relationnel entre deux parties. Il ne s'agit donc pas d'une disposition naturelle ou d'une caractéristique d'un individu. La confiance est vue comme « la volonté d'une partie d'être vulnérable aux actions d'une autre partie sur la base de l'attente que l'autre partie réalise une action particulière importante pour le fiduciaire, indépendamment de la capacité à surveiller ou à contrôler cette autre partie » (p.712). De cette perspective, la confiance conduirait à la prise de risque dans une relation. Pour illustrer ce phénomène, Mayer et al. (1995) ont défini un modèle mettant en relation la confiance avec le phénomène de prise de risque. Ce modèle est représenté sur la figure 2.16. Bien que ce modèle n'ait pas été développé dans le domaine de la conduite autonome, il peut être interprété dans le cadre de la relation entre un individu et son véhicule. Verberne et al. (2012) suggèrent que la confiance attribuée par un individu à un système d'automatisation de la conduite peut être considérée comme un rapport de confiance sociale.

Le modèle de Mayer et al. (1995) suggère que la confiance accordée par un individu à un système dépend de trois caractéristiques principales nommées *facteurs de fiabilité perçue* : le niveau d'aptitude du système, son niveau de bienveillance et son intégrité.

Le niveau d'aptitude concerne l'ensemble des compétences et des caractéristiques du système pour gérer la navigation dans une situation donnée. La bienveillance est la mesure dans laquelle un système est censé assurer la sécurité de l'individu. L'intégrité représente les valeurs et principes d'un système que l'individu juge acceptables.

Le niveau d'aptitude, la bienveillance et l'intégrité d'un système sont les principales caractéristiques intervenant dans la relation de confiance. Chacune peut être en relation avec les autres tout en restant séparable et varier indépendamment. De plus, elles interviennent dans des propensions différentes et relatives à chaque individu. Mayer et al. (1995, prop. 3 et 4) établissent deux assertions. D'une part, le niveau de bienveillance perçue par l'individu s'améliore au fur et à mesure de l'utilisation du système. D'autre part, l'intégrité d'un système joue un rôle plus important sur la confiance au début de l'utilisation du système et son influence évolue par la

suite en fonction du niveau de bienveillance perçu par l'individu. L'intégrité joue un rôle crucial pour Verberne et al. (2012) qui ont suggéré que la navigation d'un VA se doit d'être conforme aux règles sociales et aux attentes de son passager.

D'après Mayer et al. (1995), la prise de risque émergerait à partir de cette relation de confiance établie entre un individu et un système. Cela se traduirait par une volonté de l'individu d'assumer un risque en fonction des gains et des pertes qu'il perçoit et anticipe. Pour définir la prise de risque, il n'est pas fait mention du construit de Yates et Stone (1992) mais les auteurs citent une définition qui s'en apparente donnée par Sitkin and Pablo (1992) selon laquelle "le risque est une caractéristique des décisions qui est définie comme la mesure dans laquelle il existe une incertitude quant à la réalisation des résultats potentiellement importants et/ou décents des décisions". Cette prise de risque et les conséquences engendrées positives ou négatives permettraient finalement à l'individu de mettre à jour sa perception de la fiabilité du système et donc d'ajuster son niveau de confiance.

Ce modèle de confiance représenté sur la figure 2.16 représente donc une boucle infinie entre confiance, prise de risque et conséquences. Cette boucle, faisant intervenir la subjectivité et la perception de l'individu à différents niveaux, justifie le fait que les VA ne pourront être acceptés que de manière progressive. Kalra et Paddock (2016) suggèrent dans leur article qu'il faudra attendre que les VA parcourent des millions voire des milliards de kilomètres pour témoigner de leur fiabilité, notamment en terme de nombre d'accidents.

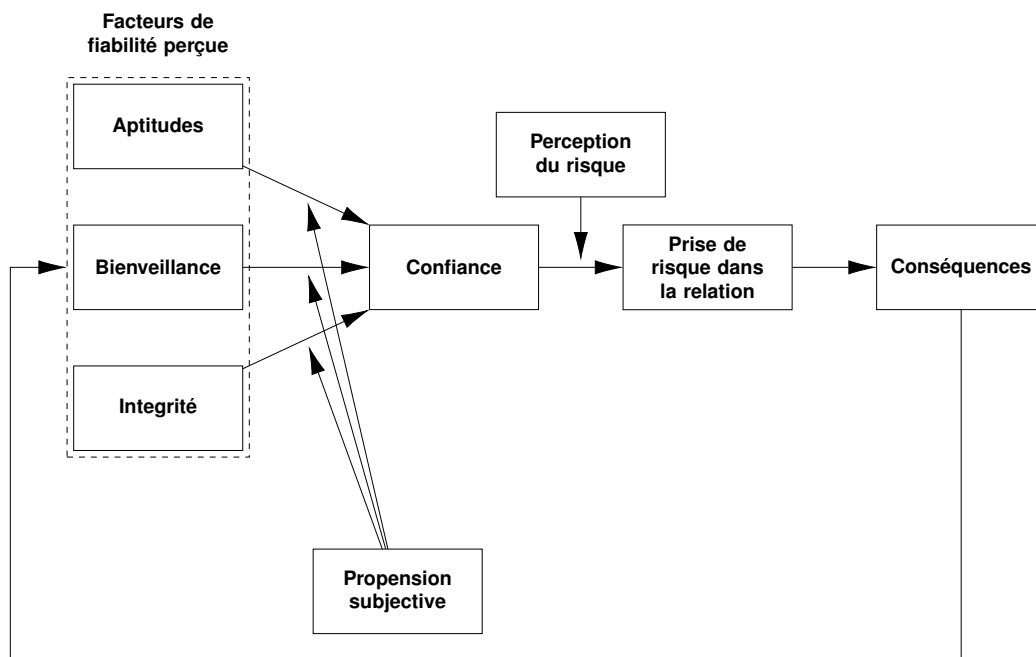


FIGURE 2.16 – Modèle de confiance d'après Mayer et al. (1995).

2.5.4 Synthèse

La perception du risque est issue de l'incertitude d'un individu concernant un ensemble de pertes ou de conséquences indésirables dans une situation donnée (Yates et Stone, 1992). L'une des conséquences indésirables que l'on peut associer à la perception du risque par le passager d'un VA est la perte de confort. Bien qu'il n'en existe pas de définition universelle, la notion de confort a été abordée dans de nombreuses études, par exemple dans les travaux de Elbanhawi et al. (2015), Hartwitch et al. (2018), Telpaz et al. (2018), Beggiato et al. (2018) ou encore Radhakrishnan et al. (2020).

L'une des façons de déceler si un individu manifeste de l'inconfort consiste à observer s'il présente des réactions caractéristiques du stress. En conduite automobile, les mesures de stress les plus utilisées sont la dilatation pupillaire, le rythme cardiaque et l'activité des glandes sudoripares responsables de la sudation (e.g., Healey et Picard, 2005 ; Queyam et Singh, 2013). Comme vu précédemment, ces mêmes mesures sont aussi utilisées pour l'étude de la perception du risque (cf. section 2.2).

Le stress ressenti par le passager d'un VA peut avoir un impact sur son compor-

tement et induire une certaine prédisposition à réagir. À ce titre, s'il est considéré comme un événement ponctuel et intense et non comme un état prolongé et diffus, le stress peut être assimilé à une émotion utilitaire (Raufaste et al., 2004 ; Scherer, 2005). Si le passager est en situation d'inconfort ou de stress, il se peut que cela affecte la relation de confiance qu'il entretient avec le VA dont le comportement peut être jugé insécurisant ou peu fiable. À terme et si les événements stressants se multiplient, la perte de confiance peut avoir des conséquences délétères sur l'acceptation des VA.

AXES DE TRAVAIL DE LA PARTIE EMPIRIQUE

3.1 Présentation des enjeux et des deux axes de recherche

Dans le cadre du projet *Human Inspired Navigation in Crowd* (HIANIC), l'objectif de cette thèse est d'apporter des premiers éléments d'analyse du ressenti des piétons à l'intérieur d'un véhicule autonome (VA) lorsque ce dernier navigue parmi des piétons. Comme illustré sur la figure 3.1, trois enjeux principaux influencent le ressenti d'un passager : la sécurité, l'efficacité du déplacement et la conformité sociale.

- La sécurité est le principal enjeu de développement des VA tant en terme de progrès techniques que d'avancées juridiques. Toutefois, lors d'un déplacement en espace partagé, la sécurité peut s'avérer être un facteur bloquant. À l'heure actuelle, un VA s'arrête s'il ne trouve pas de trajectoire lui permettant de respecter les distances de sécurité implémentées dans son système de navigation.
- Le deuxième enjeu est l'efficacité. Comme discuté dans le chapitre 1, l'adoption des VA pour la navigation espace partagé ne se fera qu'à condition que les véhicules fassent preuve d'efficacité. Un VA doit être capable d'atteindre une destination en suivant un itinéraire pertinent parmi les autres usagers. Pour ce faire, il devra faire preuve d'une capacité à « négocier » une trajectoire parmi des piétons en minimisant à la fois les temps d'arrêt et les contournements.
- Cela amène le troisième enjeu qui est la conformité sociale. Cet enjeu rassemble les notions de marge de sécurité physique et de convention sociale

qui régissent le déplacement d'un véhicule parmi des piétons. Ce troisième enjeu sous-entend que le VA va devoir envisager des stratégies de navigation complexes. Une façon d'envisager ces stratégies, celle considérée dans le projet HIANIC, est de se baser sur le comportement de navigation d'un conducteur humain.

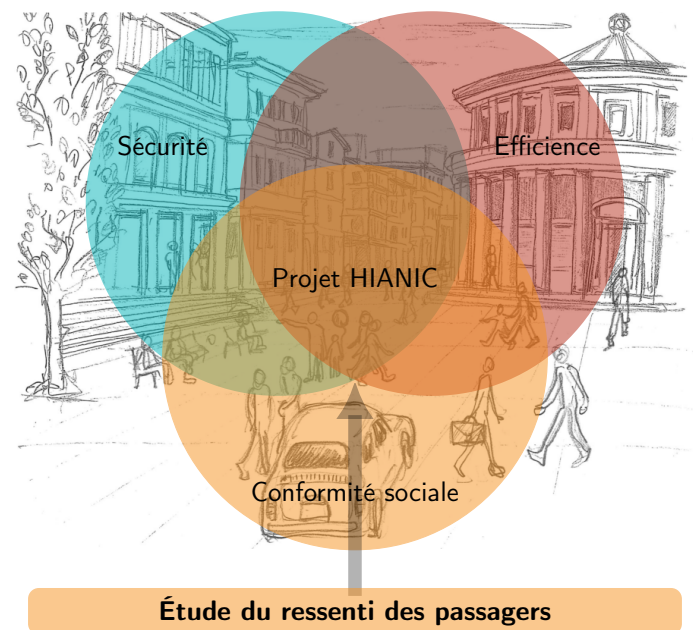


FIGURE 3.1 – Axe de travail de la thèse.

Note. Le projet HIANIC a pour objectif de développer une navigation autonome capable de naviguer parmi des piétons tout en garantissant trois aspects : la préservation de la sécurité de tous, la fluidité du déplacement et l'acceptation par les piétons et les passagers à l'intérieur du véhicule.

Au travers de ces trois enjeux, en particulier celui de conformité sociale, apparaît la nécessité d'étudier le ressenti du passager à l'intérieur du VA. Pour cause, ce dernier va « subir » les choix de navigation de son véhicule. Le jugement d'un comportement risqué pourrait nuire à la relation de confiance devant être instaurée entre le VA et son utilisateur et constituera un frein à l'adoption des VA. Il est donc crucial d'étudier la perception du passager afin de guider le développement des systèmes de navigation. Deux grandes questions théoriques ont guidé les travaux expérimentaux de ce projet de thèse : comment mesurer la perception du risque d'un passager de VA en temps réel ? et quels sont les facteurs dynamiques qui influencent la perception du risque d'un passager de VA naviguant parmi des piétons ?

3.2 Solutions envisagées pour répondre aux deux axes de recherche

Pour répondre à la première question, il a tout d'abord été nécessaire de positionner clairement l'objet d'étude à savoir le risque. La section 2.1 a permis de définir la notion de risque grâce à trois aspects fondamentaux (Yates et Stone, 1992 ; Sitkin et Pablo, 1992) :

- Un risque est lié à une ou un ensemble de pertes ou conséquences indésirables ;
- Le risque implique une incertitude quant à la réalisation de ces pertes ou conséquences indésirables ;
- Le risque peut être quantifié en tenant compte de la signifiante accordée à ces pertes ou conséquences indésirables.

En général une seule conséquence indésirable est considérée dans le domaine de la conduite automobile : l'accident. Ce projet de thèse propose donc d'étudier le ressenti d'un passager en terme de perception du risque, principalement en terme de risque de collision, mais aussi et dans une moindre mesure, en terme de risque de violation des normes sociales que souhaiterait respecter le passager.

Ensuite, il a été question de déterminer une méthodologie d'évaluation en temps réel de cette perception du risque. Pour ce faire, les travaux ont eu pour inspiration les différentes recherches portant sur l'évaluation du ressenti d'un participant lors d'une expérimentation. Plusieurs travaux ont été présentés dans la section 2.2 d'où se dégagent deux grandes méthodologies.

La première méthodologie consiste à évaluer la perception du risque de manière explicite. C'est-à-dire à engager les participants dans une démarche d'auto-évaluation de leur perception. À l'image des dispositifs utilisés dans les travaux de Telpaz et al. (2018), Hartwitch et al. (2018), Walker et al. (2019) et Rossner et al. (2019, 2020), un dispositif a donc été mis au point pour permettre au participant d'évaluer sa perception du risque en temps réel.

La deuxième méthodologie consiste à évaluer la perception du risque de manière implicite grâce à l'étude de certaines réactions physiologiques. Au regard des indicateurs étudiés dans la littérature, il a été choisi d'analyser les réactions électrodermales (Beggiato et al., 2018, 2019 ; Distefano et al., 2020 ; Daviaux et al., 2020 ;

Perello-March et al., 2022). Il s'agit de variations de la conductance cutanée, qui varie elle-même en fonction de l'activité des glandes sudoripares contrôlées par le nerveux autonome en charge de préparer l'organisme à une réaction de fuite ou lutte lorsque l'individu perçoit un stimulus désagréable ou menaçant.

L'un des objectifs des contributions empiriques a donc été de valider l'intérêt d'utiliser à la fois des mesures explicites et implicites pour étudier la perception du risque d'un passager de VA lors d'expérimentations.

Suite à la réflexion sur la manière de mesurer la perception du risque, il a été question de déterminer les facteurs pouvant induire cette perception afin de répondre au deuxième axe de recherche. Grâce aux éléments de littérature portant sur la perception du risque par le conducteur d'un véhicule (présentés dans les sections 2.3 et 2.4), deux phénomènes ont été identifiés :

- Le conducteur est en mesure de percevoir le risque de collision grâce à la dynamique du véhicule dans son environnement. Par exemple, les travaux reconnus de Lee (1976) et de Cutting (1995), suggèrent que le conducteur est capable visuellement de déterminer s'il va entrer en collision avec un obstacle.
- Le conducteur régule le comportement de son véhicule en fonction de sa perception subjective du risque. Dans la théorie de Näätänen et Summala (1974, 1976), le risque ne serait pas souhaitable pour le conducteur au-delà d'un certain seuil. Dans la théorie de Wilde (1982, 1998), le conducteur chercherait à maintenir un certain niveau de risque. Par ailleurs, les théories de Gibson et Crooks (1938) et Boer (2006) suggèrent que le conducteur chercherait à préserver des marges de sécurité en maintenant la dynamique d'interaction entre le véhicule et le piéton dans un domaine acceptable.

3.3 Expérimentations menées pour répondre aux deux axes de recherche

Au regard des solutions envisagées pour répondre aux axes de recherche, deux expérimentations ont été menées au cours de ce projet de thèse. Leur méthodologie générale est présentée dans le chapitre 4. Ces deux expérimentations ont

été basées sur la manipulation de certains facteurs dont on sait qu'ils influencent la perception du risque d'un conducteur humain : les distances de sécurité et les grandeurs dynamiques permettant à l'individu d'appréhender le risque de collision (*time-to-collision* (TTC) et *time-to-interaction* (TTI)). Ces deux expérimentations ont été réalisées dans le but d'établir des premiers éléments de compréhension quant à la régulation du comportement d'un VA naviguant parmi des piétons. Ces deux expérimentations ont donné lieu à trois contributions empiriques illustrées sur la figure 3.2.

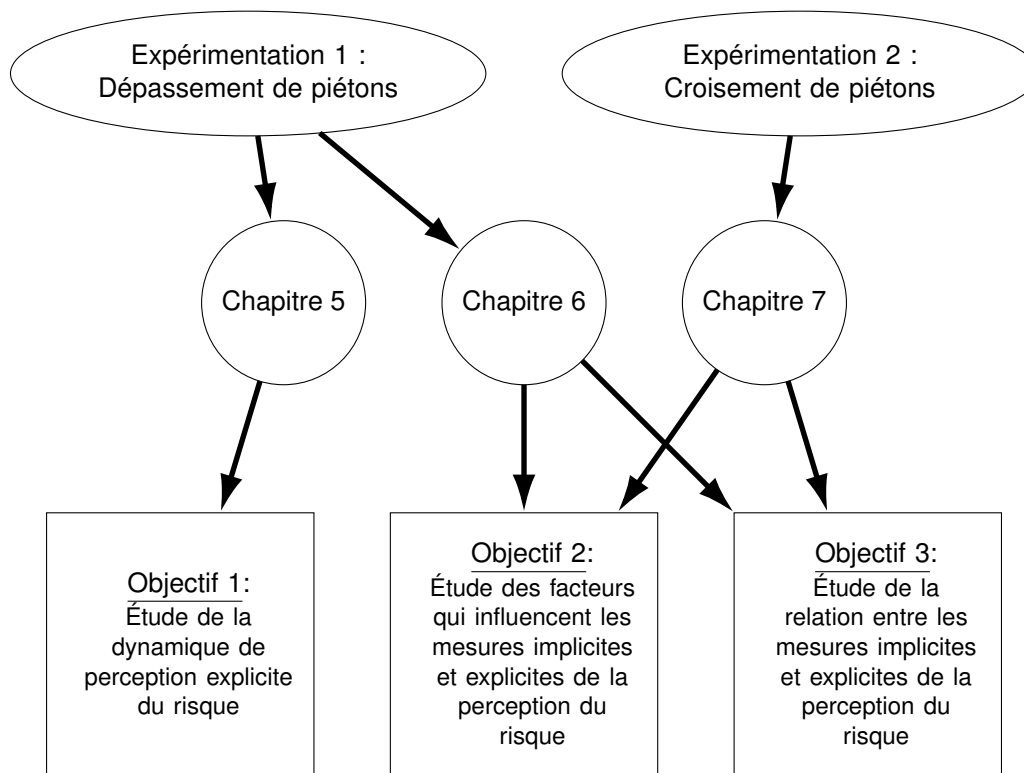


FIGURE 3.2 – Contexte expérimental et objectifs des contributions.

La première expérimentation permet de simuler un contexte simple, mais qui sera probablement très fréquent lors de la navigation d'un VA dans un espace partagé : l'évitement de piétons. Cette expérimentation a donné lieu à deux contributions présentées dans les chapitres 5 et 6.

La deuxième expérimentation a eu pour but d'étendre les résultats de la première expérimentation en mettant le conducteur au centre d'une dynamique d'interaction plus complexe. Cette expérimentation a donné lieu à une contribution pré-

sentée dans le chapitre 7.

Par ailleurs, les trois contributions proposées dans ce projet de thèse ont été développées pour répondre à trois objectifs :

- objectif 1 : études de la dynamique de perception explicite du risque ;
- objectif 2 : étude des facteurs (externes) qui influencent les mesures implicites et explicites de la perception du risque ;
- objectif 3 : étude de la relation entre les mesures implicites et explicites de la perception du risque.

Le premier objectif est abordé dans le chapitre 5. Les deux autres objectifs sont traités dans les chapitres 6 et 7.

DEUXIÈME PARTIE

Contributions empiriques

MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

Afin d'exposer des participants, passagers de VA, à diverses interactions avec des piétons, deux expérimentations ont été conduites. Cela a permis de créer des situations propices à l'étude de la perception du risque. Les deux expérimentations menées au cours de ce projet ont été réalisées dans le même cadre expérimental. Ce cadre expérimental est présenté dans la section 4.1 et comprend à la fois le matériel utilisé pour simuler les situations de conduite autonome et le matériel utilisé pour récolter des mesures de perception implicite et explicite. Suite aux expérimentations, une préparation des données a été réalisée. Toutes les opérations effectuées sur les données sont reportées dans la section 4.2

4.1 Matériel expérimental

4.1.1 Le simulateur de conduite

L'environnement urbain a été modélisé sur un simulateur de conduite à base fixe. Ce simulateur est représenté sur la Figure 4.1.



FIGURE 4.1 – Simulateur de conduite à base fixe.

Ce simulateur permet de reproduire fidèlement l'environnement physique du conducteur. Il est constitué d'un siège semblable à celui d'une voiture, et de l'en-

semble des moyens de contrôle du véhicule (volant, tableau de bord, pédales, levier de vitesse et frein à main). Aucun de ces moyens de contrôle n'a été utile dans le cadre de ce projet de thèse. Le simulateur a uniquement été utilisé pour simuler un véhicule autonome (VA) ne nécessitant d'aucune intervention de la part de son passager.

Afin de présenter aux participants des situations de navigation autonome parmi des piétons, le simulateur comprend trois écrans installés devant le tableau de bord. Ces écrans permettent de constituer une scène avec un angle de vision de 120 degrés. Les scénarios d'expérimentation ont été développés avec le logiciel de simulation de conduite SCANeR Studio dans sa version 1.9 (AVSimulation, France). Grâce à ce logiciel, le comportement du VA ainsi que ceux des piétons a pu être programmé par le biais d'un langage propre et de scripts Python.

4.1.2 Les outils de mesure de perception du risque

La perception du risque implicite des participants a été mesurée grâce à l'étude leurs *skin conductance responses* (SCRs). Pour ce faire, la conductance cutanée a été mesurée par application d'une faible tension continue. Il s'agit d'une méthode très répandue qui est totalement indolore et imperceptible par les participants (Boucsein, 2012 ; Caruelle et al., 2019). La conductance cutanée a été mesurée par le biais de deux électrodes. Comme illustré sur la figure 4.2A, ces deux électrodes ont été placées sur les phalanges distales de l'index et du majeur de la main non-dominante des participants. Les électrodes ont été recouvertes de gel isotonique afin d'améliorer leur contact avec la peau. Aucune préparation de la peau n'a été effectuée avant le placement des électrodes. Il a cependant été vérifié que la peau était propre et ne présentait aucune blessure apparente. Les données ont été collectées à 1000 Hz à l'aide d'un transmetteur sans fil. BioNomadix couplé au module d'acquisition MP160 (cf. figure 4.2B et 4.2.C). Enfin, les données ont été enregistrées avec le logiciel AcqKnowledge 5.0 (BIOPAC Systems, Inc, USA).

Pour permettre aux participants d'évaluer leur perception du risque de manière explicite tout au long d'une simulation, un dispositif analogique a été créé. L'objectif principal était de développer un outil d'évaluation, petit et utilisable d'une seule main, de sorte à limiter les sources de distraction visuelle pour les participants. Ce dispositif est présenté sur la figure 4.3, il s'agit d'un potentiomètre rotatif contraint

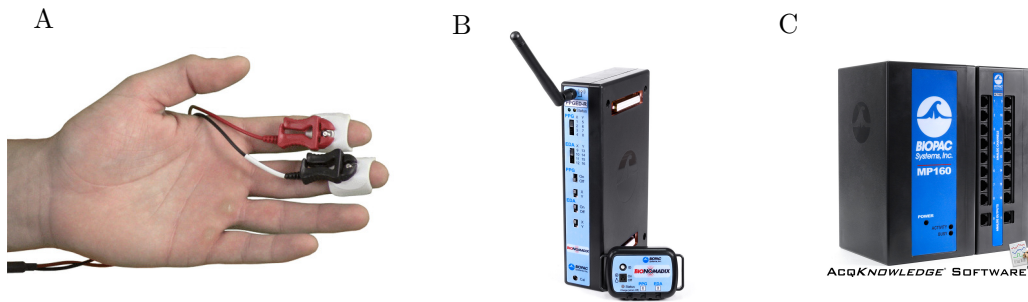


FIGURE 4.2 – Matériel de mesure de l'activité électrodermale (AED).

par une butée basse et une butée haute. Ce potentiomètre a été intégré sur le dessus d'un boîtier en plastique développé par impression 3D. À l'intérieur de ce boîtier, une carte mère Arduino Uno permettait d'assurer la conversion du signal analogique induite par la position en un signal digital exploitable par un ordinateur.

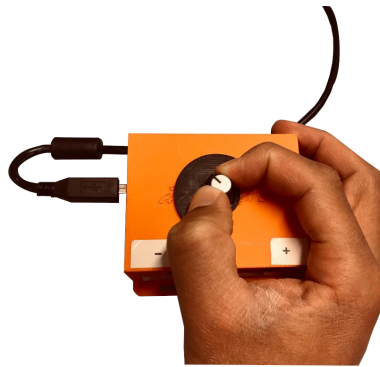


FIGURE 4.3 – Matériel d'évaluation explicite du risque.

Afin de s'assurer que les participants puissent bien maîtriser le potentiomètre, une initiation leur était proposée au préalable de chaque expérimentation. Cette initiation se déroulait lorsque le participant était installé sur le siège conducteur du simulateur. Il s'agissait d'une simulation mettant en scène le même environnement visuel que celui implémenté dans chacune des deux expérimentations. Cependant, lors de cette initiation le véhicule autonome n'avait aucune interaction avec les piétons. Pendant cette initiation, le participant avait un retour visuel sur le moniteur central de la position du potentiomètre rotatif et donc de la valeur d'évaluation subjective associée. Il s'agissait à la fois d'un indicateur numérique et d'une jauge horizontale. Ces indicateurs visuels sont illustrés sur la figure 4.4. Pour faciliter la lecture de la position par les participants, la couleur de la jauge était nuancée en

fonction de la perception du risque évaluée : couleur verte en absence de perception du risque et couleur rouge si la perception du risque était maximum.

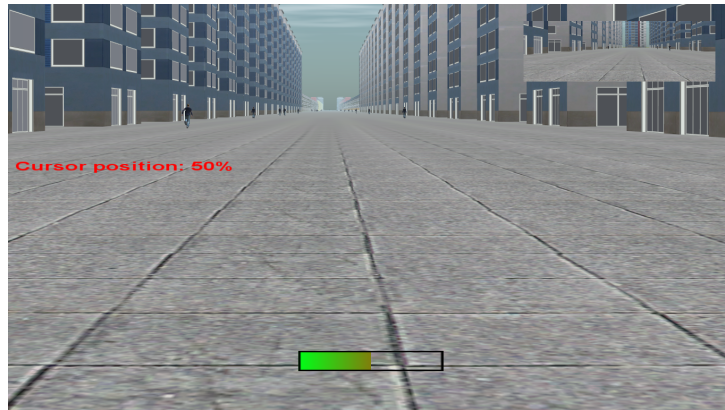


FIGURE 4.4 – Illustration de l'écran central où figure le retour visuel sur la position du potentiomètre.

Il lui était demandé de savoir atteindre les yeux fermés 33%, 50% et 66% de la position maximum en partant de la position minimale (butée basse) dans un premier temps puis en partant de la position maximale (butée haute) dans un second temps. Une précision de 5 points était accordée pour chacune des positions demandées et aucune exigence temporelle n'était imposée au participant. L'initiation prenait fin dès que le participant avait rempli les objectifs et dès qu'il se sentait suffisamment familier avec le dispositif d'évaluation subjective.

En dehors de cette initiation, les participants étaient tenus informés que le retour visuel sur la position du potentiomètre ne leur serait pas proposé. Cette méthodologie proposée par Stevens (2017) permet notamment d'éviter que les participants visent des positions précises et/ou cherchent à corriger leur évaluation en cours d'expérimentations. En sus, cela permettait de réduire les sources de distraction visuelle pour les participants.

4.2 Exploitation des données

4.2.1 Analyse de la perception implicite du risque grâce à l'activité électrodermale

Les données d'AED ont été initialement traitées à l'aide du logiciel AcqKnowledge, version 5.0 (BIOPAC Systems, Inc., USA). Ensuite, les logiciels MATLAB

(2018) et R (2020) ont été utilisés pour extraire des indicateurs. Plusieurs manipulations ont été réalisées pour calculer les indicateurs.

Tout d'abord, les données brutes ont été traitées à l'aide du logiciel AcqKnowledge en suivant les recommandations faites par Braithwaite (2013) et Findlay (2017). Les étapes suivantes ont été successivement appliquées aux données de chaque participant.

- Étape 1 : ré-échantillonnage de l'AED à 78 Hz pour la première expérimentation et 50 Hz pour la seconde expérimentation. L'AED ne fluctue qu'à basse fréquence. Cette opération de ré-échantillonnage permet d'économiser du temps de calcul pour les algorithmes de détection des SCRs.
- Étape 2 : suppression du bruit en appliquant un lissage par moyenne mobile sur une période glissante d'une seconde et un filtrage passe-bas à 1 Hz. Ces étapes ont permis de résoudre la plupart de problèmes liés à l'acquisition des données (e.g., bruit, perte de signal des électrodes).

Les données ainsi traitées ont ensuite été analysées à l'aide de l'application Ledalab développée par Benedek et Kaernbach (2010), dans version 3.4.9. Il s'agit d'une application MATLAB qui a été conçue pour identifier les composantes toniques et phasiques de l'AED (cf. figure 4.5A). La méthode utilisée est basée sur les deux étapes successives suivantes :

1. L'identification de la composante phasique en utilisant l'algorithme *continuous decomposition analysis* (CDA) avec deux paramètres d'optimisation. Cette méthode, qui est décrite dans l'article de Benedek et Kaernbach (2010), est basée sur un algorithme de déconvolution pour détecter les SCRs. Cette technique est particulièrement efficace pour identifier et déterminer les caractéristiques des réponses dites « superposées » Boucsein (2012).
2. La détection des SCRs $> 0.05 \mu\text{S}$ (extraction de leur apparition et de leur amplitude).

Enfin, deux indicateurs ont été calculés pour l'étude des SCRs : le nombre de SCRs associées à une interaction entre le VA et un piéton, et leur amplitude maximale. Le calcul de ces indicateurs a été réalisé avec logiciel R. L'utilisation de ces indicateurs est très répandue dans les recherches sur l'AED d'après la revue de littérature de Caruelle et al. (2019). Pour favoriser les communications et

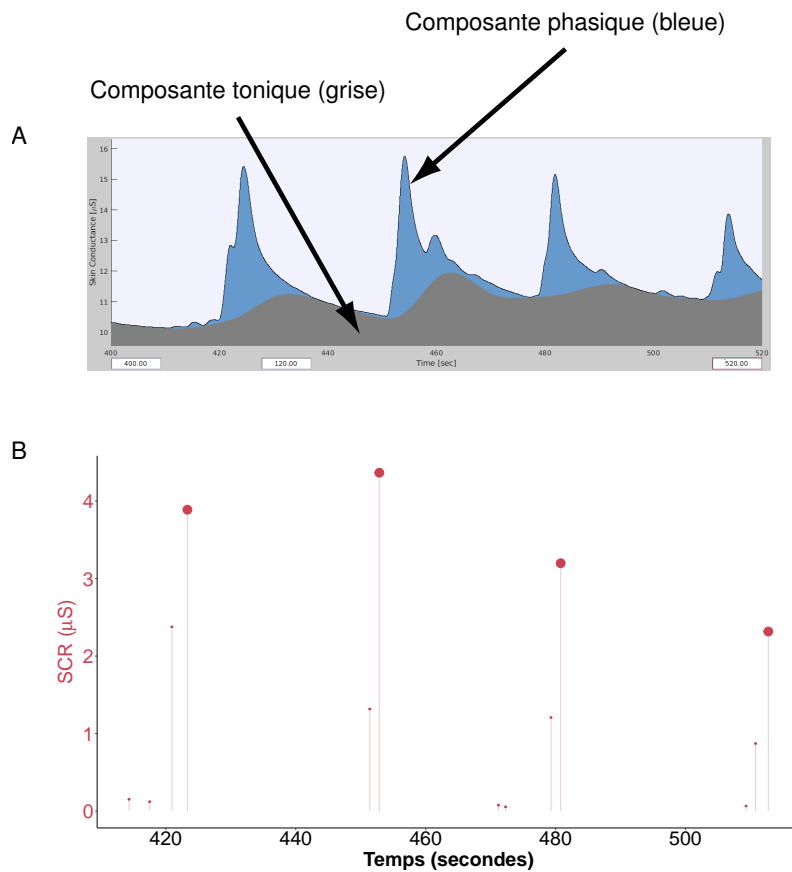


FIGURE 4.5 – Identification des composantes tonique et phasique de l'AED avec l'application Ledalab (Benedek et Kaernbach, 2010).

Note. Exemple d'enregistrement d'AED. Cadre A : capture d'écran des données représentées dans Ledalab après CDA (Benedek et Kaernbach, 2010). Le niveau tonique est représenté par la zone grise. La partie phasique est représentée par la zone bleue. Cadre B : données correspondantes qui ont été utilisées pour calculer les indicateurs d'AED. Les SCRs sont représentés par des segments verticaux dont la hauteur correspond à l'amplitude.

publications internationales concernant les contributions de ce projet de thèse, ces indicateurs ont été appelés « *number of skin conductance responses (nSCR)* » et « *maximum of skin conductance responses (mSCR)* ». La figure 4.5B illustre ces indicateurs dans le cadre d'un échantillon de données obtenu lors de la deuxième expérimentation.

4.2.2 Analyse de la perception explicite du risque

Deux méthodologies ont été employées pour étudier la perception du risque explicite évaluée en temps réel au cours des expérimentations.

- Une modélisation a été développée dans le but de prédire la dynamique de la perception explicite du risque. Les résultats de cette modélisation sont présentés et discutés dans le chapitre 5.
- Deux indicateurs ont été calculés sur la base de cette évaluation en temps réel pour à la fois caractériser les variations de la perception explicite et étudier sa relation avec la perception implicite du risque. Cette méthodologie a été employée dans les deux expérimentations et les résultats sont présentés et discutés dans les chapitre 6 et 7.

Un exemple d'évaluation explicite du risque réalisée par un participant au cours de la deuxième expérimentation est donné sur la figure 4.6. Cet exemple concerne l'évaluation de la perception du risque de collision au cours de quatre interactions VA-piéton. Lors des deux expérimentations, les interactions ont été suffisamment espacées dans le temps pour que l'évaluation du risque par les participants retombe à 0 à chaque fois.

Dans le cadre de ces travaux de thèse, la perception explicite implique une évaluation subjective du risque de collision par les participants. Cette évaluation a été appelée « *subjective assessment (SA)* ». Par ailleurs, deux indicateurs ont été calculés pour quantifier l'évaluation subjective du risque pour chaque interaction : le risque intégré évalué dans le temps et l'amplitude maximale du risque évalué. Le risque intégré correspond à l'aire sous la courbe d'évaluation explicite du risque. Cet indicateur a été appelé « *integrated subjective assessment (iSA)* ». Cet indicateur peut être considéré comme un indicateur dynamique, car il tient compte à la fois de l'amplitude et de la temporalité. Il correspond à l'aire sous la courbe illustrée en gris sur la figure 4.6. L'amplitude maximum du risque évalué a été appelée « *maximum of subjective assessment (mSA)* ». Cet indicateur est illustré par des points sur la figure 4.6. Il a été calculé pour quantifier l'intensité du risque perçu par les participants à chaque interaction VA-piéton.

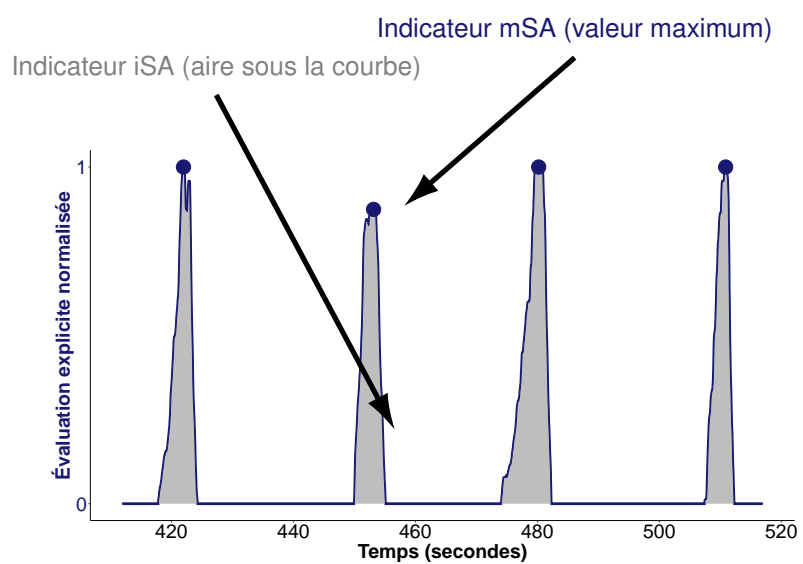


FIGURE 4.6 – Exemple d'évaluation explicite du risque.

MODÉLISATION PAR RÉPONSE IMPULSIONNELLE DE LA DYNAMIQUE DE PERCEPTION EXPLICITE DU RISQUE

Ce chapitre présente la première étude empirique qui a été menée au cours de ce projet de thèse. Comme mentionné dans le chapitre 3, elle a été menée à partir des données de la première expérimentation. Elle est présentée en cinq sections. La section 6.1 est une introduction à l'étude permettant de justifier ses objectifs. La section 5.2 présente la méthode expérimentale employée et les données exploitées. La section 5.3 présente la modélisation développée pour l'étude de la dynamique d'évaluation du risque explicite. La section 5.4 présente les résultats de l'étude. Enfin, la section 5.5 propose une discussion générale et une conclusion de l'étude. Les travaux présentés dans ce chapitre, ont donné lieu à deux communications internationales.

- Un poster nommé « Risk Assessment at the Driver Seat in an Autonomous Car » a été présenté lors de la conférence européenne *Human Factors and Ergonomics Society (HFES)* organisée à Nantes (Petit et al. 2019).
- La participation à la conférence internationale *Human-computer interaction international (HCII)* organisée en visioconférence à cause du contexte sanitaire. Cette communication a impliqué une présentation orale et la publication d'un article nommé « A Pilot Study on the Dynamics of Online Risk Assessment by the Passenger of a Self-driving Car Among Pedestrians » dans la collection *Lecture Notes in Computer Science* publié par Springer. (Petit et al.

2020).

5.1 Introduction et objectifs

Verberne et al. (2012) ont suggéré que les individus ne modifiaient pas nécessairement leurs règles sociales lorsqu'ils agissaient avec un système automatisé. Dans un contexte dynamique mixte où le véhicule autonome doit se frayer un chemin parmi les autres usagers, cela peut signifier que le conducteur attend de son véhicule qu'il agisse selon les mêmes règles sociales que lui, c'est-à-dire qu'il adopte le même style de conduite. Ce principe a notamment été confirmé par les résultats de Basu et al. (2017) qui ont montré que les passagers préféraient un style de conduite proche du leur (ou plutôt de ce qu'il pense être le leur).

Deux possibilités sont alors envisageables :

- le comportement du véhicule autonome (VA) pour négocier sa trajectoire parmi les autres usagers est proche de celui que le passager aurait adopté s'il conduisait. Dans ce cas, le passager ne perçoit aucun risque.
- le comportement du VA pour négocier sa trajectoire parmi les autres usagers n'est pas celui que le passager aurait adopté s'il conduisait. Dans ce cas, le passager pourrait percevoir un risque de collision.

Cette perception du risque pourrait constituer un frein à l'acceptation des VA, surtout lorsque ces derniers vont devoir naviguer en espace partagé parmi des usagers vulnérables comme des piétons.

L'objectif de cette étude est d'apporter des premiers éléments de compréhension de la perception du risque dans un contexte dynamique d'évitement de piétons. Ces éléments pourraient par la suite être utilisés pour ajuster le comportement des VA de sorte que ses passagers ne jugent jamais son comportement risqué.

Afin d'étudier la perception du risque, deux principaux facteurs d'évitement ont été manipulés :

- la valeur du *time-to-collision* (TTC) au moment où le véhicule initie l'évitement d'un piéton ;
- la distance de sécurité que le VA respecte avec le piéton lors de l'évitement.

Le premier facteur est inspiré des travaux de Lee (1976) sur la perception du risque de collision par le conducteur d'un véhicule en phase d'approche d'un obstacle. Ces travaux sont détaillés en première partie de ce manuscrit, dans le chapitre 2, section 2.3. En tenant compte de quelques approximations trigonométriques, Lee (1976) a démontré que le taux d'expansion de l'image d'un obstacle formée sur la rétine d'un observateur pouvait s'exprimer comme l'inverse du TTC. Ce taux d'expansion a été noté « τ » par Lee (1976) qui a suggéré qu'il s'agissait d'un critère de régulation de la vitesse d'un véhicule par son conducteur. Par la suite, d'autres études ont révélé que la valeur de τ était impliquée dans la perception du risque en conduite automobile (e.g., Bootsma et Craig, 2003 ; Kondoh et al., 2008 ; Lu et al. 2012 ; Lodinger et DeLucia, 2019). Dans le cadre de cette étude, il est attendu que le passager d'un VA perçoive un risque s'il juge que le VA entame sa manœuvre d'évitement d'un piéton trop tard.

Le second facteur s'inspire principalement des travaux de Gibson et Crooks (1938) qui ont suggéré que le conducteur percevait une zone dynamique, nommée *field of safe travel* (FoST) dans laquelle son véhicule pourrait se déplacer sans encourir de risque de collision. Le FoST serait subjectif et dépendrait, entre autres, de l'expérience du conducteur et des distances de sécurité qu'il souhaite respecter avec les autres usagers ou avec les obstacles qu'il percevrait. Plus de détails sur le FoST sont donnés en première partie de ce manuscrit, dans le chapitre 2, section 2.4. D'après ce principe, il était attendu que le passager d'un VA allait percevoir un risque de collision si le VA passait trop proche du piéton.

La manipulation des facteurs a donc donné lieu aux hypothèses suivantes :

- (H1) plus le TTC est faible lorsque le VA entame sa manœuvre d'évitement d'un piéton, plus le passager va percevoir un risque de collision ;
- (H2) plus la distance laissée entre le VA et le piéton est faible, plus le passager va percevoir un risque de collision.

Par ailleurs, cette étude propose également une modélisation de la dynamique d'évaluation de la perception du risque par un passager de VA à partir de la dynamique d'approche d'un piéton. Cette modélisation est basée sur l'estimation d'un processus autorégressif avec variable externe, communément appelé « *autoregressive with external input* (ARX) » (Ljung, 1987 ; Sanandaj et al. 2011, Tangirala, 2017). Concrètement, cette modélisation a permis de déterminer si la percep-

tion du TTC par le passager, au travers de τ , permettait d'expliquer et de prédire la dynamique d'évaluation explicite du risque de collision par le passager. Cette modélisation a donc permis d'examiner la troisième hypothèse de cette étude :

(H3) à l'approche d'un piéton, l'évolution de τ permet de prédire la dynamique d'évaluation de la perception du risque de collision par un passager.

5.2 Méthode

5.2.1 Participants

Pour cette expérience, 22 participants volontaires ont été recrutés, âgés de 18 à 52 ans ($M=27.05$, $SD=8.50$). Il s'agissait de 14 hommes et de 8 femmes. Le choix a été fait de sélectionner des participants ayant des degrés divers d'expérience de la conduite. Deux participants ont déclaré ne pas avoir le permis de conduire. Parmi les autres, quatre participants avaient le permis de conduire mais ont déclaré ne pas conduire, ou moins de 100 km/an. Les seize autres participants avaient le permis de conduire depuis 10.12 ans en moyenne ($SD=9.74$) et conduisaient avec des fréquences hétérogènes ($M=14037$ km/an, $min=500$ km/an, $max=80000$ km/an)

5.2.2 Plan d'expérience

Un plan d'expérience a été développé afin que tous les participants soient confrontés à une même série de 32 manœuvres d'évitement de piétons. L'ordre de présentation des piétons était aléatoire. De plus, les 32 manœuvres d'évitement étaient réparties en deux scénarios de sept minutes qui étaient présentés successivement avec une courte pause entre les deux. Le véhicule autonome était programmé pour rouler à une vitesse constante de 30 km/h dans une rue de 20 mètres de large. Le véhicule suivait une trajectoire rectiligne, sauf lorsqu'il devait éviter des piétons. Dans de vrais espaces partagés, la limite de vitesse est généralement plus basse. Selon le ministère britannique des Transports (2011), une vitesse ne dépassant pas 20 mph (soit un peu plus de 30 km/h) et de préférence inférieure à 15 mph (soit environ 25 km/h) est souhaitable. Cependant, des expériences préliminaires ont révélé qu'à faible vitesse du véhicule, les manœuvres d'évitement ne suscitaient qu'une très faible perception du risque chez les participants. Ce phénomène

peut s'expliquer par l'immersion relativement limitée du simulateur de conduite et la capacité des participants à prédire le comportement du véhicule autonome. Par conséquent, la vitesse de 30 km/h a été choisie pour augmenter les chances de susciter une perception du risque chez les participants. Un exemple de la trajectoire du véhicule est illustré à la figure 5.1. Après avoir dépassé un piéton, le véhicule ne revenait pas à sa position initiale mais maintenait sa position dans la voie jusqu'à l'évitement du piéton suivant. Chaque piéton marchait à 4.5 km/h et était espacé des autres de 25 secondes. Cela a permis d'étudier la perception du risque évalué pour chaque manœuvre d'évitement de manière indépendante.

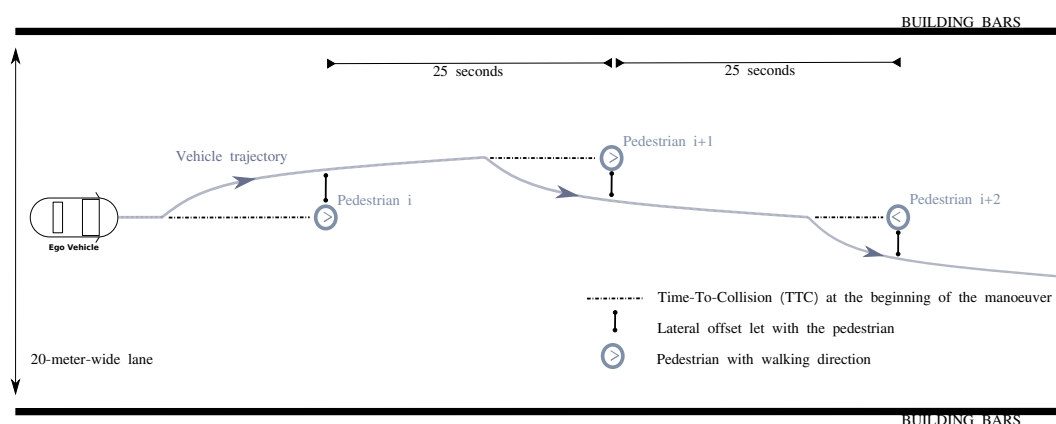


FIGURE 5.1 – Schématisation de la trajectoire du véhicule parmi des piétons.

5.2.3 Facteurs manipulés

Deux facteurs agissant successivement ont été manipulés (cf. figure 5.1). Tout d'abord, la valeur du TTC au moment du déclenchement du dépassement. En ligne droite, le TTC représente le temps restant avant que le véhicule n'atteigne un obstacle. Cette valeur dépendait à la fois de la distance et de la vitesse relative entre le véhicule et l'obstacle. Au cours de l'expérience, quatre niveaux de TTC ont été testés : 2.0, 2.5, 3.0 et 3.5 s. Ensuite, la distance latérale de sécurité respectée par le véhicule lors du dépassement. Pour les analyses, cette distance a été nommée « Offset ». Ce paramètre a été introduit pour vérifier si la proximité entre le véhicule et le piéton affectait le risque perçu par le participant. Trois niveaux du facteur Offset ont été testés : 0.5, 1.0 et 1.5 m.

Il n'a pas été possible de combiner tous les niveaux des deux facteurs. En effet,

la combinaison d'un TTC de 2.0 s et d'un Offset de 1.0 m ou 1.5 m a donné lieu à un comportement irréaliste du véhicule, causé par le logiciel de simulation de conduite. Par conséquent, seules huit des 12 combinaisons ont été testées (cf. table 5.1).

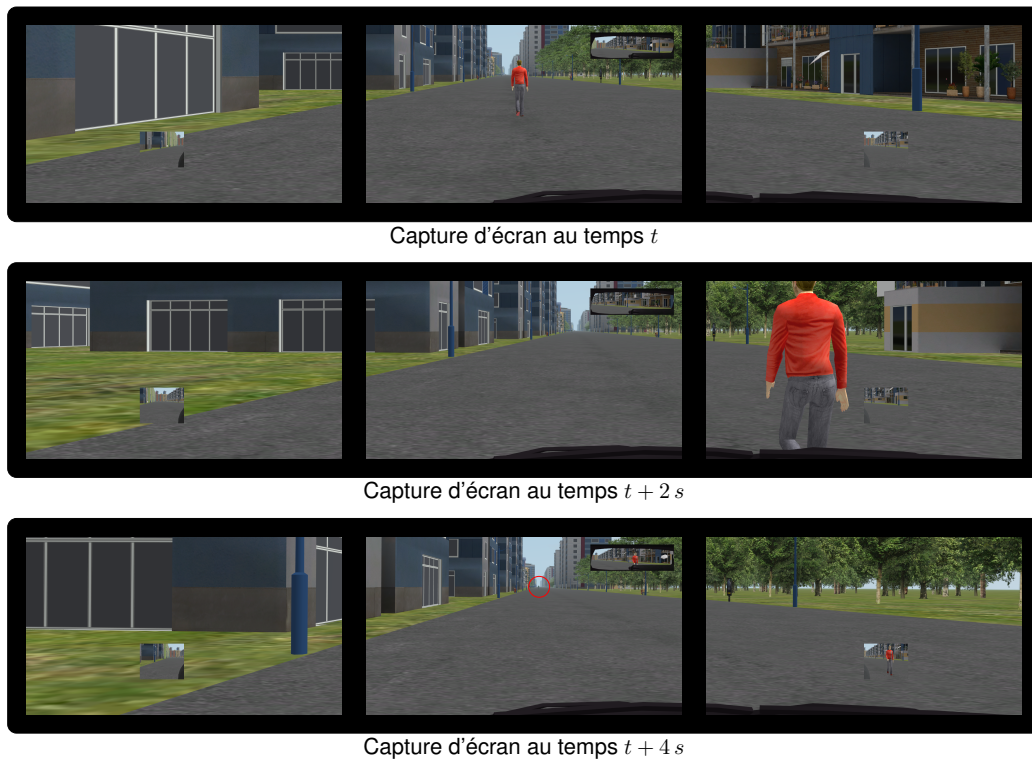
TABLE 5.1 – Fréquence des modalités pour les facteurs TTC et Offset manipulés au cours de la première expérimentation.

Offset (m)	TTC (s)				Nombre total
	3.5	3	2.5	2	
1.5	4	4	4	4	16
1	4	4	0	0	8
0.5	4	4	0	0	8
Nombre total	12	12	4	4	32

Deux facteurs supplémentaires ont été introduits pour rendre les simulations plus réalistes et imprévisibles. La moitié des piétons marchait dans le sens de la marche du véhicule, tandis que l'autre moitié marchait dans le sens opposé au véhicule. Dans un espace partagé, il n'existe aucune règle concernant la direction dans laquelle un véhicule doit aller pour éviter les autres usagers de la route. Pour cette raison, la direction des manœuvres d'évitement variait entre la gauche et la droite. Des analyses statistiques préliminaires, qui ne sont pas rapportées ici, ont démontré que ces deux facteurs n'ont pas affecté les résultats. Enfin, l'apparence de chaque piéton était choisie arbitrairement dans une liste d'une douzaine de possibilités (un homme ou une femme en t-shirt ou en costume, un adolescent en short, etc.). La figure 5.2 illustre ce que les participants ont vu lors d'une manœuvre d'évitement à gauche en trois captures d'écran.

5.2.4 Variable dépendante et calcul d'indicateurs

Dans cette étude, les deux indicateurs de perception subjective du risque, *integrated subjective assessment* (iSA) et *maximum of subjective assessment* (mSA), ont été utilisés. Le calcul de ces indicateurs a été présenté dans le chapitre 4 qui présente la méthodologie générale relative au calcul de ces indicateurs. Les valeurs de ces deux indicateurs ont été calculées pour chacune des 32 situations d'évitement de piéton. Elles ont ensuite été centrées et réduites par participant afin



Note. Le piéton évité est visible dans les rétroviseurs gauche et central. Le piéton suivant (entouré en rouge) est difficilement distinguable. Ceci est dû au fait que chaque manœuvre d'évitement a été séparée de 25 secondes pour assurer l'indépendance des mesures.

FIGURE 5.2 – Aperçus des écrans pendant une manœuvre de dépassement par la gauche.

de pouvoir comparer les valeurs obtenues pour tous les participants sur la même échelle de mesure. La figure 5.3 fait apparaître un exemple d'évaluation subjective du risque d'un participant au cours de quatre manœuvres d'évitement de piéton. Ces indicateurs ont été utilisés pour vérifier que les deux principaux facteurs manipulés, TTC et Offset, avaient eu une influence sur la perception du risque subjective.

Par ailleurs cette étude avait aussi pour objectif de modéliser la dynamique de perception du risque. Pour ce faire, l'évaluation subjective d'un participant pour chaque manœuvre d'évitement a aussi été considérée dans sa globalité comme une série numérique variant au cours du temps. Pour les analyses, cette série a été notée SA.

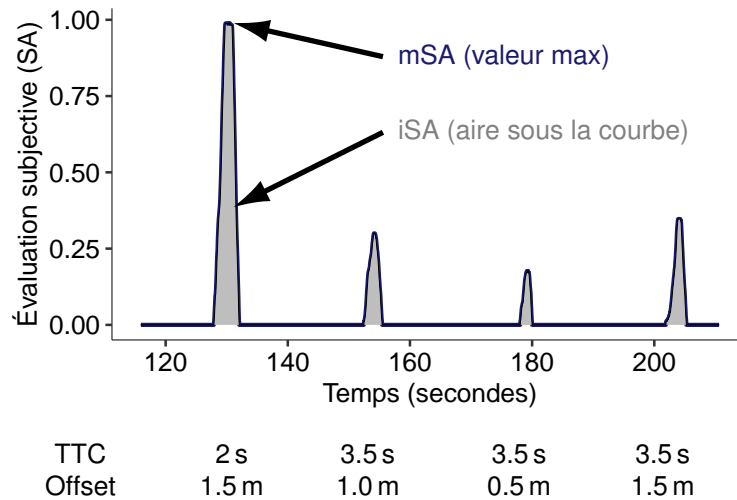


FIGURE 5.3 – Échantillon de l'évaluation subjective enregistrée pour un participant lors de la première expérimentation.

5.2.5 Procédure

À leur arrivée, les participants ont été invités à remplir deux formulaires. Un formulaire de consentement éclairé ayant été préalablement approuvé par le comité d'éthique sur les recherches non interventionnelles de l'université de Nantes (cf. annexe A.3). Puis, un formulaire pour fournir des informations sur leur âge, leur sexe et leur expérience de la conduite (cf. annexe A.4). Ils ont ensuite été informés de l'objectif et du déroulement de l'expérience. Chaque participant a ensuite été invité à s'asseoir dans le simulateur. À ce moment-là, le dispositif analogique leur a été présenté. Chaque participant était ensuite invité à s'installer sur le siège du simulateur de conduite et à prendre en main le dispositif d'évaluation subjective. Pour ce faire un scénario d'initiation leur était proposé afin qu'ils aient une bonne maîtrise du potentiomètre et une position confortable dans le siège du simulateur. Le détail de cette étape est donné dans le chapitre 4, section 4.2.

À l'issue de l'initiation, il était indiqué aux participants qu'ils allaient expérimenter 32 manœuvres d'évitement de piéton par un VA et, qu'au cours de l'expérimentation, aucune action sur les commande du simulateur n'était attendue. Enfin, il était rappelé aux participants la consigne principale de l'expérimentation : « utiliser le potentiomètre pour évaluer en temps réel le risque de collision du véhicule autonome avec les piétons ».

5.3 Présentation de la modélisation par réponse impulsionnelle

La modélisation de la dynamique d'évaluation subjective du risque par les participants a nécessité l'estimation d'une réponse impulsionnelle (RI) relative pour chaque participant et chaque manœuvre d'évitement. Formellement, une RI est une fonction dynamique modélisant la réaction quantitative d'un système confronté à un stimulus unitaire (une impulsion de Dirac). Dans cette étude, la RI a été calculée à l'aide d'un modèle autorégressif avec entrée exogène caractérisé par trois paramètres notés n_a , n_b et n_k .

- n_a : le nombre de composantes auto-régressives, également appelés sorties.
- n_b : le nombre de composantes externes prises en compte.
- n_k : le temps avant que les entrée externes n'affectent la sortie. Ce nombre est souvent appelé le temps mort du système.

Par la suite, le modèle sera noté « ARX(n_a , n_b , n_k) » en tant qu'acronyme de l'expression anglaise « *autoregressive model with external input* » (Ljung, 1987 ; Sanandaj et al. 2011, Tangirala, 2017). En suivant cette modélisation, pour un temps donné t , la valeur du risque évaluée a été décomposée sous la forme :

$$SA(t) = \sum_{i=1}^{n_a} \alpha_i \cdot SA(t-i) + \sum_{j=0}^{n_b-1} \beta_j \cdot \tau(t-n_k-j) + \varepsilon(t), \quad (5.1)$$

où $\tau(t)$ est la valeur du taux d'expansion rétinienne de l'image du piéton perçue par le passager à un instant t , α_i et β_j sont des coefficients du modèle à estimer après avoir défini n_a , n_b et n_k et $\varepsilon(t)$ est un bruit blanc principalement attribué à l'erreur de mesure.

Suite à l'estimation des coefficients α_i et β_j , il est possible de représenter graphiquement la RI comme l'évaluation du risque en réponse à la perception d'un stimulus unitaire (i.e., $\tau = 1$) d'après l'égalité suivante :

$$RI(t) = \sum_{i=1}^{n_a} \alpha_i \cdot RI(t-i) + \sum_{j=0}^{n_b-1} \beta_j \cdot \tau(t-n_k-j), \quad (5.2)$$

où

$$\tau(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t = 0, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Toutes les manœuvres d'évitement ont été traitées indépendamment et les coefficients optimaux ont été calculés sur MATLAB en utilisant la *toolbox* d'identification de système (2018). Les coefficients optimaux ont été déterminés par optimisation de l'erreur quadratique moyenne normalisée (NRMSE) calculée d'après la formule suivante :

$$\text{NRMSE}(\text{SA}, p) = 1 - \sqrt{\frac{\sum_t (\text{SA}(t) - p(t))^2}{\sum_t (\text{SA}(t) - \bar{\text{SA}})^2}} \quad (5.3)$$

où $\text{SA}(t)$ est la série d'évaluation de la perception du risque de collision réalisée par un participant au cours d'une manœuvre d'évitement de piéton, $\bar{\text{SA}}(t)$ est la valeur moyenne de l'évaluation et $p(t)$ est la série de valeurs prédites par la modélisation.

La fonction de perte NRMSE résume les différences observées entre les données observées et prédites en tenant compte de la dispersion réelle des données observées. Une telle mesure de performance renvoie toujours une valeur inférieure à 1. Plus le NRMSE est proche de 1, plus les valeurs prédites sont proches des vraies valeurs.

Avant d'estimer les coefficients α_i et β_i (cf. équation 5.1), les paramètres n_a et n_b du modèle ARX ont été sélectionnés. Aucune hypothèse n'ayant été privilégiée, les performances ont été calculées pour chaque combinaison de la grille de paramètres $(n_a, n_b) \in [1; 20]^2$. D'après cette analyse préliminaire, les valeurs $n_a = n_b = 2$ ont été finalement retenues pour tous les participants. Deux critères ont guidé ce choix de paramètres.

- D'une part, l'introduction de coefficients supplémentaires, en posant $n_a > 2$ et/ou $n_b > 2$ n'a donné lieu qu'à des gains de performance mineurs, c'est-à-dire des valeurs NRMSE uniquement meilleures de quelques pourcents.
- D'autre part, des faibles valeurs de n_a et n_b ont été privilégiées pour garder un modèle simple et interprétable. En particulier, le fait que $n_a = 2$ signifie que le risque évalué par un participant tient d'un historique de deux unités de temps. Cela permet de prendre en compte la contrainte physique inhérente d'une évaluation avec un potentiomètre. De plus, le fait que $n_b = 2$ révèle

un phénomène de mémoire à très court terme témoigne que le passager ne prend en compte la valeur de τ que pendant deux unités de temps.

Les réponses impulsionnelles calculées dans cette étude dépendent donc de cinq coefficients : $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$, et n_k .

Le paramètre n_k a été optimisé pour chaque manœuvre d'évitement en testant toutes les valeurs entre 0.1 seconde et 3 secondes par pas de 50 ms. Ce paramètre correspond au temps mort dans le processus d'évaluation du risque par un participant. Il peut être interprété comme le temps de latence entre la perception de τ et son impact sur l'évaluation du risque par le participant. Le fait que n_b ait été fixé à 2 a pour conséquence que le risque évalué à un instant t dépend de $\tau(t - n_k)$ et $\tau(t - n_k - 1)$. Pour l'optimisation, la limite inférieure de 0.1 s (soit 100 ms) a été choisie car il s'agit de l'intervalle de temps minimum requis de perception d'un stimulus pour un Humain (Lieury, 2015). La limite supérieure de 3 s a été choisie arbitrairement en tenant compte des données. La valeur optimisée du paramètre n_k a été notée n_k^{opt} .

En plus de l'estimation du modèle ARX($n_a = 2, n_b = 2, n_k = n_k^{\text{opt}}$), la modélisation implique trois considérations supplémentaires.

- Pour ne pas déclencher trop précocement la RI, et par exemple modéliser une perception du risque non-nulle alors que le VA est à 100 m du piéton, les données n'ont été prises en compte que lorsque le TTC était à 5 secondes. Cette valeur seuil a été déterminée sur la base des données.
- Suite à une manœuvre d'évitement, certains participants revenaient très vite à la butée basse du potentiomètre. Dans ce cas, cela se traduisait par une RI fluctuant parfois en dessous 0 en fin de réaction avec pour conséquence une prédiction du risque évalué parfois négative. La valeur minimale de risque prédite par le modèle a donc été fixée à 0 après modélisation.
- Dans le cadre de l'expérimentation, la plupart des participants n'évaluaient plus de risque de collision directement ou quelques mètres après l'évitement d'un piéton. Pour tenir compte de ce phénomène, le risque prédit par la modélisation a été fixé à 0 à partir d'une certaine distance après l'évitement du piéton, noté d^{opt} . Cette distance a été optimisée parmi les valeurs $\{0, 5, 10, 15, 20\}$ pour chaque manœuvre d'après le critère NRMSE.

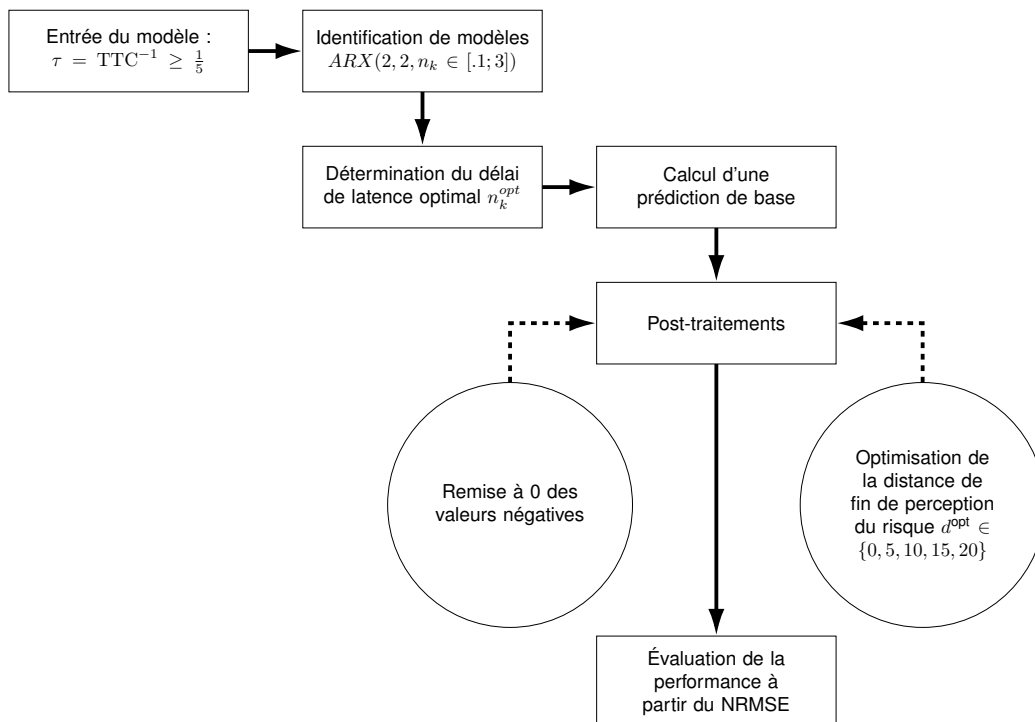


FIGURE 5.4 – Étape de modélisation la dynamique de perception du risque.

Un schéma récapitulant toutes les étapes de modélisation de la dynamique de perception du risque est illustré sur la figure 5.4.

Sur les 704 manœuvres d'évitements (22 participants \times 32 manœuvres), 25 manœuvres concernaient des données sans risque évalué, c'est-à-dire des manœuvres pour lesquelles les participants n'avaient pas évalué de risque de collision (potentiomètre restant en butée basse). Ces 25 situations ont été observées pour des participants différents. Douze d'entre elles concernaient deux participants n'ayant pas le permis de conduire. Une analyse préliminaire n'a révélé aucune autre tendance spécifique en termes de conditions d'évitement ou de profil des participants (genre, âge).

5.4 Résultats

5.4.1 Validation de l'effet des facteurs

Afin d'examiner l'effet des facteurs TTC et Offset sur la perception du risque explicite, les moyennes et les quartiles des indicateurs mSA et iSA ont été calculés

en fonction de chacun des deux facteurs. Ces calculs ont impliqué deux étapes successives :

1. calcul de la moyenne d'un indicateur par participant pour les huit croisements expérimentés des facteurs TTC et Offset. Cette étape a donné lieu à 22 moyennes (intra-participant) pour chacun des huit croisements ;
2. calcul de la moyenne entre tous les participants et d'un intervalle de confiance au niveau de risque de 5% autour de cette moyenne pour chacun des huit croisements.

Les intervalles de confiance sont illustrés graphiquement sur la figure 5.5. Ils sont centrés à la fois horizontalement et verticalement sur les valeurs moyennes correspondantes. Ces figures ont l'avantage de présenter l'évolution des indicateurs en deux dimensions. Elles apparaissent sous forme de grille à trois lignes et quatre colonnes correspondant respectivement aux trois valeurs du facteur Offset et aux quatre valeurs du facteur TTC. Ainsi, il est possible de voir à la fois l'évolution des indicateurs en fonction du TTC lorsque Offset=1.5 m (première ligne) et l'évolution des indicateurs en fonction de l'Offset lorsque TTC=3.5 s et TTC=3 s (première et deuxième colonnes).

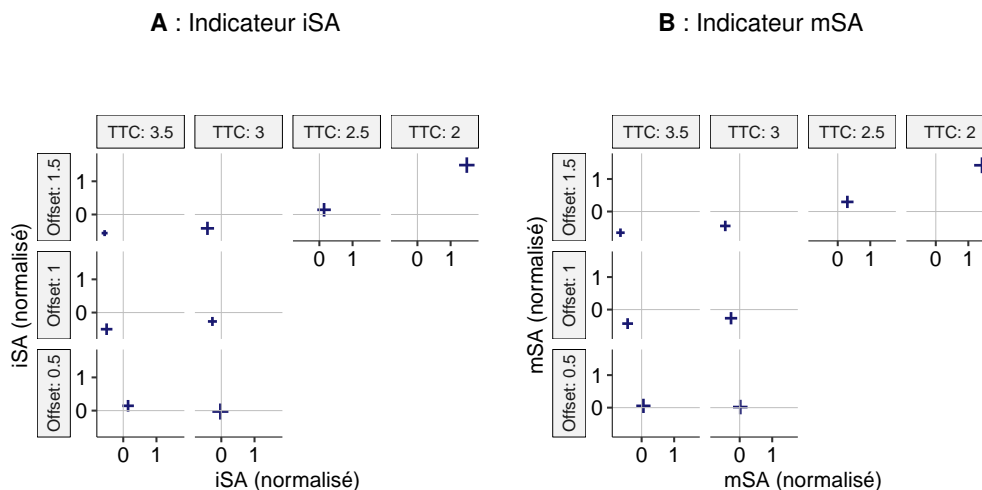


FIGURE 5.5 – Moyennes des indicateurs iSA et mSA en fonction des facteurs TTC et Offset.

Les figures 5.5A et 5.5B sont très similaires et donnent lieu aux même interpré-

tations. Les effets constatés pour les deux facteurs, TTC et Offset, confirment les hypothèses (H1) et (H2).

Au regard de la première ligne, le TTC a eu pour effet d'augmenter la perception du risque évaluée par les participants. Plus le TTC était faible au moment où le VA a entamé sa manœuvre d'évitement, plus les participants ont perçu un risque de collision (H1). Cette augmentation est plus marquée pour les deux plus faibles valeurs du TTC, 2.5 s et 2 s, qui ont donné lieu à des évaluations du risque en moyenne très supérieures aux autres. Cela suggère que le facteur TTC a une influence non-linéaire sur l'évaluation du risque. La perception du risque n'a émergé que lorsque le véhicule entamait l'évitement d'un piéton avec un TTC de 2.5 s ou 2 s.

D'après la première et la deuxième colonnes de chacune des figures 5.5A et 5.5B, le facteur Offset a également induit une augmentation de la perception du risque de collision. Plus la distance laissée entre le VA et le piéton était faible, plus les participants ont perçu un risque de collision (H2). On constate cependant que l'augmentation des moyennes est moins marquée en comparaison de celle observée pour le TTC. Cela suggère soit que les différences entre les niveaux du facteur Offset ont été moins perçues par les participants, soit que ce facteur influence moins la perception du risque de collision que le facteur TTC.

5.4.2 Performance de la modélisation

En raison de la grande quantité de données attendues, les performances ont été comparées et jugées à travers les valeurs médianes par participant. Les performances médianes obtenues pour chaque participant sont indiquées dans la table 5.2. Cette table rend compte également des informations biographiques indiquées par les participants en début d'expérimentation. Aucune influence de ces variables sur les performances de la modélisation n'a été trouvée. De plus, cette table présente les médianes des valeurs optimisées pour d'une part, le temps de latence entre le stimulus et la réponse du modèle ARX (n_k^{opt}) et d'autre part, la distance après l'évitement du piéton à partir de laquelle le participant ne percevait plus de risque (d^{opt}).

Il est possible de constater que la majorité des participants (11 sur 22) ne percevait plus de risque dès lors que le VA avait dépassé le piéton. Pour cinq participants

TABLE 5.2 – Performances médianes de la modélisation par participant.

Genre	Âge	Année(s) de permis	N	NRMSE	n_k^{opt} (s)	d^{opt} (m)
Performances médianes $\geq .6$						
H	19	1	32	0.76	2.10	1.5
H	29	11	31	0.76	0.50	0.0
H	22	4	30	0.75	1.60	3.0
F	40	22	32	0.73	1.25	0.0
H	27	7	32	0.73	1.60	0.0
F	26	4	32	0.72	2.05	3.0
F	25	5	32	0.71	0.60	0.0
F	25	7	31	0.70	0.50	6.0
H	21	3	32	0.68	1.05	0.0
H	31	16	32	0.67	0.35	0.0
F	45	27	28	0.67	0.55	0.0
H	18	0	27	0.66	2.40	18.0
F	20	3	31	0.65	0.40	0.0
H	23	5	32	0.63	0.20	0.0
H	28	0	32	0.63	2.20	6.0
F	24	5	28	0.62	1.00	1.5
Performances médianes $\leq .6$						
H	21	2	32	0.58	1.85	9.0
H	52	33	32	0.56	0.45	0.0
H	21	3	32	0.55	0.20	0.0
F	29	11	32	0.50	0.50	9.0
H	24	5	32	0.48	0.55	16.5
H	25	0	25	0.36	0.20	0.0

Le genre d'un participant est représenté par les lettres H et F qui correspondent respectivement au genre masculin et féminin. L'âge des participants et le nombre d'année(s) de détention du permis de conduire (B) ont été enregistrés en 2019. La colonne N correspond au nombre de manœuvres d'évitement de piéton où le participant a évalué un risque non nul. Les colonnes NRMSE, n_k^{opt} et d^{opt} correspondent aux valeurs médianes calculées par participant.

en revanche, l'évaluation de la perception du risque est généralement retombée à zéro plus tard, c'est-à-dire lorsque le véhicule s'éloignait au moins de 5 mètres du piéton évité. De plus, au regard des valeurs médianes de n_k^{opt} , deux observations peuvent être faites. Tout d'abord, le temps de latence a rarement été inférieur à 0.2 s. Cela confirme que, dans la majorité des cas, l'évaluation de la perception du risque a commencé à partir du moment où le TTC entre le VA et le piéton était inférieur à 5 s. Il s'agit du seuil de début d'analyse de l'évaluation de la perception du risque fixé dans la modélisation pour toutes les manœuvres d'évitement. Ensuite, pour quatre participants, le temps de latence médian a été au dessus de 2 s. Cela suggère que ces participants ont commencé à percevoir du risque essentiellement lorsque le VA arrivait proche d'un piéton et particulièrement lorsque le TTC entre le VA et le piéton était inférieur à 3 s.

Le seuil de 0.6, ou 60% (en considérant $100 \times \text{NRMSE}$), a été choisi pour distinguer les bonnes et les mauvaises performances de la modélisation en termes de NRMSE. Ce seuil a été choisi sur la base des observations suivantes : les performances inférieures à 60% reflétaient des séries prédites ne correspondant pas aux valeurs observées, par exemple avec une trop grande différence absolue entre les valeurs prédites et observées ; les performances supérieures à 60% reflétaient des séries prédites proches des valeurs observées avec, par exemple de faibles différences absolues avec les séries observées. Quatre exemples de résultats sont donnés sur la figure 5.6.

Sur les 22 participants, les performances médianes de 16 d'entre eux étaient supérieures à 0.6. La modélisation s'est donc avérée efficace pour plus de 70% des participants. Les profils des 6 participants restants ont été étudiés en détail, mais aucun modèle spécifique n'a été trouvé. L'une des raisons pour lesquelles le modèle a échoué est le profil spécifique de certaines évaluations du risque. Le modèle ARX suppose qu'une augmentation de l'entrée du stimulus (taux d'expansion rétinienne) devrait toujours entraîner une augmentation de la sortie (risque évalué). Lorsque ce n'était pas le cas, la procédure échouait systématiquement à estimer la RI. Par exemple, certains participants ont fait augmenter leur évaluation du risque par palier (e.g., figure 5.6.C et 5.6.D), c'est-à-dire en maintenant un même niveau de perception pendant une période prolongée de l'ordre de quelques secondes. Ces résultats permettent de valider l'hypothèse (H3) en révélant qu'il est possible

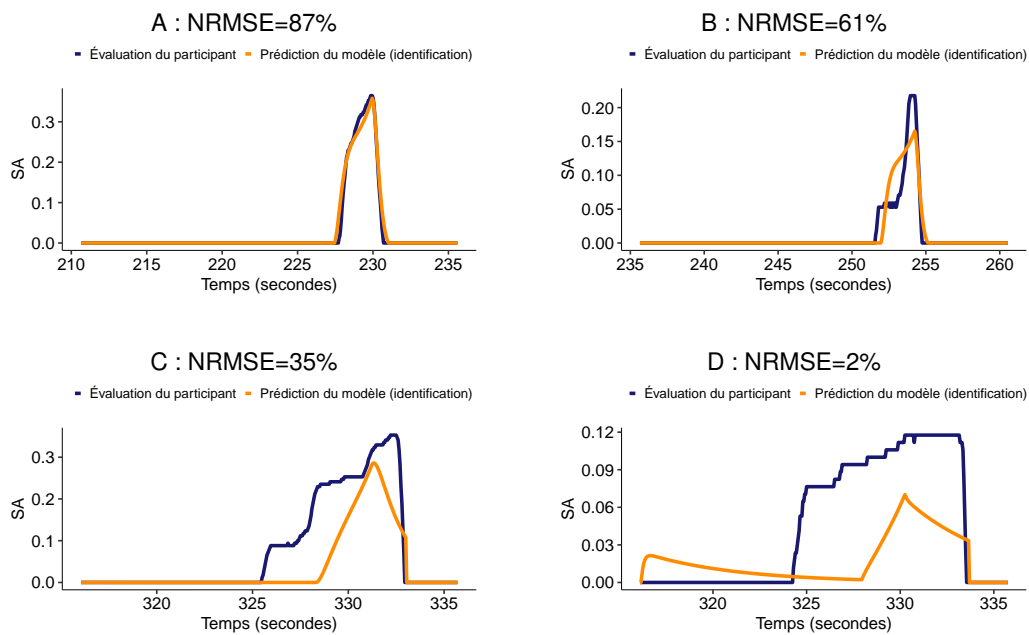


FIGURE 5.6 – Quatre exemples de performance de la modélisation.

d'utiliser τ pour caractériser la dynamique d'évaluation du risque des participants. Toutefois, le fait que certaines performances soient très faibles suggère qu'il est nécessaire d'intégrer d'autres paramètres externes dans la modélisation afin d'être en mesure de s'adapter à une dynamique plus complexe.

Après cette modélisation basée sur l'identification d'un modèle ARX, il a été question de tester si la RI d'un participant avait été constante au cours de l'expérimentation ou si elle avait au contraire varié en fonction des conditions d'évitement d'un piéton. Pour répondre à cette question, une procédure de validation a été menée. Cette procédure a consisté à essayer de prédire l'évaluation de la perception du risque de collision d'un participant pour une manœuvre d'évitement donnée à partir de son évaluation de la perception du risque à toutes les autres manœuvres. Plus précisément, pour une manœuvre d'évitement donnée, les valeurs médianes des paramètres $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, n_k^{\text{opt}}$ et d^{opt} , ont été calculées à partir des données d'identification de toutes les autres manœuvres. Cette méthode n'a pas donné lieu à des résultats probants. La performance médiane calculée par participant a toujours été inférieure avec la modélisation basée sur les paramètres d'identification du système ARX. Un exemple de résultat obtenu est présenté sur la figure 5.7. Sur cette figure, il est possible de voir que la forme de la réponse impulsionnelle utilisée

pour la validation est très différente de celle obtenue par la procédure d'identification. Elle est plus « aplatie », ce qui suggère que τ a un impact moins intense sur l'évaluation du risque. Elle présente également une queue lourde qui caractérise que τ a une influence plus longue sur l'évaluation du risque. Ces différences, pénalisent fortement le NRMSE qui est même négatif à cause du trop grand écart entre la vraie courbe d'évaluation du risque et la courbe des valeurs prédite (i.e., $\sum_t(\text{SA}(t) - p(t))^2 \gg \sum_t(\text{SA}(t) - \bar{\text{SA}})^2$). Les résultats suggèrent donc que la RI d'un participant n'est pas régulière mais plutôt relative à une manœuvre d'évitement donnée.

A : NRMSE=87%(Identification), -36%(Validation)

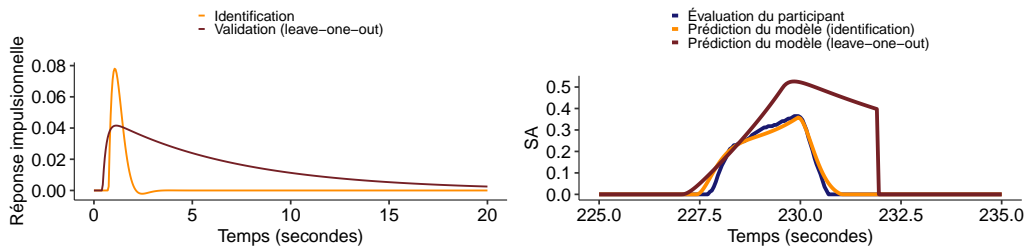


FIGURE 5.7 – Exemple de résultat obtenu pour la validation de la modélisation.

5.5 Discussion et conclusion

Dans cette étude, les trois hypothèses suivantes ont été examinées :

- (H1) plus le TTC est faible lorsque le VA entame sa manœuvre d'évitement d'un piéton, plus le passager va percevoir un risque de collision ;
- (H2) plus la distance laissée entre le VA et le piéton est faible, plus le passager va percevoir un risque de collision.
- (H3) à l'approche d'un piéton, l'évolution de τ permet de prédire la dynamique d'évaluation de la perception du risque de collision par un passager.

Les résultats ont permis de valider les hypothèses (H1) et (H2). Lorsque le TTC diminuait au moment où le VA entamait une manœuvre d'évitement de piéton, les indicateurs de perception du risque explicite ont augmenté, notamment lorsque le TTC était égale à 2.5 s et 2 s. Lorsque le facteur Offset représentant la distance

de sécurité laissée avec le piéton au moment du dépassement diminuait (de 1.5 m à 0.5 m), une augmentation des indicateurs de perception du risque explicite a également été constatée. Néanmoins, cette augmentation a été moins marquée que celle induite par l'influence du TTC.

Une modélisation basée sur l'estimation d'une réponse impulsionnelle (grâce à un processus ARX) a été testée pour examiner l'hypothèse (H3). Les résultats ont permis de valider partiellement cette hypothèse, mais suggèrent que l'évaluation explicite du risque par les participants est aussi influencée par des phénomènes autres que la perception de τ . En particulier, la modélisation a abouti à des mauvaises performances lorsque les participants ont évalué une perception du risque par pallier, c'est-à-dire en restant à la même valeur pendant une période prolongée. Par ailleurs, les résultats de cette étude ont également révélé que la réponse impulsionnelle induite par la perception de τ dépendait de la dynamique d'approche d'évitement d'un piéton par le VA.

Cette étude donne lieu à deux principaux résultats théoriques sur la perception explicite du risque de collision.

Le premier résultat est que l'évaluation de la perception explicite du risque de collision par les participants dépend de la dynamique d'approche et d'évitement d'un piéton par le VA. En particulier les participants ont évalué une plus forte perception du risque de collision lorsque le VA entamait tardivement sa manœuvre d'évitement. Le TTC perçu au travers de τ influencerait donc la perception du risque de collision. Ce résultat s'accorde avec la théorie de Lee (1976) sur l'influence de τ dans la perception du risque. Cette influence a également été confirmée dans les travaux de Bootsma et Craig (2003) ainsi que ceux de Kondoh et al. (2012). De plus, lorsque le VA passait plus proche d'un piéton, les participants ont évalué une plus forte perception du risque de collision. Cela suggère que le passager percevrait une zone de sécurité autour d'un piéton qu'il souhaiterait que le VA respecte. Le franchissement de cette zone de sécurité engendrerait une perception du risque. Il s'agit de l'hypothèse avancée dans les théories de Gibson et Crooks (1938) et de Boer (2006) appliquées aux distances de sécurité.

Le second résultat est que l'évaluation de la perception du risque de collision par un individu n'est pas nécessairement un processus continu. Dans certains cas expérimentés, l'évaluation des participants présentait des périodes de stagnation

traduisant une augmentation par palier. Deux hypothèses peuvent être faites pour expliquer ces paliers. Tout d'abord, les paliers pourraient signifier que les participants ont attendu que la situation évolue pour réajuster leur évaluation. Cela a pu se produire si, par exemple, les participants ont hésité ou s'ils se sont rendu compte qu'ils avaient augmenté leur évaluation trop vite. Ensuite, les paliers pourraient signifier une interruption du processus d'évaluation des participants. Cela a pu se produire si, par exemple, les participants ont été distraits soit pour des raisons personnelles, soit par d'autres éléments du scénarios (e.g., le décor) ou du simulateur (e.g., le tableau de bord). La première hypothèse pourrait être examinée en soumettant après l'expérimentation un questionnaire aux participants sur la fiabilité de leur évaluation. Les participants pourraient alors eux-même désigner les situations où ils se sont trompés ou ont hésité. Une perspective de recherche pour examiner la deuxième hypothèse pourrait être d'analyser le comportement oculaire des participants pour déterminer s'ils ont été focalisés sur la dynamique d'évitement d'un piéton ou si leur regard s'est porté sur d'autres éléments.

MODÉLISATION PAR RÉSEAU BAYÉSIEN DE LA PERCEPTION IMPLICITE ET EXPLICITE DU RISQUE DANS DES SITUATIONS DE DÉPASSEMENT DE PIÉTONS

Ce chapitre présente la deuxième étude empirique qui a été menée au cours de ce projet de thèse. Comme mentionné dans le chapitre 3, cette étude a été menée à partir des données de la première expérimentation. Dans le cadre de ce manuscrit, cette étude est présentée en cinq sections. La section 6.1 est une introduction à l'étude permettant de justifier ses objectifs. La section 6.2 présente la méthode expérimentale employée et les données exploitées. La section 6.3 présente la modélisation développée pour l'étude de la relation entre les perceptions implicite et explicite du risque. La section 6.4 présente les résultats de l'étude. Enfin, la section 6.5 propose une discussion générale et une conclusion de l'étude. Les travaux présentés dans ce chapitre, ont donné lieu à une publication internationale, nommée « Risk Assessment by a Passenger of an Autonomous Vehicle Among Pedestrians : Relationship Between Subjective and Physiological Measures », dans la revue *Frontiers in Neuroergonomics* (Petit et al. 2021)

6.1 Introduction et objectifs

6.1.1 Coexistence de deux types de perception du risque

Slovic et al. (2004) ont décrit deux systèmes de perception du risque qui interviennent dans les processus d'évaluation et de prise de décision lorsqu'un individu est confronté à un danger potentiel. Le risque en tant qu'analyse, nommé « *risk as analysis* », serait un système de perception du risque reposant sur un raisonnement conscient et utilisant la logique formelle. Ce système de perception du risque suppose que les individus perçoivent en analysant de manière rationnelle les conséquences encourues. Cependant, ce système de perception du risque, lent et coûteux en ressources cognitives, ne serait pas sollicité en cas de menace imminente. Slovic et al. (2004) ont suggéré l'existence d'un second système de perception prédominant dans ce type de situation, le risque en tant que sensation nommé « *risk as feelings* ». Ce système correspond à une manière rapide et intuitive de percevoir le risque basée sur les affects. Cette dualité de la perception du risque s'accorde avec la vision de Loewenstein et al. (2001), qui ont suggéré que la prise de décision résulte non seulement d'un traitement cognitif mais aussi d'une évaluation émotionnelle instinctive et spontanée. Par ailleurs, cette dualité de la perception du risque s'inscrit dans la problématique plus large de la distinction entre les processus cognitifs rapides, automatiques et inconscients (type 1) et ceux qui sont lents, laborieux et conscients (type 2) (Evans, 2008 ; Stanovich et Toplak, 2012 ; Evans et Stanovich, 2013). Le risque en tant qu'analyse appartiendrait aux processus de type 2, qui reposent sur la mémoire de travail et impliquent la simulation mentale de possibilités futures pour formuler des jugements explicites. En revanche, le risque en tant que sentiment appartiendrait aux processus de type 1, qui sont autonomes, ne nécessitent pas de mémoire de travail et sous-tendent le traitement implicite de l'information. Cependant, comme Evans et Stanovich (2013) l'ont justement souligné, la nature de la distinction entre les deux types de processus et leurs relations mutuelles ne sont pas univoques dans la littérature. Cette étude aborde cette question à travers le prisme de la perception du risque dans un contexte spécifique, celui des véhicule autonome (VA) naviguant dans des espaces partagé.

6.1.2 Mesures afférentes à chacun des types de perception du risque

Herrero-Fernández et al. (2020) ont associé le concept de « *risk as analysis* » à une évaluation subjective et le concept de « *risk as feelings* » à une évaluation objective basée sur l'état physiologique d'un individu. Ces deux méthodologies d'évaluation sont complémentaires. L'évaluation subjective consiste à mesurer la partie auto-réflexive de la perception du risque. Dans le cadre de la navigation en VA, cette évaluation subjective peut être réalisée en temps réel grâce à de petits dispositifs dédiés (cf. chapitre 2, section 2.4). Les variables physiologiques fournissent des informations sur les manifestations physiques de la perception du risque. Choi et al. (2019) ont considéré qu'à un certain niveau, la perception du risque pouvait impliquer l'intervention du système nerveux sympathique (SNS). Ce dernier veille à ce que des adaptations physiologiques se produisent en vue d'une fuite ou d'une lutte lorsqu'une personne est confrontée à une menace. Ces adaptations peuvent se manifester par une augmentation des rythmes cardiaques et respiratoires et par des variations de l'activité électrodermale (AED). Choi et al. (2019) ont considéré que la perception du risque pouvait entraîner des changements substantiels de l'AED et que, par conséquent, l'AED pourrait être un bon indicateur de la perception du risque, en particulier grâce à l'analyse des *skin conductance responses* (SCRs). Les SCRs ont déjà été utilisés comme indicateurs du niveau de stress ou de l'inconfort chez des individus (cf. chapitre 2, section 2.4 et 2.5).

6.1.3 Objectifs de l'étude

Cette étude est basée sur la première expérimentation qui est présentée dans le chapitre 5. Elle porte sur l'analyse de la relation entre une mesure de perception explicite du risque de collision et une mesure de perception implicite du risque réalisée en analysant les SCRs chez les participants. Deux facteurs liés à la dynamique d'évitement d'un piéton par le VA ont été manipulés : la valeur du *time-to-collision* (TTC) au moment où le véhicule initie une manœuvre d'évitement d'un piéton et la distance latérale laissée avec le piéton au moment du dépassement (appelé Offset dans l'étude). Il a été supposé que ces deux facteurs avaient une influence sur les deux types de mesure de perception du risque de collision des passagers. Il a été supposé que la perception du risque augmentait lorsque le TTC diminuait (Lee,

1976 ; Bootsma et Craig, 2003). Il a également été supposé que la perception du risque augmentait lorsque la distance entre le VA et le piéton diminuait (Gibson et Crooks, 1938).

Le TTC et l'offset ont été manipulés pour étudier la relation entre les deux types de mesures de perception du risque (c'est-à-dire l'évaluation subjective et les SCRs). L'objectif était de déterminer si l'indépendance des deux mesures de perception du risque était probable, compte tenu des données et des effets des facteurs indépendants. Pour ce faire, des indicateurs ont été calculés à partir de l'évaluation subjective réalisée par les participants et leurs SCRs. L'objectif de cette étude était de vérifier si les données expérimentales étayaient l'indépendance entre les deux types d'indicateur conditionnellement à l'effet des facteurs manipulés. Les deux hypothèses suivantes ont été envisagées.

- H0 : les indicateurs d'évaluation subjective d'une part et de SCR d'autre part, sont indépendants conditionnellement à l'influence des facteurs. Il n'y a donc pas de preuve d'une relation entre les deux types de perception du risque.
- H1 : les indicateurs d'évaluation subjective d'une part, et de SCR d'autre part, ne sont pas indépendants dans au moins une combinaison des facteurs. Il y a donc une preuve de la relation entre les deux types de perception du risque.

Pour répondre à ces deux hypothèses théoriques, une analyse basée sur des réseaux bayésiens hybrides a été conduite. Cette méthode a permis de déterminer la meilleure structure de relations (c'est-à-dire celle qui correspondait le mieux aux données) entre les facteurs manipulés et les mesures dépendantes. Plus précisément, les réseaux bayésiens ont été utilisés pour déterminer si une relation entre les deux types d'indicateur de perception du risque pouvait exister et être pertinente compte tenu des effets des facteurs TTC et Offset.

Par la suite, une analyse des coefficients estimés dans les meilleurs réseaux bayésiens a été réalisée pour confirmer l'influence des facteurs sur les deux types d'indicateurs. Cette analyse a été menée pour valider le fait qu'un TTC plus faible au début d'une manœuvre d'évitement ou une distance latérale plus faible entre le VA et un piéton entraînait un niveau de perception du risque de collision plus élevé.

6.2 Méthode

6.2.1 Participants

Cette étude est basée sur la même expérimentation que celle présentée dans le chapitre 3. Toutefois, parmi les 22 participants recrutés, seuls 20 participants (13 hommes et 7 femmes) présentaient des mesures d'AED exploitables. Des erreurs de mesures ont été observées pour les deux autres participants. Ces erreurs sont imputables soit à une mauvaise réception du signal, soit à des mouvements parasites trop fréquents de la part des participants. Les 20 participants considérés avaient entre 18 et 52 ans ($M = 27.1$, $SD = 8.9$). Dix-huit participants étaient titulaires d'un permis de conduire depuis 9.8 ans en moyenne ($SD = 9,5$) et parcouraient environ 11 400 km par an ($SD = 19 100$). Les deux participants restants ne possédaient pas de permis de conduire, l'hypothèse étant que leur perception du risque dépendait des mêmes processus que les conducteurs ordinaires. En outre, la possession d'un permis de conduire n'était pas considérée comme une condition préalable pour être passager d'un véhicule entièrement autonome. L'inspection préliminaire des enregistrements de l'AED et des évaluations subjectives a confirmé que les réponses des deux participants sans permis n'étaient pas distinctes de celles des autres.

6.2.2 Indicateurs de perception implicite et explicite du risque

Les indicateurs *integrated subjective assessment* (iSA) et *maximum of subjective assessment* (mSA) ont été utilisés pour l'analyse de la perception explicite ou subjective du risque de collision. Le calcul de ces indicateurs a été présenté dans le chapitre 4 de méthodologie générale.

Comme pour les données d'évaluation subjective, deux indicateurs ont été calculés pour quantifier l'AED. Il s'agit de l'indicateur *maximum of skin conductance responses* (mSCR) représentant l'amplitude maximale des SCRs, et de l'indicateur *number of skin conductance responses* (nSCR) représentant le nombre de SCRs. Ces indicateurs ont été utilisés pour analyser la perception implicite du risque de collision, leur calcul est détaillé dans le chapitre 4. Pour chaque manœuvre d'évitement, les SCRs relatives à une manœuvre d'évitement n'ont été sélectionnées que si leur apparition se produisait dans un certain intervalle de temps autour du

moment où le VA passait juste à côté d'un piéton. Pour déterminer le début de cet intervalle, il a été supposé qu'une manœuvre d'évitement ne pouvait susciter des SCRs chez un participant qu'à partir du moment où ce dernier commençait à évaluer un risque de collision. Ainsi le début de cet intervalle correspond à la valeur moyenne de début d'évaluation du risque par un participant relativement au moment où le VA passait juste à côté d'un piéton. La détermination de la fin de cet intervalle est basée sur les résultats de la littérature (Boucsein, 2012; Droulers, 2013). Les SCRs ont été associées à une manœuvre d'évitement que si elles se produisaient dans les 3 s suivant le moment où le VA passait juste à côté d'un piéton.

La figure 6.1 présente un échantillon de données analysées dans cette étude. Elle permet notamment d'identifier les SCRs qui ont été mises en relation avec l'évaluation subjective des participants.

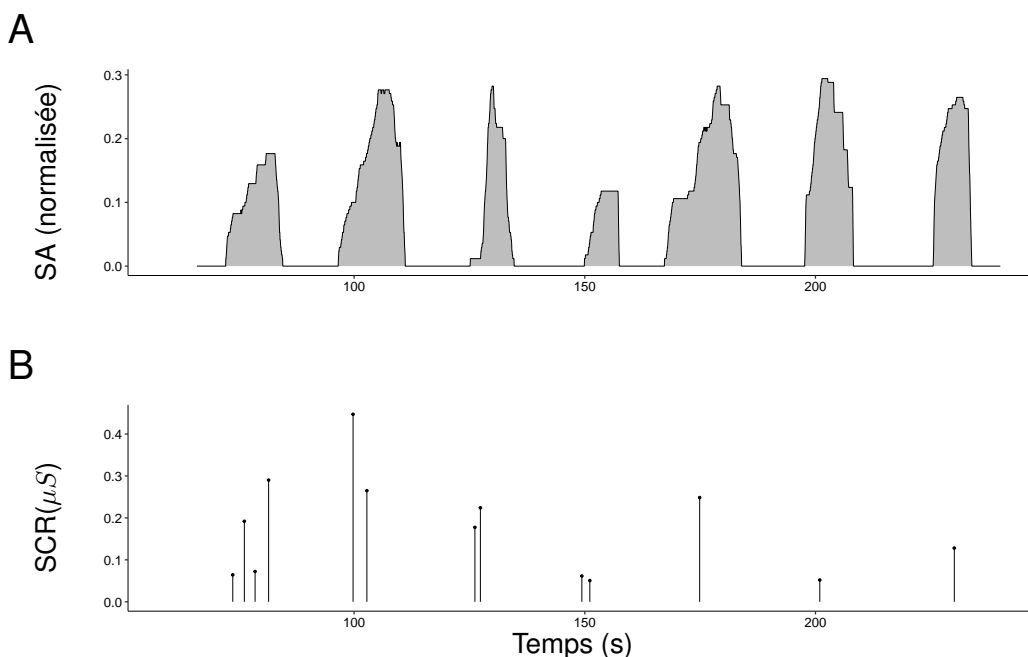


FIGURE 6.1 – Exemple de données d'évaluation subjective du risque et de SCRs associées.

Note. Partie A : évolution de l'évaluation subjective au cours de sept manœuvres d'évitement. L'évaluation subjective est toujours de 0 entre les manœuvres. L'indicateur mSA correspond à la valeur maximale de chaque manœuvre. L'indicateur iSA correspond à l'aire sous chaque courbe. Partie B : SCRs pendant les sept manœuvres d'évitement. L'indicateur mSCR correspond à l'amplitude maximale des réponses. L'indicateur nSCR correspond au nombre de réponses de conductance de la peau.

6.2.3 Procédure

Cette étude est issue de la même expérimentation que celle présentée dans le chapitre 5. Elle est donc basée sur la même procédure expérimentale et le même matériel (cf. chapitre 4). Les participants étaient équipés des capteurs de mesure d'AED en début d'expérience après avoir rempli les formulaires de consentement et d'informations. Plus précisément, juste avant de s'installer sur le siège du simulateur de conduite pour entamer la phase d'initiation à l'appareil analogique d'évaluation de la perception du risque de collision avec les piétons.

6.3 Analyse de données

L'analyse de cette étude est basée sur la modélisation de réseaux bayésiens permettant d'étudier la relation pouvant exister entre les indicateurs d'évaluation subjective du risque et les indicateurs de réponse de la conductance cutanée des participants et les effets des facteurs. Un réseau bayésien est représenté par son graphe acyclique orienté (*directed acyclic graph* (DAG)), qui illustre graphiquement les relations entre ses nœuds (Scutari, 2015, chap. 3). Un nœud représente un indicateur qui est associé à une distribution statistique dont les paramètres peuvent dépendre des autres nœuds. Une flèche est utilisée pour spécifier que la distribution d'un nœud dépend d'un autre nœud. Dans cette étude, tous les DAGs contiennent quatre nœuds. Deux nœuds représentent les facteurs indépendants TTC et Offset. Ils ont tous deux été affectés à des distributions discrètes dont les distributions de probabilité ont été déterminées par la fréquence de leurs niveaux dans le plan d'expérience (cf. table 6.1).

Deux autres nœuds, dénommés « SA » et « SCR », ont été respectivement affectés aux indicateurs d'évaluation subjective et de SCR. Le nœud SA désignait soit l'indicateur iSA, soit l'indicateur mSA. Le nœud SCR désignait soit l'indicateur nSCR, soit l'indicateur mSCR.

Après avoir effectué une analyse des distributions des deux indicateurs d'évaluation subjective, les données initiales ont été transformées pour corriger une asymétrie positive. Un exposant de $\frac{1}{2}$ a été appliqué aux valeurs mSA et un exposant de $\frac{1}{2}$ aux valeurs iSA. De plus, afin de pouvoir attribuer une distribution globale à tous les participants, les indicateurs mSA et iSA, en premier lieu transformés,

TABLE 6.1 – Fréquence des modalités pour les facteurs TTC et Offset.

Offset (m)	TTC (s)				Fréquence totale
	3.5	3	2.5	2	
1.5	0.125	0.125	0.125	0.125	0.500
1	0.125	0.125	0	0	0.250
0.5	0.125	0.125	0	0	0.250
Fréquence totale	0.375	0.375	0.125	0.125	1.000

ont ensuite été centrés et standardisés par participant. Ces transformations ont été effectuées afin d'utiliser des distributions gaussiennes pour le nœud SA dans les réseaux bayésiens. Pour s'assurer de la pertinence de cette hypothèse sur les distributions, un test de Shapiro-Wilk a été effectué. Les résultats sont présentés dans le table 6.2. Les transformations effectuées sur les indicateurs ont donné lieu à des distributions plus symétriques pouvant être supposées normales ($p > 0,5$) pour les deux variables.

TABLE 6.2 – Effet de la transformation et de la normalisation des indicateurs d'évaluation subjective.

Variable	Statistiques descriptives				Test de Shapiro-Wilk	
	n	M	SD	γ_1	W	p
Valeurs brutes						
mSA	640	0.401	0.252	0.653	0.951	0.000
iSA	640	1.548	1.426	1.431	0.865	0.000
Valeurs normalisées						
$(mSA)^{\frac{1}{2}}$	640	0.000	0.985	-0.010	0.999	0.974
$(iSA)^{\frac{1}{3}}$	640	0.000	0.985	-0.016	0.998	0.701

Note. Les variables brutes correspondent aux données originales. Les données transformées correspondent aux variables centrées et réduites pour chaque individu. Ces opérations ont été réalisées après avoir élevé l'indicateur mSA à la puissance $\frac{1}{2}$ et l'indicateur iSA à la puissance $\frac{1}{3}$.

Une analyse préliminaire a révélé que les indicateurs SCR avaient 46% d'exac-
tement zéro. Cela signifie que seule une partie des manœuvres d'évitement pro-
duisait des réponses physiologiques. Pour cette raison, une distribution Tweedie
(Dunn et Smyth, 2005, 2008, 2018) a été utilisée pour les indicateurs du nœud

SCR dans les réseaux bayésiens. Cette distribution, positive et continue, autorise les valeurs nulles. Cette distribution à trois paramètres est notée $\text{Tw}_p(\mu, \phi)$. Le paramètre μ est la moyenne de la distribution, $\phi > 0$ est le paramètre de dispersion et p exprime la relation entre la variance et la moyenne de la distribution de sorte que la variance est égale à $\phi\mu^p$, avec $1 < p < 2$. En pratique, cette distribution, convient bien à la nature des indicateurs étudiés. Cela permet de modéliser la distribution strictement positive des indicateurs tout en autorisant le fait qu'un participant ait pu ne présenter aucune SCR pour une situation donnée. La distribution Tweedie est souvent appelée Poisson-Gamma. En effet une variable aléatoire Y suivant une distribution $\text{Tw}_p(\mu, \phi)$ peut être présentée comme

$$Y = X_1 + X_2 + \dots + X_N, \quad (6.1)$$

où N est une variable aléatoire de loi de Poisson et les X_i sont des variables aléatoires identiquement distribuées de loi Gamma. D'après Dunn et Smyth (2017), il est possible de démontrer que

$$P(Y = 0) = \exp\left(-\frac{\mu^{2-p}}{\phi(2-p)}\right). \quad (6.2)$$

L'équation 6.2 a été utilisée dans l'analyse afin d'obtenir une estimation de la probabilité qu'un indicateur de SCR (nSCR ou mSCR) soit égal à 0.

La distribution Tweedie a donc permis d'estimer la distribution des indicateurs nSCR et mSCR, ainsi que la probabilité de ne pas observer de SCR. Afin de considérer les distributions globales et d'homogénéiser les fluctuations entre les données de chaque participant, les indicateurs mSCR et nSCR ont été standardisés par participant. Comme dans l'exemple fourni par Dunn et Smyth (2005), un diagnostic initial a été effectué pour vérifier que l'approche de Tweedie était adéquate pour estimer les paramètres de la distribution.

Les paramètres de toutes les distributions ont été estimés à l'aide du logiciel R. D'après la méthode présentée par Denis et Scutari (2015), les paramètres de distribution des facteurs TTC et Offset ont été fixés pour correspondre aux fréquences d'observation de chaque niveau. Le calcul des paramètres de distribution gaussienne concernant les indicateurs iSA et mSA a été basé sur les estimateurs du maximum de vraisemblance des moyennes et des écarts-types. Les paramètres

de la distribution Tweedie concernant les indicateurs mSCR et nSCR ont été estimés avec les méthodes développées dans les paquets *tweedie* (Dunn and Smyth, 2005, 2008 ; Dunn 2017) et *cplm* (Zhang, 2013).

En suivant la méthode présentée par Denis et Scutari (2015), lorsqu'un facteur influençait la distribution d'un nœud dépendant (SA ou SCR), les paramètres ont été estimés pour chaque valeur du facteur. Par exemple, huit paramètres ont été estimés pour la distribution d'un nœud gaussien qui était influencé exclusivement par le facteur TTC (c'est-à-dire une moyenne et un écart-type pour chacun des quatre niveaux de TTC).

Quarante-huit réseaux ont été calculés à partir des quatre indicateurs mentionnés précédemment (iSA, mSA, nSCR et mSCR). Les DAGs de ces réseaux sont représentés sur la figure 6.2. La prise en compte de quatre indicateurs plutôt que deux (c'est-à-dire un pour la SA et un pour le SCR) a permis de multiplier par quatre la quantité de données utilisées pour analyser l'effet des facteurs et la relation entre les deux types de perception des risques.

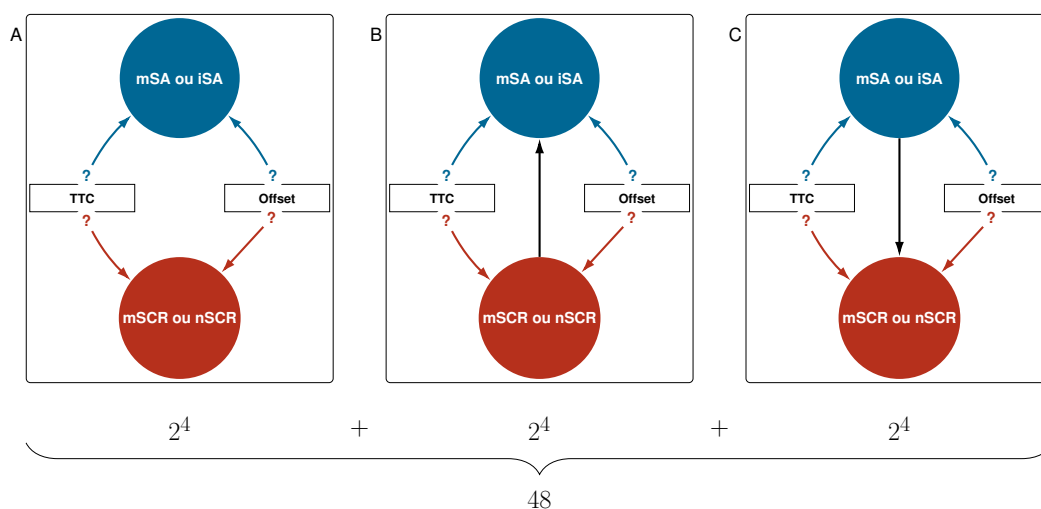


FIGURE 6.2 – Graphes des réseaux bayésiens testés dans la deuxième expérimentation.

Note. Le cadre A illustre les 16 DAGs qui ne contiennent pas de relation entre les nœuds SA et SCR. Le cadre B illustre les 16 DAGs qui contiennent une relation entre le nœud SCR vers le nœud SA. Le cadre C illustre les 16 DAGs qui contiennent une relation entre le nœud SA vers le nœud SCR. Seuls les graphes du cadre A sont compatibles avec l'hypothèse d'indépendance entre l'évaluation subjective et la réponse de la conductance de la peau.

Pour comparer les réseaux bayésiens et sélectionner le plus vraisemblable au regard des données, le *Bayesian information criterion* (BIC) a été utilisé (Schwarz,

1978). La procédure a consisté à privilégier le réseau bayésien avec BIC le plus faible (Denis et Scutari, 2015, p. 110). Pour un nœud de réseau bayésien, le BIC a été calculé selon la formule suivante :

$$BIC = -2 L_n(\theta) + p \log(n), \quad (6.3)$$

où $L_n(\theta)$ est la log-vraisemblance calculée étant donné les p paramètres de distribution estimés, notés θ , à partir des n observations considérées. Le BIC permet de comparer facilement des réseaux bayésiens non imbriqués. De plus, il s'agit d'un critère conservateur, c'est-à-dire qui a tendance à privilégier les modèles dépendant de l'estimation de moins de paramètres (Raftery, 1999). En d'autres termes, de nouvelles relations entre les nœuds ne seront significatives pour le BIC que si elles permettent d'augmenter suffisamment les vraisemblances calculées à chacun des nœuds. Dans le cas spécifique du réseau bayésien, le calcul du BIC a été décomposé comme la somme des BIC calculés aux quatre nœuds (Scutari, 2015, p. 19) :

$$BIC^{\text{Total}} = BIC^{\text{TTC}} + BIC^{\text{Offset}} + BIC^{\text{SA}} + BIC^{\text{SCR}}, \quad (6.4)$$

où BIC^{\bullet} est la valeur du critère d'information bayésien calculé pour un nœud donné. Cette équation résulte du fait que la log-vraisemblance jointe des nœuds d'un réseau bayésien peut elle-même être décomposée comme la somme des log-vraisemblances de chacun des nœuds (conditionnées aux relations du réseau bayésien).

Les degrés de preuve de Kass et Raftery (Raftery, 1995, p. 139) ont été utilisés pour discuter des écarts entre les valeurs de BIC après le processus de classement. Ces seuils sont détaillés dans la table 6.3. Ils constituent des lignes directrices pour comparer les réseaux bayésiens entre eux et discuter de la significativité des relations entre les nœuds du réseau (facteurs et indicateurs). Les écarts supérieurs à 2, 6 ou 10 entre deux valeurs BIC ont été respectivement considérés comme positifs, forts ou très forts.

Cela a permis d'examiner les hypothèses complémentaires H0 et H1. L'hypothèse H0, supposant l'indépendance entre l'évaluation subjective et les SCRs, ne pouvait être validée que si les meilleurs réseaux bayésiens (obtenus pour chaque

TABLE 6.3 – Degrés de preuve de Raftery (1995).

Différence de BIC	Degré de preuve
[0; 2]	Faible
]2; 6]	Positive
]6; 10]	Fort
> 10	Très fort

Note. Le classement entre les réseaux bayésiens a été effectué sur la base de leurs scores BIC. Ce tableau (extrait de Raftery, 1995, p.139) indique les seuils qui ont été utilisés pour discuter du degré de preuve des relations contenues dans un réseau par rapport à celles d'un autre réseau.

combinaison d'indicateurs) ne contenaient pas de relation entre le nœud SA et le nœud SCR. Inversement, si l'un des meilleurs réseaux contenaient une relation entre le nœud SA et le nœud SCR, l'hypothèse H0 devait être rejetée en faveur de H1. Les meilleurs réseaux bayésiens ont enfin été étudiés pour analyser la distribution estimée de chaque indicateur.

Pour les indicateurs d'évaluation subjective, dont les distributions ont été supposées gaussiennes, les estimations de la moyenne conditionnelle avec un intervalle de confiance à 95% ont été analysées. De plus, lorsque l'influence des deux facteurs apparaissait dans le meilleur réseau bayésien, une analyse par regroupement a été réalisée sur la base du BIC (Binder, 1978 ; Franzen, 2008). Toutes les conditions résultant de l'interaction des facteurs TTC et Offset ont été considérées, soit huit niveaux possibles. L'objectif était de savoir si ces huit niveaux donnaient lieu à des distributions différentes de l'indicateur considéré (mSA ou iSA) ou si ces niveaux pouvaient être regroupés en un nombre plus restreint. Pour ce faire, 4140 modèles ont été construits pour tester tous les regroupements possibles (Rota, 1964). Le package R *partitions* a été utilisé à cet effet (Hankin, 2006 ; Hankin et West, 2007). Le meilleur modèle, qui équivaut donc à la meilleure stratégie de regroupement, a été sélectionné en utilisant les degrés de preuve de Raftery (Raftery, 1995, p. 139).

Pour les indicateurs du SCR, qui ont été supposés suivre des distributions Tweedie, les estimations des moyennes conditionnelles ont été analysées, ainsi que la probabilité des zéros. Les SCRs étant assez rares chez les participants, il a été jugé nécessaire d'analyser en parallèle la probabilité des zéros et l'évolution

de la moyenne des indicateurs nSCR ou mSCR.

6.4 Résultats

6.4.1 Relation entre les mesures des types de perception du risque

Tous les réseaux bayésiens possibles ont été comparés pour répondre aux deux hypothèses théoriques : H_0 , qui suppose que les deux types de perception du risque sont indépendants, et H_1 , qui suppose qu'une relation existe entre les deux types de perception du risque. Les meilleurs réseaux bayésiens ont été sélectionnés pour chacune des quatre combinaisons d'indicateurs en fonction du BIC. La table 6.4 présente les trois meilleurs réseaux bayésiens par combinaison de facteurs en fonction de leur valeur de BIC. Dans cette table, la structure des relations entre les réseaux bayésiens a été représentée par la décomposition de la vraisemblance pour le nœud SA et le nœud SCR. Cette notation a été adoptée pour refléter succinctement la dépendance entre les distributions d'indicateurs d'évaluation subjective et de SCR compte tenu des facteurs TTC et Offset.

La table 6.4 révèle qu'un seul réseau bayésien a été sélectionné pour l'indicateur iSA. Les résultats ont révélé que cet indicateur était influencé par la combinaison entre les niveaux des facteurs TTC et d'Offset. Concernant l'indicateur mSA, le meilleur réseau bayésien (c'est-à-dire le réseau bayésien avec le BIC le plus bas) n'a pas pu être distingué du réseau bayésien classé en deuxième position. La différence de BIC entre ces deux meilleurs réseaux bayésiens n'a pas été significative au regard du degré de preuve de Raftery. La structure de dépendance de ces deux meilleurs réseaux bayésiens est cependant similaire, à l'exception de la dépendance entre l'indicateur mSA et le facteur Offset, qui n'apparaissait que dans le réseau bayésien classé en deuxième position. Ce résultat signifie qu'il n'y a pas assez de preuves pour conclure avec certitude que le facteur Offset a influencé l'indicateur mSA. Les DAGs des meilleurs réseaux bayésiens présentés dans la table 6.4 sont illustrés dans la figure 6.3. Des détails sur les coefficients estimés pour chaque distribution sont fournis sur les figures 6.6, 6.7, 6.8 et 6.9. Comme il n'y avait pas suffisamment de preuves pour conclure sur la relation entre le facteur Offset et l'indicateur mSA, un point d'interrogation a été placé sur les flèches entre ces deux nœuds.

TABLE 6.4 – Transformation et normalisation des indicateurs d'évaluation subjective.

Décomposition de la log-vraisemblance		BIC
$L_n(\text{mSA, mSCR} \mid \text{TTC, Offset})$		
$L_n(\text{mSA} \mid \text{TTC})$	$\times L_n(\text{mSCR} \mid \text{TTC})$	6044,724 *
$L_n(\text{mSA} \mid \text{TTC, Offset})$	$\times L_n(\text{mSCR} \mid \text{TTC})$	6045,361 *
$L_n(\text{mSA} \mid \text{TTC, mSCR})$	$\times L_n(\text{mSCR} \mid \text{TTC})$	6050,928
$L_n(\text{mSA, nSCR} \mid \text{TTC, Offset})$		
$L_n(\text{mSA} \mid \text{TTC})$	$\times L_n(\text{nSCR} \mid \text{mSA})$	5979,376 *
$L_n(\text{mSA} \mid \text{TTC, Offset})$	$\times L_n(\text{nSCR} \mid \text{mSA})$	5980,013 *
$L_n(\text{mSA} \mid \text{TTC})$	$\times L_n(\text{nSCR} \mid \text{TTC})$	6009,594
$L_n(\text{iSA, mSCR} \mid \text{TTC, Offset})$		
$L_n(\text{iSA} \mid \text{TTC, Offset})$	$\times L_n(\text{mSCR} \mid \text{TTC})$	6038,815 *
$L_n(\text{iSA} \mid \text{TTC})$	$\times L_n(\text{mSCR} \mid \text{TTC})$	6053,426
$L_n(\text{iSA} \mid \text{TTC, Offset})$	$\times L_n(\text{mSCR} \mid \text{TTC, iSA})$	6057,045
$L_n(\text{iSA, nSCR} \mid \text{TTC, Offset})$		
$L_n(\text{iSA} \mid \text{TTC, Offset})$	$\times L_n(\text{nSCR} \mid \text{iSA})$	5983,842 *
$L_n(\text{iSA} \mid \text{TTC})$	$\times L_n(\text{nSCR} \mid \text{iSA})$	5998,453
$L_n(\text{iSA} \mid \text{TTC, Offset})$	$\times L_n(\text{nSCR} \mid \text{TTC})$	6003,685

Note. Un astérisque a été indiqué pour identifier le meilleur réseau bayésien.

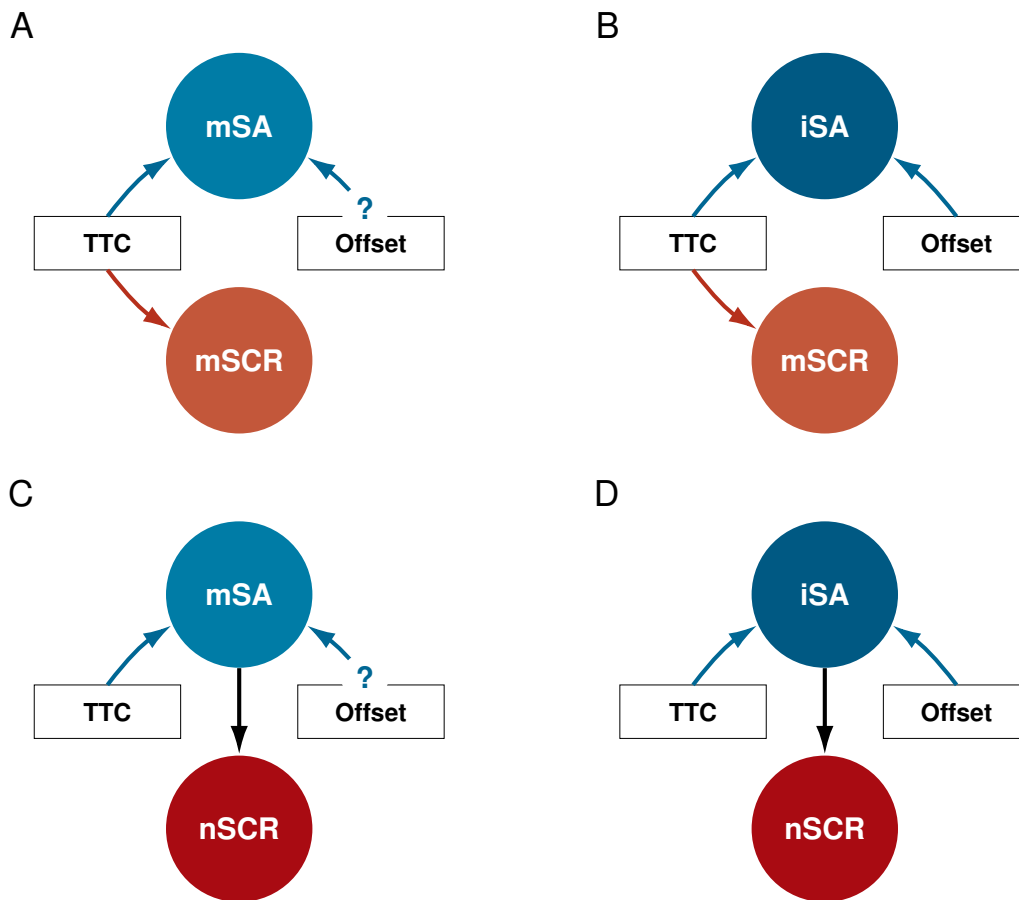


FIGURE 6.3 – Graphes des meilleurs réseaux bayésiens obtenus pour les quatre couples d'indicateurs.

Note. Cadre A : Indicateurs mSA et mSCR. Cadre B : Indicateurs iSA et mSCR. Cadre C : Indicateurs mSA et nSCR. Cadre D : Indicateurs iSA et nSCR. Un point d'interrogation a été introduit dans l'illustration de la relation entre le nœud Offset et le nœud mSA car le degré de preuve de cette relation n'est pas suffisant au regard du BIC étant donné les seuils de Raftery (1995).

La figure 6.3 illustre deux résultats.

- Premièrement, l'évaluation subjective du risque dépend des deux facteurs : l'indicateur mSA dépend sans aucun doute du facteur TTC et éventuellement du facteur Offset (voir cadres A et C), et l'indicateur iSA dépend des deux facteurs TTC et Offset (voir cadres B et D).
- Deuxièmement, alors que l'amplitude maximale des SCRs (indicateur mSCR) dépend uniquement du TTC (voir cadres A et B), le nombre de SCR (indicateur nSCR) dépend uniquement de l'évaluation subjective du risque (voir cadres C et D). Ce résultat a permis de rejeter H0 en faveur de H1 en mettant en évidence l'existence d'une relation des indicateurs des deux types de

perception du risque.

6.4.2 Influence des facteurs indépendants sur les mesures de perception du risque

Une analyse des coefficients a été réalisée pour les indicateurs d'évaluation subjective du risque obtenue pour chaque combinaison observée des facteurs. La figure 6.4 présente les moyennes des indicateurs mSA (cadre A) et iSA (cadre B). L'évolution des moyennes de ces indicateurs est similaire et donne lieu aux mêmes interprétations. Les intervalles de confiance à 95% ont été tracés pour mieux visualiser les différences entre les moyennes.

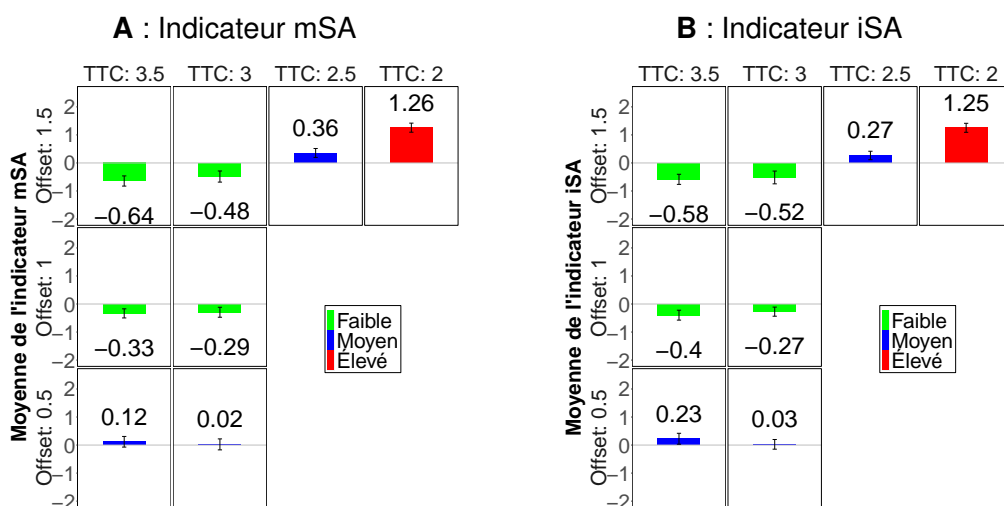


FIGURE 6.4 – Moyennes des indicateurs SA en fonction des facteurs TTC et Offset.

L'analyse en cluster a abouti à trois catégories homogènes qui ont été caractérisées en fonction de leur niveau de perception du risque : faible, moyen et élevé. Ces trois catégories ont été détaillées de la manière suivante.

- Lorsque les valeurs des facteurs TTC et Offset étaient toutes deux élevées (supérieures ou égales à 3 s pour le TTC et supérieures ou égales à 1 m pour le facteur Offset), le risque était perçu comme faible ; les moyennes des indicateurs d'évaluation subjective étaient inférieures à la moyenne.
- Lorsque le niveau du TTC était médian (2.5 s) ou lorsque la distance latérale laissée avec le piéton était faible (0.5 m), le risque était perçu comme modéré ;

les moyennes des indicateurs d'évaluation subjective étaient proches de la moyenne.

- Lorsque le niveau du TTC était faible (2 s), le risque était perçu comme élevé ; les moyennes des indicateurs d'évaluation subjective étaient significativement supérieures à la moyenne.

La figure 6.5A présente les moyennes estimées de l'indicateur mSCR et les probabilités estimées de zéros en fonction des niveaux du facteur TTC. Le détail de ces valeurs est donné sur les figures 6.6 et 6.8. Au regard de la figure 6.5A, la probabilité des zéros, c'est-à-dire de ne pas observer de SCRs chez les participants, a diminué à mesure que la moyenne de l'indicateur mSCR a augmenté. La valeur moyenne maximum a été obtenue lorsque la valeur du TTC était la plus faible (2 s). Par conséquent, plus le VA a commencé tard sa manœuvre d'évitement, plus les chances d'observer des SCRs chez les participants étaient grandes.

L'analyse des DAGs des meilleurs réseaux bayésiens (cf. figure 6.3) a révélé une relation entre l'indicateur nSCR et les indicateurs d'évaluation subjective du risque (c'est-à-dire des indicateurs mSA et iSA). La figure 6.5B illustre comment la moyenne de l'indicateur nSCR évolue en fonction des indicateurs mSA et iSA. Cette figure est basée sur les paramètres estimés de la distribution Tweedie de l'indicateur nSCR détaillés sur les figures 6.7 et 6.9. La moyenne du nombre de SCRs a été représentée en fonction des indicateurs d'évaluation subjective du risque. La moyenne du nombre SCRs varie de manière similaire sous influence des indicateurs mSA et iSA. Plus les indicateurs d'évaluation subjective ont été élevés, plus le nombre SCRs a été élevé. De plus, la probabilité de ne pas avoir de SCR, c'est-à-dire la probabilité des zéros, était élevée lorsque les indicateurs d'évaluation subjective du risque étaient faibles. La probabilité de ne pas observer de SCR chez les participants a diminué à mesure que les indicateurs d'évaluation subjective ont augmenté.

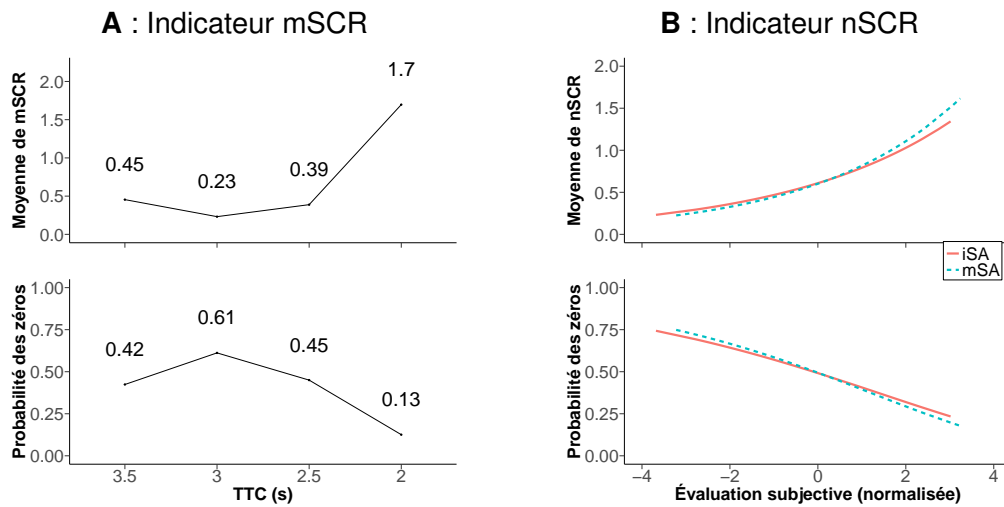


FIGURE 6.5 – Évolution des indicateurs SCR en fonction du TTC et des valeurs d'indicateur SA.

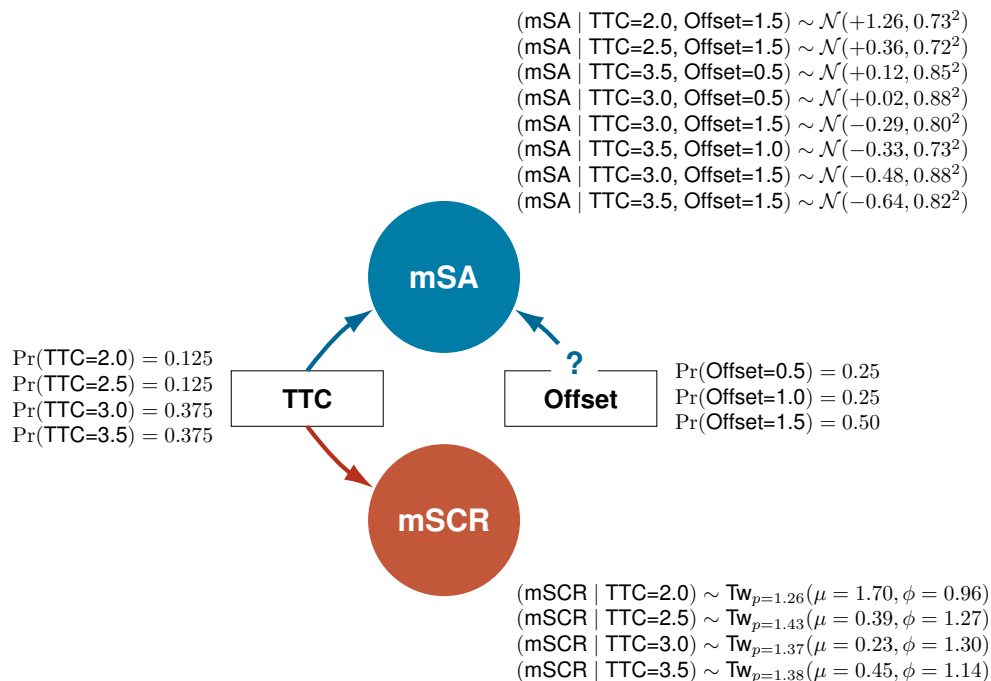


FIGURE 6.6 – Graphe du meilleur réseau bayésien pour les indicateurs mSA et mSCR.

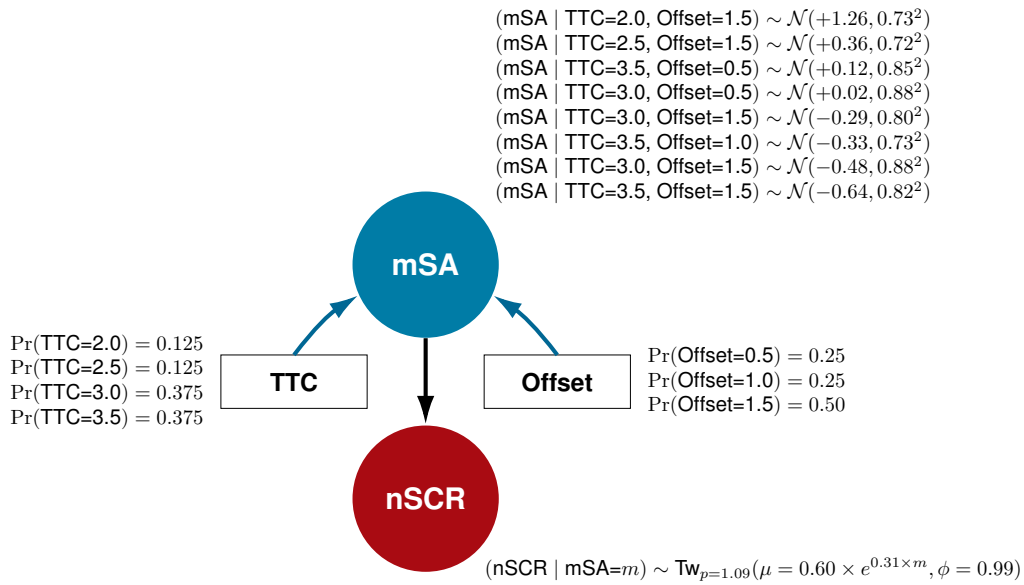


FIGURE 6.7 – Graphe du meilleur réseau bayésien pour les indicateurs mSA et nSCR.

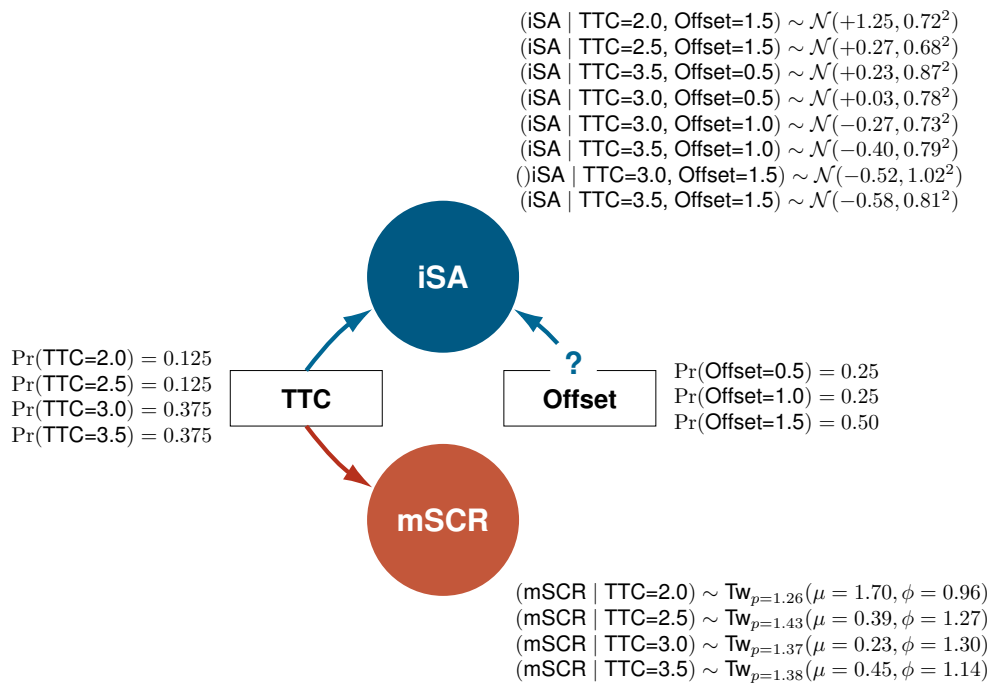


FIGURE 6.8 – Graphe du meilleur réseau bayésien pour les indicateurs iSA et mSCR.

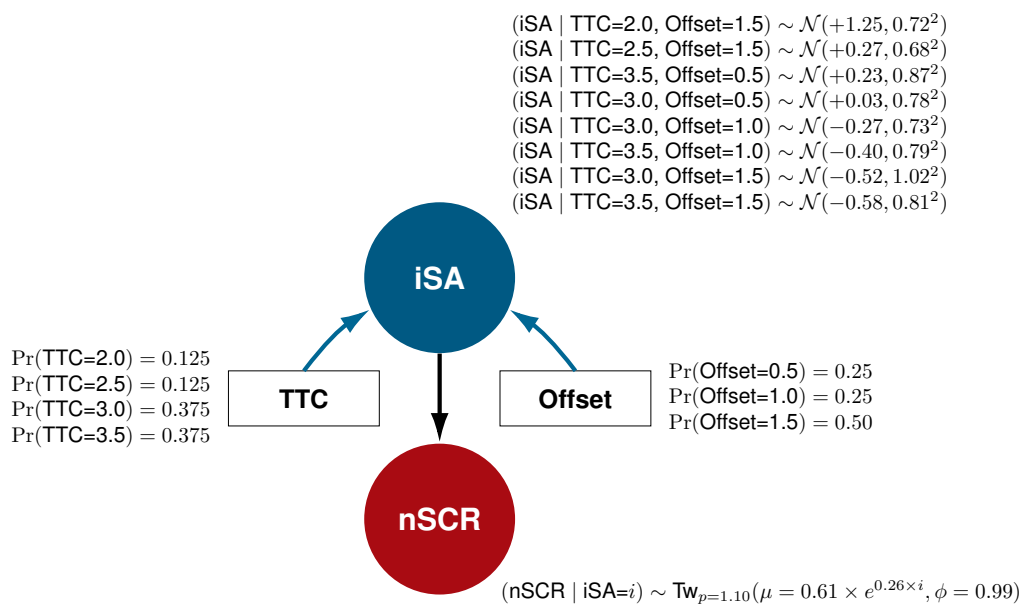


FIGURE 6.9 – Graphe du meilleur réseau bayésien pour les indicateurs iSA et nSCR.

6.5 Discussion et conclusion

Cette étude visait à caractériser la perception du risque par le passager d'un VA se déplaçant dans un espace partagé avec des piétons. À cette fin, l'évaluation subjective du risque (perception explicite) et l'AED (perception implicite) ont été enregistrés pour évaluer la relation entre les deux types de perception du risque de collision.

Les résultats de la modélisation par réseaux bayésiens ont abouti au rejet de l'hypothèse concernant l'indépendance entre les deux systèmes de perception du risque dans les conditions dynamiques d'évitement évaluées dans l'étude. Bien que l'amplitude maximale des SCRs a été affectée par la plus faible valeur de TTC, l'analyse a démontré que les variations du nombre de SCRs dépendait essentiellement de l'évaluation subjective du risque. Ces résultats soutiennent donc l'hypothèse que les deux systèmes de perception du risque sont en relation et peuvent s'influencer mutuellement indépendamment des facteurs environnementaux (Loewenstein et al., 2001 ; Slovic et al. 2004). Néanmoins, étant donné que l'évaluation subjective du risque était plus sensible à la dynamique d'évitement que les SCRs, il est plus probable que le risque explicite ait pu induire des SCRs que l'inverse. Cette conclusion devra être confirmée par d'autres études.

Les résultats ont révélé qu'il existait trois classes de situations. Lorsque le TTC et la distance latérale laissée entre le VA et le piéton au moment du dépassement étaient simultanément élevés, entre 3 et 3.5 s et entre 1 et 1.5 m respectivement, le risque était perçu comme faible. Lorsque le TTC était intermédiaire (2.5 s) ou lorsque la distance était faible (0.5 m), le risque était perçu comme modéré. Enfin, lorsque le TTC était faible (2 s), le risque perçu était plus élevé que dans toutes les autres situations. Ainsi, les résultats ont confirmé que le TTC détermine fortement la perception d'un risque de collision lors d'une manœuvre d'évitement (Bootsma et Craig, 2003). Le seuil de 2.5 s semble être cohérent avec les recommandations qui ont été faites par le NHTSA (2013). En effet, les seuils d'avertissement minimums recommandés dans les protocoles d'essais des systèmes d'avertissement de collision sont de 2.1, 2.4 et 2 s lorsque le véhicule s'approche respectivement d'un obstacle fixe, en décélération ou à faible vitesse. Lors d'une manœuvre d'évitement, la distance latérale laissée entre le VA et le piéton au moment du dépas-

sement a également influencé la perception du risque. Plus le véhicule est passé proche d'un piéton, plus le risque subjectif était important. Cependant, les résultats démontrent que la distance a eu moins d'effet que le TTC sur l'évaluation subjective et a eu peu d'effet sur les SCRs. Par conséquent, les indicateurs basés sur la perception subjective du risque ont évolué en moyenne de la même manière que les indicateurs basés sur les SCRs, mais pas nécessairement avec la même ampleur.

L'évaluation subjective du risque de collision est influencée par la dynamique du véhicule. La non-linéarité des effets observés sur les indicateurs évoque un effet de seuil comme le suggère la théorie des marges de sécurité de Boer (2006). Chaque passager s'est constitué des marges de sécurité et ne percevrait un risque que lorsque le VA s'approcherait trop près d'un piéton et violerait ces-dites marges. La perception du risque par le passager résulterait donc d'une confrontation continue entre les marges de sécurité respectées par le VA et ses propres marges de sécurité. Ces résultats sont en accord avec la théorie du *field of safe travel* (FoST) introduite par Gibson et Crooks (1938), selon laquelle un individu se représenterait une zone dynamique dans laquelle son véhicule pourrait naviguer en toute sécurité.

Par ailleurs, les SCRs des participants à l'approche des piétons reflètent l'activation du SNS qui fonctionne en parallèle avec le traitement cognitif associé à l'évaluation subjective. Comme l'ont suggéré Choi et al. (2019), il se peut que le SNS ne réagisse qu'à un certain niveau de danger. L'analyse des SCRs dans cette expérience a confirmé cette idée en révélant une augmentation des indicateurs principalement lors d'une évaluation subjective du risque élevée.

Cette étude a mis en évidence la pertinence des mesures déclaratives, dites explicites, et physiologiques, dites implicites, dans l'analyse en temps réel des risques perçus par les personnes se trouvant dans un VA. Les résultats obtenus sont cohérents avec la littérature concernant les effets des variables manipulées. La valeur du TTC au début d'une manœuvre d'évitement d'un piéton et la distance latérale laissée entre le véhicule et le piéton ont une influence sur la perception du risque de collision. Cette étude a démontré que les indicateurs physiologiques et subjectifs ne sont pas indépendants mais ne mènent pas toujours aux mêmes résultats. Ce phénomène semble confirmer l'hypothèse de Février et al. (2011) d'après laquelle les mesures déclaratives et les mesures physiologiques ne sont pas redondantes mais complémentaires. Cette expérience a démontré qu'il faut

faire attention à ne pas établir de conclusion globale basée sur un seul indicateur de perception du risque. En particulier, les évaluations subjectives, associées aux processus de type 2, peuvent être plus sensibles aux situations à faible risque que les réponses physiologiques, associées aux processus de type 1 (Evans et Stanovich, 2013). Ces travaux et leurs conclusions gagneraient à être reproduits dans des environnements plus réalistes et plus complexes. En effet, à mesure que l'environnement deviendrait plus complexe, les facteurs de perception risque deviendraient plus nombreux. Cela fournirait de nouveaux éléments pour analyser la relation entre les deux types de perception du risque de collision.

MODÉLISATION PAR RÉSEAU BAYÉSIEEN DE LA PERCEPTION IMPLICITE ET EXPLICITE DU RISQUE DANS DES SITUATIONS DE CROISEMENT

Ce chapitre s'inscrit dans la continuité du chapitre 6. Les conclusions de ce dernier chapitre ont suggéré un lien entre la perception du risque explicite, mesurée à partir d'une évaluation subjective, et la perception du risque implicite, mesurée à partir des *skin conductance responses* (SCRs). Ce chapitre présente une étude qui a permis d'examiner ce lien au travers d'une expérimentation permettant à des participants, passagers de véhicule autonome (VA), d'évaluer leur perception du risque dans des situations de croisement avec des piétons. À l'instar des chapitres 5 et 6, cinq sections composent ce chapitre. La section 7.1 est une introduction permettant de présenter les objectifs de l'étude expérimentale. La section 7.2 présente la méthode expérimentale employée et les données exploitées. La section 7.3 présente la modélisation développée pour l'étude de la relation entre les perceptions du risque explicite et implicite. La section 7.4 présente les résultats de l'étude. Enfin, la section 7.5 propose une discussion générale et une conclusion de l'étude. Les travaux présentés dans ce chapitre, ont donné lieu à la rédaction d'un article de recherche, nommé « Risk Assessment and Associated Electrodermal Activity of a Self-Driving Car Passenger in an Urban Shared Space » qui a été soumis à la revue internationale *Safety Science*.

7.1 Introduction et objectifs

7.1.1 Les espaces partagés et les interactions véhicule-piéton

L'émergence des espaces partagés complexifie la navigation des VAs. Tels que décrits par Hamilton-Baillie (2008), les espaces partagés sont des zones où toute forme de ségrégation entre les piétons et les véhicules est réduite au minimum voire supprimées (e.g., marquage au sol, signalisation, barrières physiques). Souvent aménagé dans des zones de fort passage, ce design urbain a pour but de favoriser les déplacements et les interactions entre les piétons et les véhicules. Les espaces sont plus propices à l'activité piétonne et l'absence de signalisation force à la fois les piétons et les conducteurs à plus s'engager dans la dynamique sociale de leur environnement. En l'absence de règles formelles, la fluidité des déplacements repose davantage sur des normes culturelles et des protocoles sociaux informels.

D'après le Département Britannique des Transports (2011), les espaces partagés doivent être conçus pour améliorer les déplacements piétons et le confort de ces derniers en réduisant la dominance des véhicules motorisés. Il existe encore peu de preuve dans la littérature attestant que les espaces partagés favorisent réellement les déplacements piétons. L'introduction de tels espaces s'avère délicate à la fois pour les piétons et les véhicules. D'après Hamilton-Baillie (2008), les espaces partagés impliqueraient l'augmentation des risques (de collision) apparents avec pour corollaire d'inciter les conducteurs et les piétons à davantage surveiller leur environnement. Toutefois, l'auteur reconnaît que cela nécessite des adaptations comportementales de tous les agents. Chacun devant apprendre progressivement à exploiter l'espace disponible. L'étude de Kaparias et al. (2012) a révélé que les conducteurs se sentaient moins enclins à circuler dans des zones denses de piétons, en particulier en présence d'enfants ou de personnes âgées. Moody et Melia (2014) ont analysé les déplacements dans un espace partagé aménagé à Ashford (Grande-Bretagne). Leur étude a révélé que les piétons ont tendance à laisser la priorité aux véhicules et revenir aux zones de déplacement qui leur étaient réservées avant la création de l'espace partagé.

7.1.2 Navigation autonome parmi des piétons

La difficulté posée par les espaces partagés est d'autant plus importante pour les VAs. Des études ont révélé que les piétons restaient réfractaires aux interactions avec un VA (e.g., Jayaraman et al. 2019 ; Nunez Velasco et al., 2019 ; Kalantari et al., 2021, 2022). La vulnérabilité ressentie par les piétons impose une modification importante du comportement des véhicules. Les espaces partagés posent donc un problème tant pour les piétons que pour les VAs et leurs occupants. Il apparaît impératif d'étudier les interactions entre les uns et les autres afin que les déplacements s'opèrent de manière fluide en préservant la sécurité de tous.

En l'absence de rapport social entre le conducteur et les piétons environnants (e.g., contact visuel ou simple orientation du regard), les chercheurs s'intéressent aux manières dont un VA peut avertir les piétons de ses intentions. Au regard de la littérature, équiper un VA d'*external human-machine interfaces* (eHMIs) pourrait apporter un bénéfice dans ses interactions avec les piétons (Faas et al., 2020, 2021 ; Métayer et Coeugnet, 2021).

D'après les entretiens menés par Kyriakidis et al. (2019) auprès de 12 chercheurs experts dans le domaine des facteurs humains de la conduite automatisée, la communication à l'intérieur du véhicule représente aussi un aspect qu'il est indispensable de développer. Ce type de communication, communément appelé *internal human-machine interfaces* (iHMIs), est nécessaire au sentiment de sécurité des passagers de VAs (Bengler et al., 2020). Néanmoins, même avec une bonne communication à l'intérieur du véhicule, le comportement de conduite d'un VA restera l'un des facteurs principaux ayant une influence sur le ressenti des passagers. Il s'agit d'un point clé qui conditionne l'acceptation des VAs par les piétons à l'extérieur du véhicule et les passagers à l'intérieur.

7.1.3 Ressenti d'un passager de véhicule autonome

Des études ont montré que la vitesse, l'accélération et les distances de sécurité avec les autres usagers avaient un fort impact sur le ressenti des passagers (e.g., Basu et al., 2017 ; Hartwitch et al., 2018 ; Beggiato et al., 2019 ; Rossner et al., 2019, 2020). Dans un contexte où le VA doit naviguer parmi des piétons, sa vitesse et sa trajectoire sont des facteurs cruciaux qui vont déterminer les marges

de sécurité que le véhicule va respecter avec les piétons. La problématique des marges de sécurité est complexifiée dans l'analyse des déplacements en espace partagé. Gibson et Crooks (1938) ont introduit le concept de *field of safe travel* (FoST) d'après lequel un conducteur percevrait une zone dynamique dans laquelle le véhicule pourrait se déplacer sans risque. La popularité de ce concept dans la littérature suggère qu'il pourrait être appliqué dans le cadre d'une étude sur la perception du risque de collision d'un passager de VA naviguant parmi des piétons. Dans un tel contexte, le comportement des usagers autour du VA est beaucoup plus imprévisible, les interactions peuvent être plus nombreuses et en présence d'une importante densité piétonne, le passager va potentiellement devoir tolérer des distances de sécurité plus faibles que sur une route ordinaire. L'étude de la perception d'un passager dans ce genre d'espace semble inévitable pour à la fois guider le développement des navigations autonomes et favoriser leur acceptation.

La perception d'un risque de collision chez les passagers d'un VA peut émerger dès lors qu'un piéton souhaite croiser la route du véhicule. Cette perception peut ensuite évoluer à mesure que le piéton se rapproche du véhicule. Dans ces situations, il est possible de supposer que les passagers vont chercher à estimer le potentiel point de collision et juger si le VA adopte le bon comportement (vitesse et trajectoire). Les études des chapitres 5 et 6 ont permis de révéler que le *time-to-collision* (TTC) influençait la perception du risque de collision lors de manœuvres d'évitement de piéton. Cette étude propose d'étudier des situations de croisement entre un VA et des piétons. Le TTC n'étant pas exploitable dans ces conditions (cf. chapitre 2, section 2.3), d'autres grandeurs interviennent dans la perception du risque de collision. Les travaux de Cutting (1995) et de Ondrej et al. (2010), présentés dans la section 2.3, montrent qu'une collision peut être anticipée par un individu en fonction de l'évolution de l'angle formé entre l'axe longitudinal du véhicule et la direction d'un piéton approchant. De plus, Ondrej et al. (2010) et Schwarz (2014) ont introduit le *time-to-interaction* (TTI) qui correspond au temps restant avant qu'un véhicule atteigne la position la plus proche d'un piéton, qu'il y ait collision ou non. Ces travaux suggèrent que la perception du risque de collision d'un passager de VA dans des situations de croisement avec un piéton pourrait être influencée par la dynamique de rapprochement entre le VA et le piéton.

7.1.4 Analyse de la perception du risque de collision

À l'instar de l'étude qui a été présentée dans le chapitre 6, cette étude propose d'analyser la perception du risque de collision au travers d'une évaluation subjective et de l'activité électrodermale (AED). L'évaluation subjective a été réalisée grâce à un potentiomètre rotatif. Le but était d'obtenir une évaluation de la perception de collision en temps réel sans interrompre les scénarios ni distraire les participants. Cette méthode d'évaluation est très similaire à celle employée lors des études sur le confort perçu par les passagers de VAs menées par Hartwitch et al. (2018) ou Telpaz et al. (2018). L'étude de l'AED repose sur l'analyse des SCRs qui ont déjà été utilisés comme indicateurs d'événements qui provoquent de l'inconfort chez les conducteurs (Beggiato et al., 2019) ou du stress (Distefano et al., 2020 ; Daviaux et al., 2020). L'étude présentée dans le chapitre 6 a révélé qu'il pouvait exister une relation entre les SCRs et l'évaluation subjective du risque de collision. L'étude proposée dans ce chapitre propose d'apporter de nouveaux éléments quant à la nature de cette relation dans un contexte dynamique plus riche impliquant des situations de croisement entre un VA et des piétons.

7.1.5 Objectifs de l'étude

Deux objectifs principaux ont guidé le développement de cette étude :

- analyser l'influence de la dynamique de croisement entre un VA et un piéton sur la perception du risque de collision des passagers ;
- étudier le lien entre l'évaluation subjective du risque de collision et SCRs des participants lorsqu'ils sont confrontés à des situations de croisement.

Pour répondre à ces objectifs, une expérimentation simulateur de conduite à base fixe a été implémentée dans le but de confronter des participants à des situations différentes de croisement entre un VA et un piéton (cf chapitre 4). Sept facteurs bimodaux ont été utilisés pour manipuler la dynamique de croisement des piétons avec le VA. Ces facteurs ont été choisis pour faire varier la position et la vitesse relative du piéton, son orientation initiale, son angle d'approche et la distance de sécurité minimum laissée avec le véhicule. Il a été supposé qu'une augmentation de la vitesse de croisement combinée à une réduction de la marge de sécurité

pouvaient augmenter la perception du risque de collision d'un passager et que l'angle d'approche du piéton pouvait modifier cette perception.

L'influence des sept facteurs et la relation entre les deux types de mesure ont été évaluées simultanément grâce à des réseaux bayésiens hybrides. Cette démarche a permis de mettre en évidence les relations les plus vraisemblables au regard des données récoltées. En particulier, cela a permis de tester l'existence d'une relation entre les deux types de mesures lorsque ces dernières sont sous influence de facteurs dynamiques.

7.2 Méthode

7.2.1 Participants

Pour cette expérimentation, 27 participants âgés entre 19 et 63 ans ($M = 29.2$, $SD = 11.6$) ont été recrutés sur la base du volontariat. Il y avait au total 6 femmes et 21 hommes, tous titulaires du permis de conduire. La seule condition nécessaire pour être volontaire était d'avoir une vue correcte, le port de lunettes n'était pas exclusif.

7.2.2 Plan d'expérience

Cette expérience a consisté à faire naviguer un véhicule sur une trajectoire rectiligne dans un espace urbain partagé avec des piétons. Au cours du déplacement, des piétons ont été programmés pour traverser de manière différente la voie en passant devant ou derrière le véhicule.

Sept facteurs bimodaux ont été manipulés. Ces facteurs et leurs modalités sont présentés en détail dans la table 7.1 et représentés sur la figure 7.1. Ces facteurs ont été manipulés de sorte à contrôler trois aspects principaux d'une situation de croisement entre véhicule et un piéton. Tout d'abord, deux facteurs conditionnaient la position initiale du piéton sur la voie, relativement au véhicule : Côté et Orientation. Ensuite, trois facteurs déterminaient la vitesse de croisement entre le piéton et le véhicule : V-vitesse, P-Vitesse et Angle. Enfin, deux facteurs déterminaient la position du piéton lorsque ce dernier était à proximité du véhicule : Ordre et Marge. Pour ce dernier facteur la distance a été calculée relativement au siège du

conducteur, c'est à dire à la position du participant dans le simulateur de conduite.

TABLE 7.1 – Facteurs manipulés dans la deuxième expérimentation.

Facteur	Détail	Niveaux
Position initiale du piéton		
Côté	Position initiale du piéton sur la voie, relativement au véhicule	Gauche, Droite
Orientation	Orientation initiale du piéton, par rapport à la direction du véhicule	Face, Dos
Dynamique du croisement		
V-vitesse	Vitesse du véhicule autonome	20 km/h, 30 km/h
P-vitesse	Vitesse du piéton	5.5 km/h, 7 km/h
Angle	Angle de croisement du piéton, relativement à la direction du véhicule	Pi/6, Pi/3
Position lorsque le piéton arrive au plus proche du véhicule		
Ordre	Ordre de passage du piéton lors du croisement	Premier, Deuxième
Marge	Distance de sécurité minimum entre le véhicule et le piéton	1.5 m, 2.5 m

Un plan factoriel complet impliquant ces sept facteurs aurait abouti à $2^7 = 128$ situations de croisement. Ce plan expérimental n'était pas souhaitable car il aurait donné lieu à une expérience trop longue, ce qui aurait pu créer des effets néfastes pour l'analyse. L'exposition de participants à une expérience très longue peut potentiellement créer un phénomène d'accoutumance pouvant perturber à la fois les réactions physiologiques et l'évaluation subjective du risque.

Le croisement entre ces sept facteurs a donc été établi d'après un plan fractionnaire de type 2^{7-2} (Goupy et Creighton, 2008, chap. 6). Cette notation signifie que sept facteurs ont été étudiés mais que les niveaux de deux d'entre-eux ont été calculés à partir de certaines interactions. Pour ce faire, un plan factoriel complet a d'abord été établi à partir des cinq facteurs suivants : Orientation, P-Vitesse, V-vitesse, Angle, Ordre. Ce plan factoriel complet, dit plan initial, contient $2^5 = 32$ situations différentes. Ensuite, les facteurs Marge et Côté ont été ajoutés sans augmenter la taille du plan initial. Les niveaux du facteur Marge ont été déterminés d'après l'interaction des cinq facteurs du plan initial. Les niveaux du facteur Côté ont été déterminés à partir de l'interaction de quatre facteurs du plan initial (P-Vitesse, Orientation, Angle, Ordre). La stratégie de construction de ce plan d'expérience a

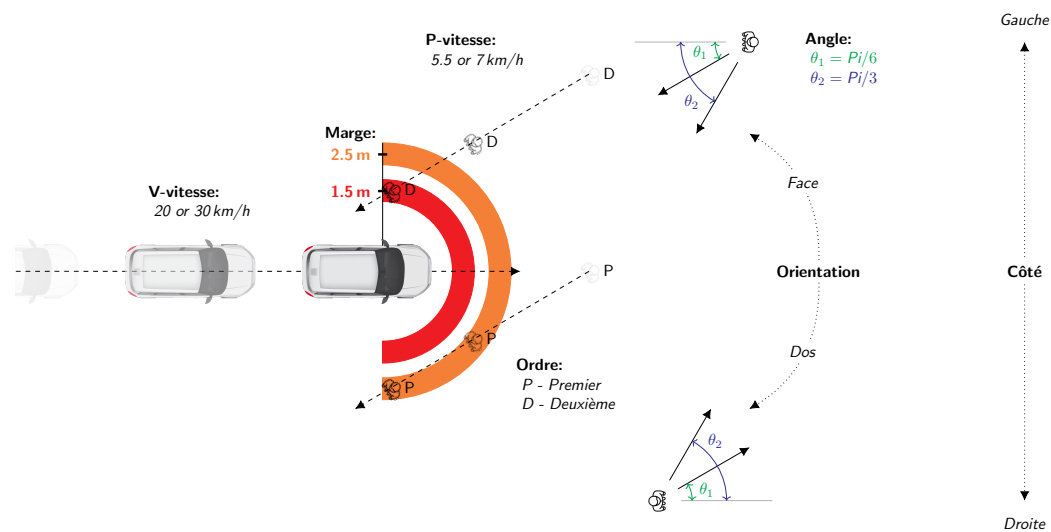


FIGURE 7.1 – Schématisation des facteurs manipulés dans la deuxième expérience.

reposé sur les calculs de Box (cf. Goupy et Creighton, 2008, chap. 6, sec. 4). Sans perte de généralité, les niveaux des facteurs ont été recodés en -1 et $+1$. Les interactions entre facteurs ont été calculées à partir de la multiplication classique entre modalités recodées. Les situations expérimentées sont présentées dans le tableau 7.2. La construction d'un tel plan d'expérience donne la possibilité d'étudier les effets linéaires des facteurs jusqu'aux interactions d'ordre trois. En d'autres termes, un plan d'expérience ainsi établi est équilibré jusqu'aux interactions d'ordre trois.

Ce plan d'expérience a été soumis à chaque participant. Afin d'augmenter le caractère aléatoire des simulations, quatre situations supplémentaires ont été ajoutées. Le plan d'expérience initial a été randomisé afin que chaque participant rencontre les 32 situations dans un ordre différent. Les situations supplémentaires ont ensuite été introduites aux rangs 7, 14, 21 et 28. Ces quatre situations ont été calculées à partir de l'interaction entre les facteurs Orientation et Côté. Dans ces situations, le niveau du facteur P-Vitesse était fixé à 7.5 km/h , le niveau du facteur V-vitesse était fixé à 30 km/h et les piétons étaient programmés pour entrer en collision fictive avec le véhicule. Lors d'une collision fictive, le véhicule traversait le piéton, il n'y avait aucun autre effet visuel.

En conclusion, les participants ont donc assisté à 36 situations de croisement. Chaque situation était différente et quatre d'entre-elles concernaient des collisions

TABLE 7.2 – Élaboration du plan d'expérience fractionnaire d'après Goupy et Creighton (2008).

Orientation [1]	P-vitesse [2]	V-vitesse [3]	Angle [4]	Ordre [5]	Côté [1234]	Marge [12345]
-	-	-	-	-	-	+
-	-	-	+	-	+	-
+	-	-	-	-	+	-
+	-	-	+	-	-	+
-	-	-	-	+	+	-
-	-	-	+	+	-	+
+	-	-	-	+	-	+
+	-	-	+	+	+	-
-	+	-	-	-	+	-
-	+	-	+	-	-	+
+	+	-	-	-	-	+
+	+	-	+	-	+	-
-	+	-	-	+	-	+
-	+	-	+	+	+	-
+	+	-	-	+	+	-
+	+	-	+	+	-	+
-	-	+	-	-	+	+
-	-	+	+	-	-	-
+	-	+	-	-	-	-
+	-	+	+	-	+	+
-	-	+	-	+	-	-
-	-	+	+	+	+	+
+	-	+	-	+	+	+
+	-	+	+	+	-	-
-	+	+	-	-	-	-
-	+	+	+	-	+	+
+	+	+	-	-	+	+
+	+	+	+	-	-	-
-	+	+	-	+	+	+
-	+	+	+	+	-	-
+	+	+	-	+	-	-
+	+	+	+	+	+	+

fictives. Les piétons de chacune de ces situations étaient espacés de 225 m afin d'obtenir un temps régulier d'environ 20 s entre chaque situation. La simulation complète pour un participant durait 18 min 30 sec.

Les piétons de la simulation étaient visuellement tous identiques. Pour rendre les situations de croisement plus imprévisibles, 72 piétons témoins ont été placés sur la voie. Ces piétons ne traversaient pas la voie. Ils étaient tous orientés dos au véhicule. Leur positionnement latéral sur la voie a été choisi aléatoirement parmi les niveaux du facteur Côté. Leur vitesse a également été sélectionnée aléatoirement parmi les niveaux du facteur P-Vitesse auxquels le niveau *0 km/h* a été ajouté.

7.2.3 Variables dépendantes

Dans cette étude les deux indicateurs de perception subjective du risque (nommée « *subjective assessment (SA)* ») ont été utilisés. Le calcul de ces indicateurs est présenté dans le chapitre 4 de méthodologie générale. Les valeurs de ces deux indicateurs ont été calculées pour chaque situation de croisement. Si, pour une situation donnée, un participant ne percevait aucun risque de collision (évaluation subjective à zéro), les valeurs des indicateurs *integrated subjective assessment (iSA)* et *maximum of subjective assessment (mSA)* étaient fixées à zéro. Un exemple de ces indicateurs est donné sur la figure 7.2B.

Par ailleurs les indicateurs *number of skin conductance responses (nSCR)* et *maximum of skin conductance responses (mSCR)* ont aussi été utilisés. Les étapes de calcul de ces indicateurs sont également présentées dans le chapitre 4. Un exemple de ces indicateurs est donné sur la figure 7.2B. Les SCRs des participants ont été prises en compte pour chaque situation de croisement dès que le piéton commençait à traverser la voie. Afin de tenir compte du retard d'occurrence des SCRs vis-à-vis d'un croisement avec un piéton, un délai de 3 s a été respecté après le moment où le piéton était le plus proche du véhicule (Boucsein, 2012 ; Droulers et al., 2013).

7.2.4 Procédure

À l'arrivée d'un participant, l'enjeu et le déroulement général de l'expérimentation étaient présentés. Les formulaires de consentement éclairé et d'information

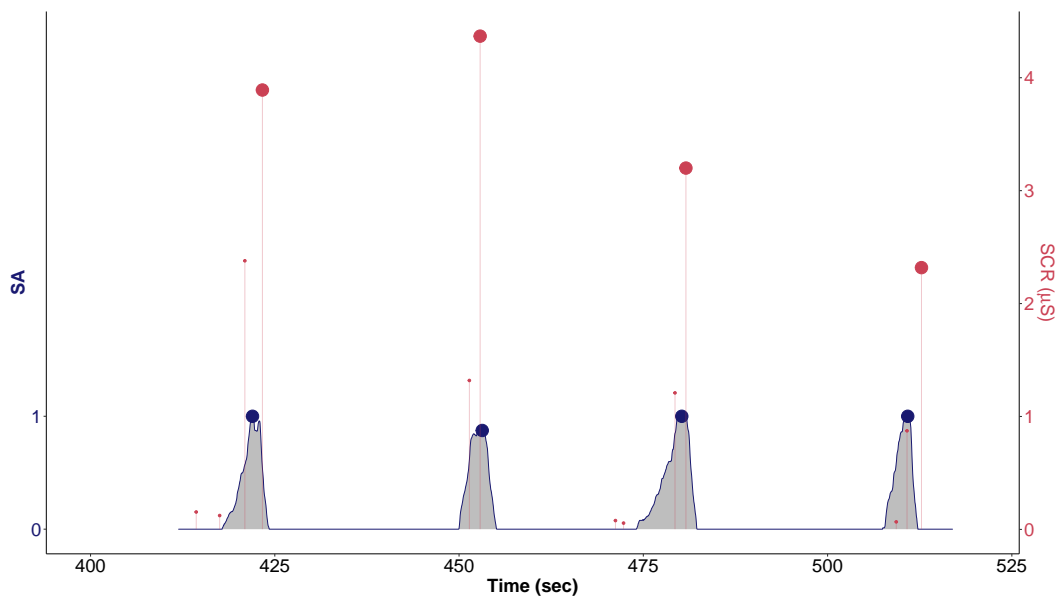


FIGURE 7.2 – Exemple de données récoltées lors de la deuxième expérimentation.

Note. La série d'évaluation subjective du risque par le participant (SA) est représentée par une ligne bleue. Les SCRs sont représentés par des segments verticaux dont la hauteur correspond à l'amplitude. L'amplitude maximale (mSA et mSCR) est indiquée dans chaque situation par des points. L'indicateur nSCR est le nombre de SCRs pour chaque situation. L'indicateur iSA a été calculé à partir de la zone grise sous la série d'évaluation subjective.

étaient ensuite soumis au participant (cf. annexes A.3 et A.4). Puis, les capteurs de mesure d'AED étaient disposés sur sa main non dominante. Une prise de mesure test était alors réalisée afin de s'assurer que le participant était bien répondant à ce type de mesure (Boucsein, 2012, p. 439).

Le participant était ensuite invité à s'installer sur le siège du simulateur de conduite et à prendre en main le dispositif d'évaluation subjective présenté dans le chapitre 4. La phase d'initiation lui était proposée pour qu'il apprenne à utiliser le potentiomètre rotatif d'évaluation subjective.

À la suite de cette initiation, il était annoncé au participant qu'il allait assister à 32 situations de croisements et que deux marges de sécurité allaient être testées (1.5 m, 2.5 m). Afin que chaque participant se représente le gabarit du véhicule, une simulation spécifique a été préparée avec trois situations de croisement sans collision fictive. Lors de cette phase intermédiaire, aucune consigne d'évaluation n'était donnée au participant. Le participant était par ailleurs tenu informé que pour certaines situations placées aléatoirement dans le scénario, le véhicule traverserait le piéton sans aucun autre effet visuel de collision. Un aperçu de ce que le parti-

cipant voyait au cours des situations de croisement avec la plus faible marge de sécurité est donné sur la figure 7.3.



FIGURE 7.3 – Capture d'écran réalisée pendant une situation de croisement de la deuxième expérimentation.

À l'issue de cette phase intermédiaire, la consigne de l'expérimentation était rappelée au participant. Il devait évaluer sa perception du risque de collision au cours du déplacement du véhicule. Il était également précisé au participant que le potentiomètre devait refléter le plus fidèlement sa perception du risque de collision en temps réel. Notamment, il ne devait pas oublier de revenir à zéro (i.e., en butée basse) aussitôt qu'il ne percevait aucun risque de collision. Également, il lui était précisé qu'il pouvait rester en butée basse tout au long d'une situation de croisement s'il ne percevait aucun risque. Il a été jugé important de mentionner ces consignes pour augmenter la fiabilité des données tout en permettant au participant de se sentir le plus libre possible dans son évaluation subjective. Finalement, la simulation d'expérimentation était lancée sur accord du participant.

7.3 Analyse de données

L'objet de cette étude était double :

- Analyser l'effet de différents facteurs de la dynamique de croisement entre le VA et un piéton sur le risque perçu ;
- Analyser la relation entre des mesures physiologiques et des mesures subjectives.

Pour réaliser ces deux objectifs, les relations entre les facteurs et les indicateurs calculés ont été modélisées par des réseaux bayésiens. Un réseau bayésien peut être caractérisé par son *directed acyclic graph* (DAG). Il s'agit d'une représentation graphique des relations entre les variables étudiées, appelées nœuds. Une relation entre deux nœuds, c'est-à-dire entre un facteur et un indicateur ou entre deux indicateurs, y est représentée par une flèche orientée. Dans cette étude, les indicateurs ont été analysés par paire : (iSA, nSCR) d'une part et (mSA, mSCR) d'autre part. Ce regroupement par paire a été choisi de manière à examiner les relations entre des indicateurs de même nature. C'est à dire, les indicateurs relatifs à la dynamique d'une mesure d'une part et les indicateurs liés à l'amplitude maximum des mesures d'autre part. Comme illustré sur la figure 7.4, les DAGs étudiés avaient tous neuf nœuds : un nœud a été attribué à chacun des sept facteurs, un nœud a été attribué aux indicateurs d'évaluation subjective (SA) et un nœud a été attribué aux indicateurs de SCR. Sur la figure 7.4, les relations potentielles entre les facteurs expérimentaux et les indicateurs calculés sont représentées par une flèche noire terminée par un point d'interrogation. Les relations entre les indicateurs sont représentées par des flèches grises terminées par un point d'interrogation.

Pour un couple d'indicateurs, il existe 12288 réseaux bayésiens différents d'après le calcul suivant :

$$3 \times \left(\sum_{0 \leq i \leq 3} C_7^i \right)^2 = 12288, \quad (7.1)$$

où les $C_7^i = \frac{7!}{(7-i)!i!}$, désignent le nombre de combinaisons qu'il est possible de représenter pour un indicateur en relation avec exactement i facteurs distincts. Ce calcul tient compte des deux hypothèses suivantes :

1. les facteurs ne peuvent pas avoir de relation entre eux car ils correspondent à des variables indépendantes manipulées dans le plan d'expérience ;
2. un indicateur ne peut être en relation qu'avec au maximum trois nœuds simultanément par construction du plan d'expérience (trois facteurs ou deux facteurs et un indicateur de nature différente).

Un algorithme de comparaison a été développé pour comparer ces réseaux bayésiens d'après le *Bayesian information criterion* (BIC) (Schwarz, 1978 ; Raftery, 1995). Ce critère est basé sur la vraisemblance des données obtenues au cours de l'expérimentation. Cette vraisemblance s'appuie elle-même sur l'estimation des

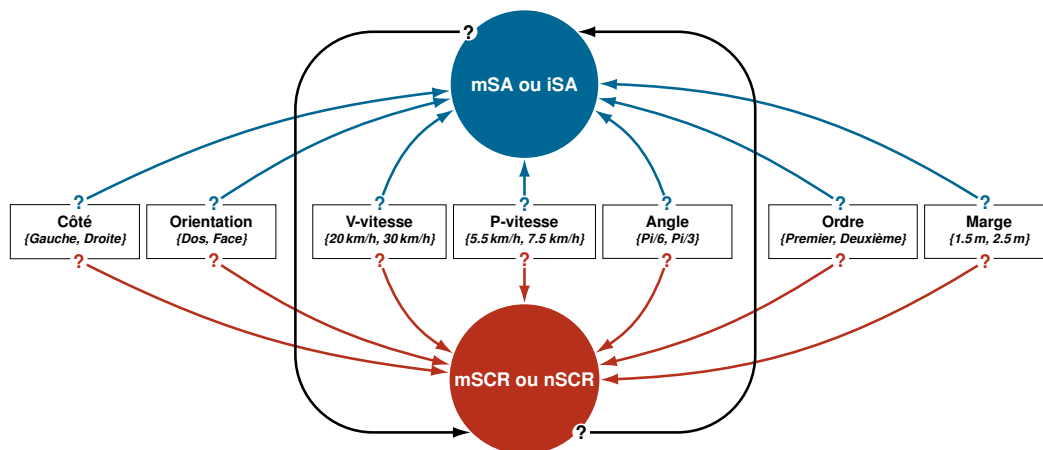


FIGURE 7.4 – Relations possibles entre les facteurs et les indicateurs.

paramètres des distributions statistiques choisies pour chacun des nœuds (Scutari, 2015).

Les facteurs ont été traités comme des variables aléatoires à deux modalités. D'après la conception du plan d'expérience, les deux niveaux de chaque facteur étaient équiprobables. Par conséquent les distributions de probabilité des facteurs sont toutes équivalentes et s'écrivent sous la forme $\Pr(\text{niveau 1}) = \Pr(\text{niveau 2}) = 1/2$, quelque soit le facteur et ses deux niveaux considérés.

Suite à des études préliminaires, deux distributions spécifiques ont été attribuées aux noeuds correspondant aux indicateurs d'évaluation subjective d'une part et aux indicateurs de SCRs d'autre part.

D'après les données, il a été supposé que les indicateurs d'évaluation subjective suivaient des distributions gaussiennes. Un prétraitement des données a été réalisé pour répondre au mieux aux caractéristiques de cette distribution. Une correction de l'asymétrie a d'abord été opérée pour chacun des indicateurs : les valeurs de l'indicateur iSA ont été élevées à la puissance $1/2$ et les valeurs de l'indicateur mSA ont été élevées à la puissance $1/3$. Ensuite, afin de réduire la variabilité inter-participants et de modéliser toutes les les données simultanément, les valeurs d'indicateur ont été centrées puis réduites par participant. L'effet de ces transformations sur les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement sont présentés dans la table 7.3.

Un distribution Tweedie a été choisie pour les indicateurs de SCRs. Des détails sur cette distribution sont donnés dans le chapitre 6. Ces indicateurs nSCR et

TABLE 7.3 – Transformation des indicateurs SA.

Indicateur	N	M	SD	Coefficient d'asymétrie	Coefficient d'aplatissement
Indicateurs brutes					
iSA	864	2.45	1.99	1.07	0.97
mSA	864	0.49	0.29	0.15	-0.83
Indicateurs transformés					
iSA ^{1/2}	864	0.000	0.99	-0.09	-0.46
mSA ^{1/3}	864	0.000	0.99	-0.13	-0.50

mSCR ont été mis à l'échelle par participant.

Les estimations des paramètres de toutes distributions ont été réalisées avec le logiciel R. En ce qui concerne les distributions des indicateurs d'évaluation subjective, les paramètres des distributions gaussiennes ont été estimés avec le paquet *stats* (R Core Team, 2020). Pour les indicateurs de SCR, les paramètres des distributions Tweedie ont été estimés avec les méthodes développées dans les paquets *tweedie* (Dunn and Smyth, 2005, 2008 ; Dunn 2017) et *cplm* (Zhang, 2013).

Les modèles ont été classés par ordre croissant en fonction de leur BIC, le meilleur modèle étant celui ayant obtenu le plus faible score. Les seuils de comparaison de Raftery (1995) ont été utilisés afin de déterminer le degré de preuve des relations d'un réseau bayésien en comparaison d'un autre. Ces seuils sont détaillés dans la table 6.3 du chapitre 6. Ils constituent des lignes directrices pour comparer les réseaux bayésiens entre eux et discuter de la significativité des relations entre les nœuds du réseau (facteurs et indicateurs). Les écarts supérieurs à 2, 6 ou 10 entre deux valeurs BIC ont été respectivement considérés comme positifs, forts ou très forts. Les meilleurs réseaux bayésiens ont finalement été détaillés pour examiner la nature des relations. Pour les indicateurs d'évaluation subjective, une analyse par regroupement (Binder, 1978 ; Franzén, 2008) a été effectuée sur les moyennes estimées des distributions gaussiennes. L'analyse par regroupement est une méthode de comparaison des modèles non imbriqués basée sur le BIC. Elle a été mise en œuvre à l'aide du paquet R *partitions* (Hankin, 2006 ; Hankin et West, 2007). Cette méthode permet d'évaluer le degré d'homogénéité des distributions gaussiennes dans les meilleurs réseaux bayésiens. L'enjeu principal de l'analyse en groupes était de regrouper objectivement les conditions expérimentales qui don-

naient lieu à un niveau équivalent de perception du risque. Un objectif secondaire, plus exploratoire, était de déterminer si un niveau de risque donné était dû à des causes homogènes. Par exemple, un niveau élevé de perception du risque pourrait correspondre soit à un ensemble de conditions associées à un degré particulier d'un facteur, soit à l'interaction entre deux facteurs. Pour les indicateurs de SCR, les moyennes ont été analysées ainsi que la probabilité des zéros. Ces deux analyses ont permis d'obtenir un aperçu complet des distributions Tweedie estimées à partir des paramètres estimés (p, μ, ϕ) . Notamment, ces représentations ont permis de mettre en parallèle l'évolution de la moyenne d'un indicateur avec la probabilité d'absence de réponse (cf. équation 6.2).

7.4 Résultats

Pour l'analyse de la relation entre les indicateurs de perception du risque, les situations de collision fictive n'ont pas été prises en compte. Toutefois, une étude préliminaire globale a été réalisée pour comparer les 32 situations du plan d'expérience aux quatre situations de collision fictive ajoutées. Cette étude a révélé que les valeurs d'indicateurs étaient plus élevées en moyenne pour les situations de collision fictive. Les résultats détaillés sont donnés dans la table 7.4.

TABLE 7.4 – Comparaison entre les 32 situations et les quatre collisions fictives de la deuxième expérimentation.

N	Indicateur	M	SD
Collisions fictives			
108	iSA	1.13	0.51
108	mSA	1.41	0.35
108	mSCR	1.11	0.90
108	nSCR	0.79	0.58
Autres situations de croisement			
864	iSA	-0.14	0.94
864	mSA	-0.18	0.89
864	mSCR	0.58	0.71
864	nSCR	0.74	0.65

Comme attendu, la hausse est très marquée pour les indicateurs iSA, mSA.

Cela révèle une forte augmentation de la perception subjective du risque chez les participants. Cette augmentation était attendue et révèle le fait que les participants ont su percevoir l'imminence des collisions. La comparaison des valeurs d'indicateur de SCRs est plus nuancée. Alors qu'il y a eu une hausse notable de l'amplitude maximum des SCRs, le nombre de SCRs a peu varié. Ce premier résultat suggère que le nombre de SCRs est borné et qu'il n'est pas corrélé avec l'amplitude maximum de ces mêmes réactions au cours des situations de croisement.

Les meilleurs réseaux bayésiens d'après le BIC sont présentés sur les figures 7.5 et 7.7. Ces deux figures présentent le meilleur réseau bayésien dont le BIC, noté BIC^{1^{er}}, est explicité. Pour les indicateurs iSA et nSCR, seul le meilleur réseau a été représenté car il se distingue du deuxième avec un degré de preuve positif d'après les seuils de Raftery (1995). En ce qui concerne les indicateurs mSA et mSCR, les résultats ont révélé un faible degré de preuve des relations mises en évidence dans le premier réseau vis-à-vis du second. Les deux meilleurs réseaux ont donc été représentés. Dans la suite, seules les relations mises en évidence par les meilleurs réseaux bayésiens seront discutées. Toutefois, dans le but d'apporter une vision générale sur l'effet des facteurs, les moyennes marginales pour chaque niveau ont été calculées. Ces moyennes sont présentées dans la table 7.5.

7.4.1 Résultats pour les indicateurs iSA et nSCR

La figure 7.5 illustre à la fois les relations du meilleur réseau bayésien et les coefficients estimés pour le couple d'indicateurs (iSA,nSCR). Ce réseau bayésien a obtenu un BIC=12385.14, meilleur de plus de 2 unités par rapport au réseau arrivé en deuxième position. Ce réseau bayésien révèle que seulement deux des sept facteurs ont influencé l'indicateur iSA : l'ordre de passage du piéton lors du croisement avec le VA et la marge de sécurité entre le piéton et le VA.

D'après les moyennes présentées sur la figure 7.6A, les valeurs de l'indicateur iSA ont été les plus élevées lorsque les piétons passaient devant le VA plutôt que derrière le VA. De plus, ce graphique illustre des moyennes plus élevées pour la plus faible marge de sécurité expérimentée, c'est à dire une distance de 1.5 m entre le VA et le piéton. Pour la plus faible marge de sécurité, l'augmentation des moyennes entre les situations où le piéton est passé après le VA ou avant le VA est de 0.98. Cette augmentation est de 0.72 pour la plus grande marge de sécurité.

TABLE 7.5 – Moyennes marginales des indicateurs en fonction des sept facteurs manipulés dans la deuxième expérimentation.

Niveau	mSA	iSA	mSCR	nSCR
Angle				
Pi/6	-0.11	0.14	0.59	0.82
Pi/3	0.11	-0.14	0.67	0.66
Marge				
2.5 m	-0.41	-0.41	0.61	0.72
1.5 m	0.41	0.41	0.66	0.76
Ordre				
Premier	0.31	0.43	0.59	0.82
Deuxième	-0.31	-0.43	0.67	0.66
Orientation				
Dos	-0.04	-0.03	0.63	0.75
Face	0.04	0.03	0.63	0.73
P-vitesse				
5.5 kph	-0.09	0.05	0.57	0.75
7.5 km/h	0.09	-0.05	0.69	0.73
Côté				
Gauche	-0.11	-0.08	0.65	0.75
Droite	0.11	0.08	0.62	0.73
V-vitesse				
20 km/h	-0.06	-0.06	0.64	0.75
30 km/h	0.06	0.06	0.62	0.73

La similarité de ces différences atteste d'un faible effet d'interaction entre les deux facteurs.

Par ailleurs, l'analyse par regroupement a révélé que le niveau le plus élevé de perception du risque (triangle pointant vers le haut sur la figure 7.6A) était observé lorsque le piéton passait devant le VA avec une marge de sécurité de 1.5 mètre. Inversement, le niveau le plus faible de perception du risque (triangle pointant vers le bas) a été observé lorsque le piéton est passé après le VA avec une marge de sécurité de 2.5 mètres. Les deux autres conditions (cercles) ont donné lieu à un niveau intermédiaire de risque subjectif.

Cinq des sept facteurs manipulés n'apparaissent pas dans le meilleur réseau, à savoir les facteurs Côté, Orientation, V-vitesse, P-vitesse. Ces facteurs sont liés à la dynamique initiale des situations de croisement. Cela révèle que l'estimation subjective du risque de collision par les participants a été principalement influen-

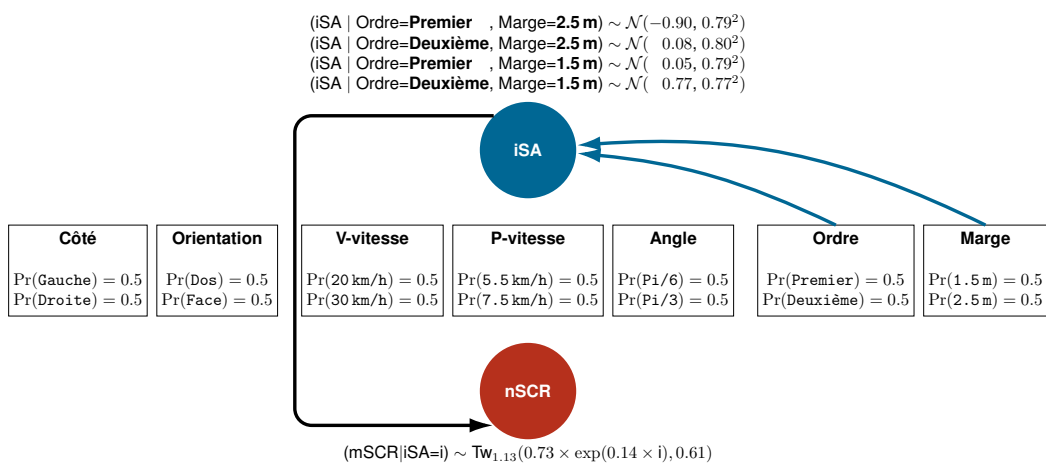


FIGURE 7.5 – Coefficients estimés pour le meilleur réseau bayésien obtenu pour les indicateurs iSA et nSCR.

cée par les facteurs déterminant la position relative du piéton et du VA lorsque les deux sont proches l'un de l'autre. De plus, le meilleur réseau bayésien présenté dans la figure 7.5 suggère que l'indicateur iSA est impliqué dans l'estimation des coefficients de la distribution Tweedie de l'indicateur nSCR. Cela signifie que les variations de l'indicateur iSA peuvent expliquer en partie les variations de l'indicateur nSCR. La figure 7.6B montre que l'augmentation de iSA entraîne une augmentation de l'indicateur nSCR tout en diminuant la probabilité de non-réponse. Le nombre de SCR est donc mieux expliqué par l'évaluation subjective du risque plutôt que directement par les facteurs externes manipulés dans cette expérience.

7.4.2 Résultats pour les indicateurs mSA and mSCR

La figure 7.7 montre les deux meilleurs réseaux bayésiens obtenus pour la paire d'indicateurs mSA et mSCR. Ces deux réseaux (7.7A et 7.7B) sont identiques à l'exception de la relation entre le facteur Orientation et l'indicateur mSA, qui n'apparaît que dans le second réseau. Cette relation pénalise le BIC de 1.6 points.

Ainsi, les deux réseaux diffèrent avec un faible degré de preuve selon les critères de Raftery. Les facteurs Marge et Ordre ont eu la plus grande influence sur les indicateurs. Ce sont les deux seuls facteurs sélectionnés par le meilleur réseau bayésien (7.7A). Cependant, les résultats montrent que le facteur Orientation a également influencé les valeurs de l'indicateur mSA. Ce facteur apparaît donc

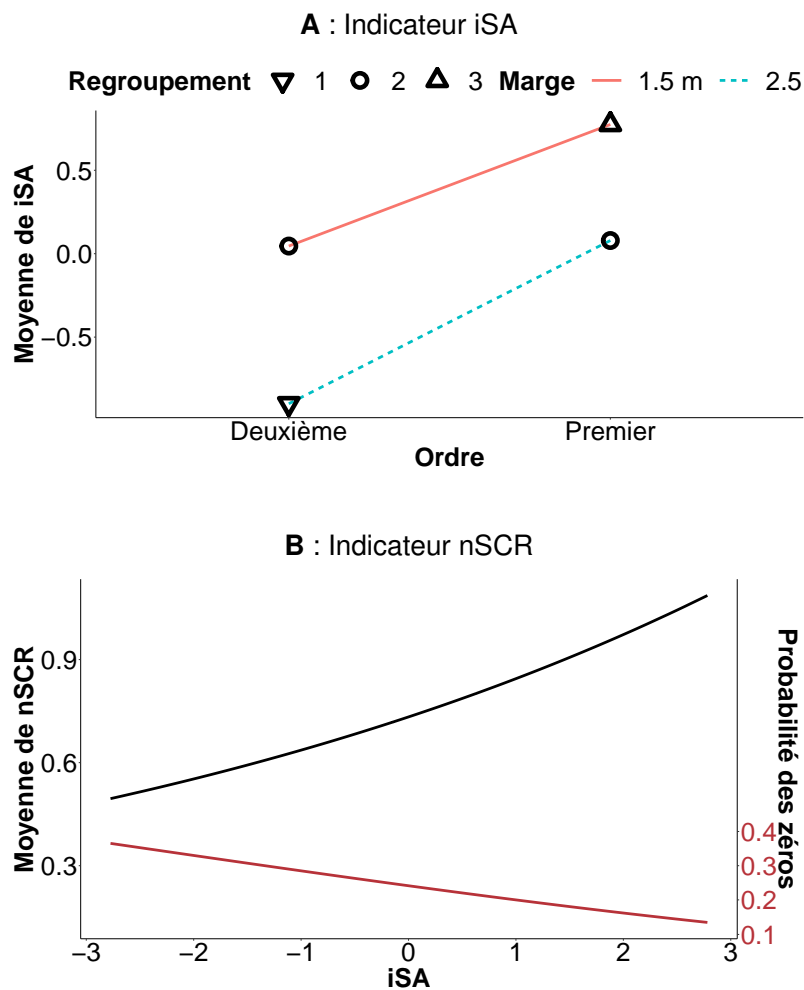


FIGURE 7.6 – Moyennes des indicateurs iSA et nSCR.

dans le deuxième meilleur réseau bayésien (7.7B). Le détail des coefficients estimés pour ce réseau est donné dans la figure 7.8.

La figure 7.9A montre l'effet des facteurs Marge, Ordre et Orientation sur la moyenne de l'indicateur mSA. Une marge de sécurité plus petite augmente la moyenne de l'indicateur mSA. Lorsque le piéton a traversé devant le VA, l'indicateur mSA a également été plus élevé en moyenne.

Ces deux effets semblent être cumulatifs. Cependant, l'influence de l'ordre est modulée par le facteur Orientation : lorsque les piétons ont traversé la voie en marchant dans la même direction que le VA, l'effet du facteur Ordre a été plus important que lorsque les piétons ont fait face au VA. Ces augmentations sont similaires pour les deux marges de sécurité testées. En moyenne, les valeurs de l'indicateur mSA ont augmenté de 1 lorsque les piétons se déplaçaient dans la

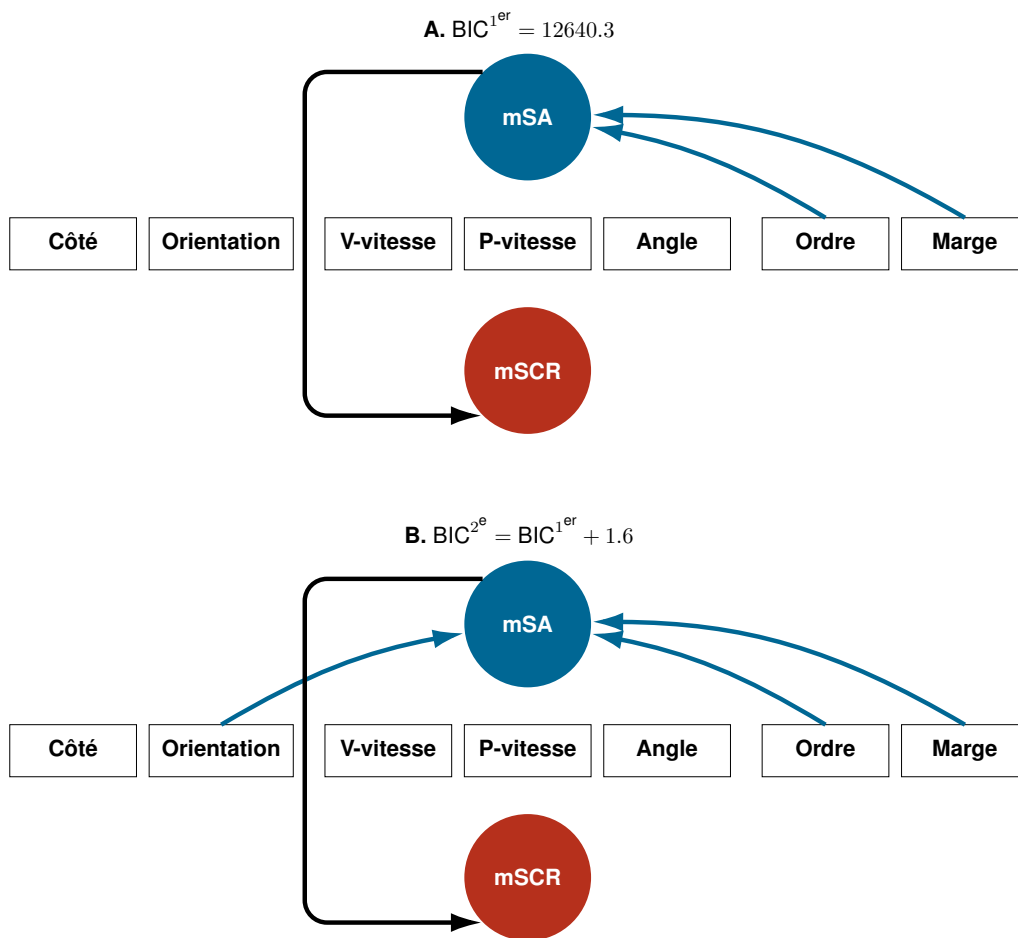


FIGURE 7.7 – Graphe des meilleurs réseaux bayésiens obtenus pour les indicateurs mSA and mSCR.

même direction que le VA et passaient devant plutôt que derrière. L'augmentation moyenne a été de 0.23 lorsque les piétons traversaient devant le VA en lui faisant face. Par conséquent, les participants ont perçu une plus grande différence dans les situations où les piétons se déplaçaient dans la même direction que le VA.

L'analyse par regroupement a permis de distinguer cinq niveaux de mSA, comme l'indiquent les symboles de la figure 7.9A. Les deux niveaux de risque subjectif les plus élevés (triangle pointé vers le haut et carré) ont en commun de correspondre à des conditions avec une marge de sécurité de 1.5 m, lorsque le piéton faisait face au VA (quel que soit l'ordre de passage) ou lorsqu'il tournait le dos au VA en passant en premier. Les deux niveaux de risque subjectif les plus faibles (triangle pointe en bas et losange) ont en commun de correspondre à des conditions où le piéton est passé en second avec une marge de sécurité de 2.5 m. Les trois

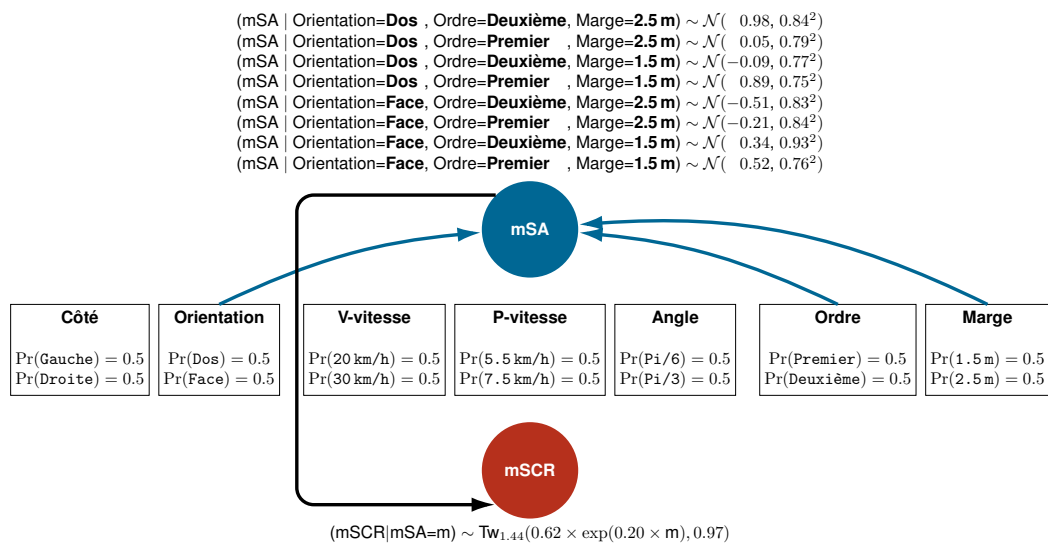


FIGURE 7.8 – Coefficients estimés pour le meilleur réseau bayésien obtenu pour les indicateurs mSA et mSCR.

dernières conditions (cercle) ont donné lieu à un niveau de mSA intermédiaire.

Les deux meilleurs réseaux sont cohérents dans la mesure où ils montrent tous deux la relation entre les indicateurs mSA et mSCR. La figure 7.9B montre l'évolution de l'indicateur mSCR en fonction des valeurs mSA. Cette figure est très similaire à celle présentée pour l'indicateur nSCR, sauf que la moyenne de l'indicateur mSCR augmente proportionnellement plus vite en fonction des valeurs mSA. Le coefficient de puissance exponentielle est de 0.2 pour l'indicateur mSA alors qu'il est de 0.14 pour l'indicateur iSA (voir Figure 8A).

En conclusion, les résultats obtenus ont toujours témoigné d'une relation entre les indicateurs des deux types de perception du risque : iSA et nSCR d'une part et mSA et mSCR d'autre part. De plus, l'influence sur les indicateurs de perception du risque de seulement trois des sept facteurs a été mise en évidence dans les meilleurs réseaux bayésiens. La vitesse relative du VA par rapport au piéton ainsi que la position initiale relative du piéton sur la voie et son angle de croisement (facteurs V-vitesse, P-Vitesse, Côté et Angle) n'ont donc pas eu d'effets significatifs sur les indicateurs de perception du risque analysés de cette étude.

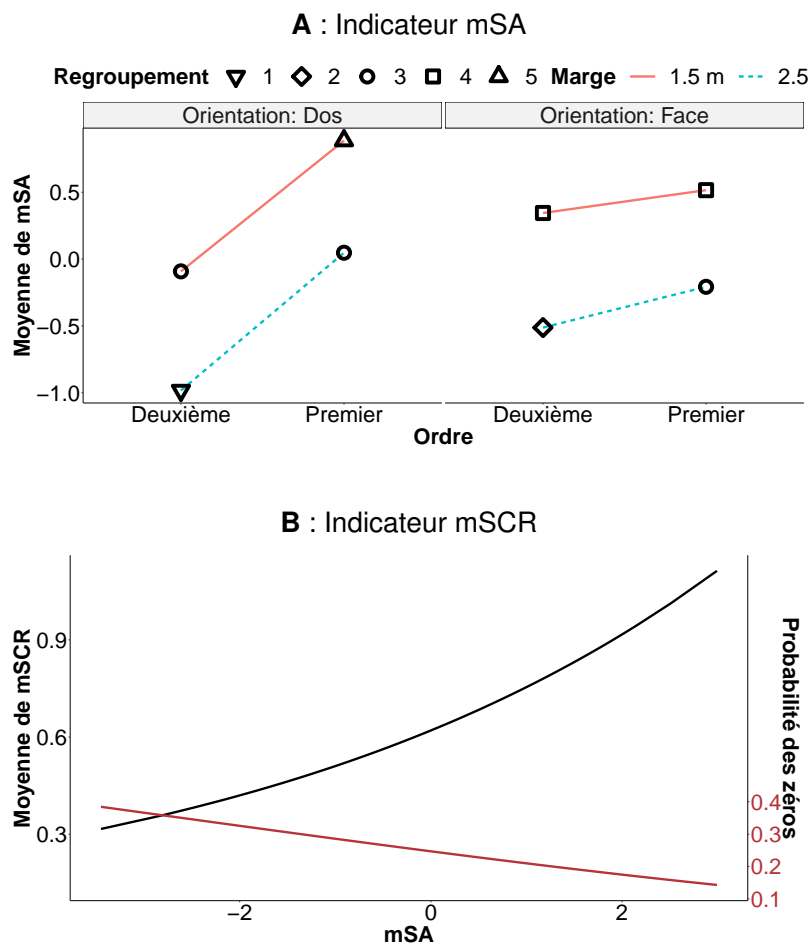


FIGURE 7.9 – Moyennes des indicateurs mSA et mSCR.

7.5 Discussion et conclusion

Cette étude a permis d'examiner comment le passager d'un VA perçoit le risque de collision avec des piétons dans des situations de croisement. Une méthode d'analyse par réseaux bayésiens a été utilisée pour déterminer lesquels des sept facteurs déterminant la dynamique de croisement VA-piéton étaient susceptibles d'influencer la perception du risque. La dépendance entre l'évaluation subjective du risque et les SCRs a également été examinée.

Les meilleurs réseaux bayésiens ont montré que la marge de sécurité (distance minimale entre le VA et le piéton) et l'ordre de passage du piéton (le piéton traverse-t-il la trajectoire du VA avant ou après le passage du VA ?) étaient les facteurs les plus déterminants dans l'évaluation de la perception du risque de collision. En moyenne, les indicateurs d'évaluation subjective ont été plus élevés lorsque la

marge de sécurité entre le piéton et le VA était de 1.5 m plutôt que de 2.5 m. Les moyennes ont aussi été plus élevées lorsque les piétons passaient devant le VA plutôt que derrière. Ces effets semblant être cumulatifs, la perception du risque la plus élevée a été observée lorsque les piétons passaient devant le VA avec une marge de 1.5 m. Un troisième facteur d'importance secondaire (le piéton faisait-il face ou tournait-il le dos au VA ?) a modulé les amplitudes maximales des indicateurs de perceptions du risque. Par ailleurs, il était attendu que l'évaluation du risque varie en fonction de la vitesse relative et de l'angle d'approche des piétons. Ces facteurs ont conditionné l'évolution de l'angle d'approche et du TTI. Pendant les situations de traversée, les vitesses du VA et du piéton étaient constantes, tout comme l'angle de traversée du piéton ; l'évaluation de l'angle d'approche ou du TTI aurait pu permettre aux participants de déterminer si une collision allait se produire (Cutting et al., 1995 ; Ondrej et al., 2010 ; Schwarz, 2014). Cependant, les résultats montrent que ces facteurs n'ont pas été déterminants dans l'évaluation du risque de collision par les participants. Au contraire, les participants ont attendu que les piétons soient proches du VA pour juger de l'imminence d'une collision. Ainsi, la proximité spatiale a eu plus d'effet que les facteurs modifiant les conditions d'approche. Cette conclusion pourrait n'être valable que dans les situations où les piétons et les véhicules se déplacent à faible vitesse, comme dans les espaces partagés.

La relation entre l'évaluation subjective du risque et les SCRs a été examinée. Elle confirme les résultats de l'étude du chapitre 6, qui portait sur l'évaluation du risque de collision lors des manœuvres d'évitement des piétons. Cette nouvelle étude fournit de nouvelles preuves de la relation entre l'évaluation subjective et l'AED. En particulier, les résultats ont révélé que les variations des indicateurs de SCRs étaient plus susceptibles d'être expliquées par des variations de l'évaluation subjective que par des variations des sept facteurs manipulés. Il a été supposé que les SCRs et l'évaluation subjective appartenaient à deux types distincts de perception du risque, les processus de type 1 et de type 2 respectivement (Evans, 2008 ; Evans et Stanovich 2013). Sous le contrôle du système nerveux autonome (SNA), les SCRs associées aux processus de type 1 révéleraient une réaction rapide et automatique de l'organisme face à un danger de collision. L'évaluation subjective, associée aux processus de type 2, serait plutôt liée aux processus cognitifs im-

pliqués dans l'évaluation du risque de collision par l'individu (Kouabéna et al., 2007). Il n'y a pas de consensus dans la littérature concernant la nature de la relation entre les deux types de perception. Cette étude fournit un exemple concret suggérant que l'évaluation subjective du risque de collision par un individu peut avoir un effet sur son état physiologique, plutôt que le contraire. De plus, le lien entre les évaluations subjectives et les SCRs, ainsi que le fait que les situations moins risquées entraînent plus souvent une absence de SCR, suggèrent que les réponses physiologiques reflètent la perception d'un risque relativement élevé alors que l'évaluation subjective est plus progressive. Dans des études futures, d'autres mesures physiologiques pourraient être incluses dans l'analyse (par exemple, la fréquence cardiaque, la dilatation des pupilles, le taux de clignement).

En conclusion, l'analyse par réseaux bayésiens a révélé deux résultats principaux. (1) Parmi les facteurs qui font varier la dynamique d'approche des piétons, seuls ceux qui interviennent lorsque le piéton est proche du véhicule ont un effet sur l'évaluation du risque de collision. (2) Lors des situations de traversée, les variations de l'AED semblaient dépendre de l'évaluation subjective d'un risque de collision. Ces résultats suggèrent que l'évaluation du risque de collision se produirait principalement dans les situations de proximité des piétons. Dans d'autres cas, le VA pourrait continuer de progresser parmi les piétons sans causer de sentiment d'insécurité chez son passager. Cela soulève la question des marges de sécurité qu'un passager dans un VA pourrait tolérer lorsqu'il se déplace dans un espace partagé. La définition de ces marges de sécurité dans un contexte d'interaction dynamique avec les piétons devra faire l'objet de travaux futurs. De plus, les résultats de cette étude suggèrent également que les processus cognitifs impliqués dans la tâche d'évaluation de la perception du risque de collision peuvent conduire à des adaptations physiologiques. Des études ultérieures pourraient permettre de déterminer si cette relation peut être généralisée à d'autres mesures physiologiques.

DISCUSSION GÉNÉRALE, PERSPECTIVES DE RECHERCHE ET CONCLUSION

Synthèse des travaux

Ce travail de thèse a permis d'étudier la perception du risque d'un passager de véhicule autonome (VA) en temps réel en recourant à la fois à une mesure explicite de cette perception, qui témoigne du vécu subjective du passager, et à une mesure implicite, sous la forme de réponses physiologiques, les *skin conductance responses* (SCRs). Les approches empiriques ont été organisées pour répondre à trois objectifs :

- objectif 1 : étude de la dynamique de perception explicite du risque ;
- objectif 2 : étude des facteurs (externes) qui influencent les mesures implicites et explicites de la perception du risque ;
- objectif 3 : étude de la relation entre les mesures implicites et explicites de la perception du risque.

Deux expérimentations ont été développées pour atteindre ces objectifs. La première expérimentation a permis d'étudier la perception du risque d'un passager de VA lorsque ce dernier évite des piétons en trajectoire rectiligne. La deuxième expérimentation a permis d'étudier la perception du risque d'un passager de VA naviguant en trajectoire rectiligne lorsque des piétons viennent traverser sa route. Pour répondre au premier objectif, une modélisation par processus autorégressif avec variable externe (*auto-regressive with external input* (ARX)) a été conduite sur la base des données d'évaluation subjective de la première expérimentation. La modélisation a révélé que la dynamique d'approche d'un piéton par le VA, mesurée en particulier au travers de l'évolution du *time-to-collision* (TTC), permettait

de prédire dans la majorité des cas l'évolution de l'évaluation du risque de collision par le passager. Toutefois, dans certains cas, cette modélisation n'a pas abouti à des résultats satisfaisants. C'était le cas en particulier lorsque les participants marquaient des temps d'arrêt dans leur évaluation, c'est-à-dire des périodes où leur évaluation restait constante en dépit de la dynamique d'approche d'un piéton. La modélisation développée a donc permis d'évaluer le potentiel, mais également les limites d'une modélisation ARX. Si elle est basée sur des facteurs dont l'évolution est uniquement régie par la dynamique de mouvement, une modélisation ARX est pertinente pour identifier une évaluation de la perception du risque présentant une certaine progressivité. Une telle modélisation nécessite d'être complétée par d'autres méthodes dès lors qu'un individu hésite ou interrompt son évaluation, ou plus largement dès lors qu'un individu rend compte d'une évaluation atypique.

Pour répondre aux objectifs 2 et 3, une modélisation par réseau bayésien a été développée. Cette modélisation a permis d'étudier la relation entre l'évaluation subjective du risque de collision par le passager avec ses réactions électrodermales (SCRs). Deux principaux résultats ont émergé de cette modélisation.

- La perception du risque de collision d'un passager de VA apparaît essentiellement lorsque le VA est proche d'un piéton. Cela suggère que le passager peut tolérer une certaine proximité avec un piéton, mais qu'à partir d'un certain seuil (déterminé par la distance de sécurité et la dynamique d'interaction), il commence à percevoir un risque de collision.
- L'évaluation subjective influence l'activité électrodermale (AED) d'un passager. Dans les situations expérimentées, il a été observé que les SCRs n'apparaissent que dans les situations les plus extrêmes, c'est-à-dire lors des dynamiques d'interaction les plus dangereuses. Dans ces cas, la modélisation par réseau bayésien a révélé que l'amplitude des SCRs dépendait de l'amplitude de l'évaluation subjective, et non le contraire.

Ces résultats vont être discutés plus en détail en considérant tout d'abord dans quelle mesure ce travail de thèse a permis d'améliorer la compréhension de la perception du risque, dans ses dimensions implicites et explicites. Il sera ensuite discuté dans quelle mesure la perception du risque peut être dissociée de la notion d'inconfort, privilégiée dans d'autres études, au regard des résultats obtenus de ce projet. Les contributions méthodologiques, concernant la modélisation des

données, et applicatives, concernant les espaces partagés en ville, seront ensuite abordées. Enfin, avant de conclure, certaines des limites de ce travail seront discutées, avec des perspectives associées.

Perception implicite et explicite du risque

De nombreuses théories issues de domaines variés en psychologie soutiennent l'idée que l'être humain appréhende le monde de deux manières fondamentales. Evans (2008), ainsi que Evans et Stanovich (2013), font la synthèse de ces travaux et distinguent les deux types de processus sous la terminologie de processus de type 1 et de type 2. D'après ces auteurs, les processus de type 1 correspondent à un système expérientiel qui est intuitif, rapide, et peu accessible à la conscience, donc qui opère sur un mode implicite. Il donnerait lieu à des réactions automatiques et spontanées de l'individu à la situation présente. Les processus de type 2 correspondent à un système analytique qui met en œuvre des règles normatives, comme le calcul des probabilités, la logique formelle et l'évaluation subjective de la situation, qui est dans ce cas explicite. Il repose sur la mémoire de travail, les capacités et les ressources cognitives de l'individu. Ce système est relativement lent et nécessite un contrôle conscient.

La distinction entre deux types processus dans le domaine plus spécifique de la perception du risque a été discutée par Slovic et al. (2004). Les auteurs ont fait la distinction entre la perception du risque en tant que sensation (*risk as feelings*) et la perception du risque en tant qu'analyse (*risk as analysis*). Vu comme une sensation, la perception du risque a nécessairement une composante émotionnelle et permettrait à un individu de saisir rapidement et spontanément le caractère dangereux d'une situation. Ainsi, cela lui permettrait de se préparer rapidement à une réaction de fuite ou de lutte face à une menace. Vu comme une analyse, la perception du risque résulterait d'un raisonnement conscient de l'individu. Cette analyse rationnelle lui permettrait d'évaluer le caractère dangereux d'une situation au regard de critères rationnels. Selon Slovic et al. (2004), la prise de décision exige une bonne intégration des deux modes de pensée. Les deux systèmes ont leurs avantages, leurs biais et leurs limites. Comprendre la perception du risque, c'est donc comprendre l'interaction complexe entre l'émotion et la raison. D'une part,

comment appliquer la raison pour tempérer les fortes émotions engendrées par certains événements à risque ? D'autre part, comment insuffler les « doses de sentiment » nécessaires dans des circonstances où le manque d'expérience pourrait nous laisser trop « froidement rationnels » ?

Dans ce travail de thèse, une mesure des réponses électrodermales (SCRs) des participants a été réalisée au cours de différentes interactions VA-piéton. Les SCRs sont des grandeurs physiologiques qui varient en fonction de l'activité des glandes sudoripares sous contrôle du système nerveux autonome (SNA), en particulier du système sympathique. Il s'agit du système qui stimule l'augmentation de la production métabolique (sudation, pression artérielle, rythme cardiaque, etc.) pour préparer l'organisme à faire face à des défis extérieurs (Poh et al., 2010). Dans la littérature, les SCRs ont souvent été utilisées pour l'étude du stress ou de la perception du risque en situation de conduite. Par exemple, Daviaux et al. (2020) ont soumis des participants à des événements stressants en conduite active sur simulateur. Ils ont couplé une mesure des SCRs avec une mesure subjective du stress évaluée par les participants au travers d'un questionnaire soumis à la fin de l'expérimentation. Leurs résultats ont mis en évidence la relation entre l'amplitude des SCRs et l'évaluation subjective des participants. Par ailleurs, Perello-March et al. (2022) ont étudié la variabilité du rythme cardiaque et les SCRs de passagers d'un VA naviguant dans des conditions de circulations différentes (densité et variabilités des usagers de la route) et lorsque le VA arrivant à une intersection devait subitement éviter un véhicule. Leur étude a révélé que les SCRs étaient de bons indicateurs de perception du risque dans les cas de danger imminent.

Dans les expérimentations menées au cours de la thèse, il a été considéré que les SCRs étaient associées à une perception implicite du risque de collision. Au regard de la distinction établie par Evans (2008) et Evans et Stanovich (2013), il a été supposé que les SCRs rendaient compte de processus de perception du risque appartenant au type 1. Par ailleurs, il a aussi été demandé aux participants d'évaluer le risque en temps réel au moyen d'un potentiomètre rotatif. Cela a permis de disposer d'une mesure explicite du risque reposant sur une analyse du caractère dangereux perçu au cours des interactions VA-piéton. Il a été considéré que cette mesure était associée à des processus de perception du risque de type 2. La relation entre ces deux mesures a été investiguée au moyen de réseaux bayésiens.

Les résultats des études suggèrent que les processus cognitifs impliqués dans la tâche d'évaluation du risque de collision (processus de type 2) déterminent les réactions physiologiques des participants (processus de type 1), et non le contraire. Ce résultat peut sembler contre-intuitif si l'on considère que les processus de perception du risque de type 1 sont supposés être plus rapides que les processus de type 2 pour permettre une réaction spontanée de l'individu. Ce paradoxe apparent peut être discuté au regard de deux considérations, l'une méthodologique, l'autre relative au contexte dans lequel l'évaluation du risque était réalisée.

Sur le plan méthodologique, les propriétés de l'AED font qu'on ne peut dresser de conclusions sur les relations temporelles entre les deux mesures étudiées. En effet, il peut se passer un délai de trois secondes avant d'observer une SCR chez un participant venant d'être soumis à une stimulation (Boucsein, 2012). C'est pour cela que l'ordre d'apparition des SCRs par rapport aux évaluations subjectives n'intervient aucunement dans les modélisations proposées. La relation de dépendance mise en évidence dans ces travaux ne doit donc pas être considérée comme une relation de dépendance temporelle, en dépit de ce que peuvent suggérer les représentations graphiques proposées dans les analyses. La modélisation par réseau bayésien est uniquement basée sur les variations d'amplitude ou d'intensité de l'évaluation subjective et des SCRs. Cette approche permet d'identifier la relation entre les mesures indépendamment de l'influence des facteurs de la dynamique d'interaction VA-piéton. Alors qu'il aurait été possible d'observer que les mesures des deux types de perception évoluent sans relation de dépendance ou que ce sont les mesures de perception de type 1 qui influencent les mesures de type 2, c'est bien l'autre conclusion qui émerge des études. En comparaison des SCRs, l'évaluation de la perception du risque de collision a été plus nettement influencée par les facteurs de la dynamique d'interaction VA-piéton. De surcroît, lorsque cette évaluation subjective atteignait un certain niveau, elle semblait déclencher des SCRs.

Ce résultat sur la relation entre les deux types de processus de perception du risque reste cependant relatif aux situations expérimentées dans ce projet. En effet, dans les situations étudiées, les participants faisaient l'expérience d'un risque progressif, ils ont eu le temps d'analyser et d'évaluer les interactions avec les piétons, sans danger apparaissant soudainement. L'hypothèse la plus probable est donc

que le risque était analysé rationnellement tant que les trajectoires d'interception n'étaient pas critiques. En revanche, lorsque les conditions devenaient plus critiques (TTC faible dans la première expérimentation, proximité trop grande dans la seconde), la perception subjective d'un risque de collision a augmenté fortement et semble avoir déclenché des processus de type 1. La relation obtenue aurait pu être différente dans des situations où un piéton aurait subitement fait irruption devant le VA. Dans de tels cas, il aurait par exemple été possible d'observer une relation de dépendance allant des SCRs vers l'évaluation subjective, voire uniquement des SCRs sans variation de l'évaluation subjective des participants, qui n'auraient pas eu le temps de restituer un danger de collision sur le potentiomètre. Il apparaît donc intéressant de mener d'autres études afin d'étudier la relation entre les deux types de processus en faisant varier les contextes et les situations rencontrées par les participants. En plus de s'appuyer sur les SCRs, les études futures pourraient aussi s'intéresser à d'autres mesures des processus du type 1. On pourrait considérer, par exemple, des grandeurs physiologiques également sous influence du système nerveux sympathique (SNS) comme la dilatation pupillaire ou la fréquence cardiaque, mais aussi des mesures de l'attitude des participants, leur posture ou leurs expressions faciales en situation de risque de collision.

Perception du risque et inconfort

Une autre question qu'il est possible de se poser à la suite de ces travaux, même si elle n'a pas été directement traitée, est celle de la différence entre la perception du risque de collision et la notion de confort. Le confort est considéré comme un des prérequis de la conduite automatisée, avec l'efficacité, la sécurité, l'accessibilité et l'inclusion sociale (ERTRAC, 2019). La littérature ne donne pas de définition univoque du confort (cf. sec. 2.5). Slater (1985, 1986) définit cette notion de manière très globale comme « un état agréable d'harmonie physiologique, psychologique et physique entre un être humain et son environnement ». D'après Bellem et al. (2018), le confort est généralement associé à un sentiment de bien-être et à l'attribution d'une valence positive à l'entité qui le suscite et, selon la conception que l'on a du confort, à l'absence d'inconfort et de malaise. D'après Beggiato et al. (2019), de telles définitions du confort demeurent assez larges et peuvent

présenter des similitudes et des chevauchements avec les concepts connexes de stress, de charge mentale, de vigilance, d'anxiété, de peur. Dans les travaux de Hartwich et al. (2018), l'inconfort a été opérationnalisé comme un état subjectif et désagréable de tension psychologique ou de stress lié à la conduite dans des moments où l'harmonie entre le conducteur et l'environnement est restreinte.

Rossner et Bullinger (2019) ont étudié l'inconfort d'un passager en faisant varier le positionnement latéral d'un VA lorsqu'il croisait un autre véhicule (camion ou voiture) allant dans la direction opposée. Radhakrishnan et al. (2020) ont étudié l'inconfort d'un passager en fonction de la dynamique du VA à proximité d'un obstacle sur le bord de la route (voiture garée, travaux, ou abris de piétons). Dans l'expérimentation menée par Hartwich et al. (2018), les participants étaient confrontés à plusieurs situations d'inconfort nécessitant diverses manœuvres de conduite du VA, ainsi que des interactions du VA avec d'autres véhicules. Parmi les situations testées, il y avait le franchissement d'une intersection non signalisée avec priorité au VA et un véhicule approchant rapidement (mais s'arrêtant) par la droite, une manœuvre d'évitement d'un camion garé sur le côté droit d'une route de campagne à une voie et l'approche d'un véhicule de chantier roulant plus lentement, jusqu'à ce que le temps minimum de contact soit de 4.5 s. Cette expérimentation a été par la suite reprise dans les travaux sur le confort menés par Rossner et al. (2020) et Beggiato et al., (2019).

Cette analyse de la littérature illustre le fait que certaines situations d'inconfort peuvent être liées à la perception du risque de collision du VA avec des éléments de son environnement. Par ailleurs, plusieurs études ont aussi mis en évidence que l'inconfort évalué par les participants pouvait être associé à des réactions physiologiques dépendantes du SNA comme le nombre et l'amplitude des SCRs, le diamètre pupillaire, ou le taux de clignement des yeux (Beggiato et al., 2019 ; Radhakrishnan et al., 2020 ; Dillen et al. 2020). À l'instar du risque de collision qui a été traité dans cette thèse, les mesures physiologiques pourraient également servir d'indicateur du niveau de confort des passagers.

À la suite de cette réflexion, il apparaît donc que les notions de confort et de risque de collision ne seraient pas disjointes. Le confort serait plutôt une notion plus générale que la perception d'un risque de collision. Par exemple, la dynamique du VA peut affecter l'inconfort d'un passager sans qu'il y ait un danger de collision

(Rossner et al., 2020 ; Radhakrishnan et al., 2020 ; Dillen et al. 2020). Et dans certains cas, l'inconfort d'un passager peut être causé par la perception d'un risque de collision. Il est donc possible de s'interroger sur ce qui a été vraiment évalué par les participants au cours des expérimentations menées dans ce travail de thèse.

Pour traiter cette problématique à l'issue de la première expérimentation, un questionnaire avait été soumis aux participants. Il leur était demandé d'exprimer sur une échelle de Likert dans quelle mesure leur évaluation subjective avait porté sur leur perception du risque de collision, leur désaccord avec le comportement du véhicule, leur niveau d'inconfort personnel et le niveau d'inconfort pour les piétons. L'analyse des réponses à ce questionnaire a confirmé que les participants avaient suivi la consigne et évalué principalement le risque de collision. De plus, les résultats ont révélé que les participants avaient aussi évalué leur niveau de désaccord avec les trajectoires du véhicule. Cela semble logique et confirme qu'il existe un lien entre la perception d'un risque de collision et l'évaluation de la trajectoire d'évitement suivie par le VA. Dans une moindre mesure, les résultats ont aussi révélé que les participants avaient évalué leur inconfort personnel et, dans une moindre mesure encore, le niveau d'inconfort pour les piétons. Certains participants ont donc associé leur perception du risque de collision à un niveau d'inconfort. Ces résultats qualitatifs complémentaires sont trop sommaires pour pouvoir véritablement éclairer la question du rapport entre perception et inconfort, mais ils suggèrent une certaine superposition entre les deux dimensions psychologiques, tout en confirmant que c'est avant tout un risque de collision que les participants ont évalué.

Pour essayer de lever l'ambiguïté dans la deuxième expérimentation, des collisions fictives ont été introduites dans le plan expérimental. Puisque des collisions se produisaient effectivement, chaque nouveau piéton traversant la rue ne pouvait être perçu que comme une source potentielle de collision. Ce choix méthodologique nous semble propice à ce que les participants aient essentiellement évalué un risque d'entrer en collision avec un piéton plutôt qu'un niveau de confort.

En conclusion, les travaux de cette thèse se sont concentrés sur la perception du risque de collision d'un passager de VA. Ils ne permettent pas d'étudier le lien avec la notion de confort qui, au vu de littérature et du questionnaire soumis aux participants de la première expérimentation, pourrait être liée. La relation entre les deux notions mériterait d'être analysée dans de futures recherches. On pourrait

par exemple évaluer la dynamique d'évolution du ressenti du passager, c'est-à-dire dans quelle mesure le confort de navigation pourrait se transformer en inconfort lorsque le comportement du VA s'écarte de celui attendu, puis un risque perçu au-delà d'un certain seuil d'incertitude. Si l'inconfort et la perception du risque de collision peuvent dans certains cas être associés à un même ressenti chez le passager d'un VA, il convient de préciser le recouvrement des deux notions.

Apports méthodologiques

À ce jour, il y a eu très peu d'études portant sur la modélisation computationnelle de la perception du risque par un passager de VA. Très récemment, Kolekar et al. (2020, 2021) ont examiné cette question. La perception du risque de collision a été associée à la réaction d'évitement d'un obstacle par un conducteur. Cette réaction d'évitement a été ensuite couplée à un questionnaire pour définir le Driver's Risk Field : un modèle basé sur des équations paramétriques permettant de déterminer la perception du risque d'un passager et d'adapter le comportement d'un VA en fonction de cette perception. Dans les travaux de Wang et al. (2022), une modélisation par réseau bayésien dynamique a été employée pour adapter le comportement d'un VA en fonction de la dynamique de son environnement. Cependant, dans ce modèle, la perception du passager n'a pas été prise en compte.

D'autres études se sont plus particulièrement intéressées au ressenti du passager de VA à l'aide de mesures subjectives et physiologiques. Par exemple, Beggiato et al. (2019) ont étudié la notion de confort en s'appuyant à la fois sur des mesures physiologiques, et une mesure subjective à l'aide d'une télécommande. Une méthodologie similaire de mesure du confort a aussi été utilisée dans d'autres travaux sur le ressenti d'un passager de VA comme ceux de Telpaz et al. (2018) qui ont mis au point une télécommande avec un curseur rotatif pour que des passagers de VA puissent évaluer leur ressenti en temps réel lors de situation de navigation. Cependant, dans le cas de Beggiato et al. (2019) comme dans celui de Telpaz et al. (2018), aucune modélisation n'est proposée pour rendre compte des liens entre les différents types de mesure et leur capacité à prédire la perception du risque.

C'est justement pour combler ce manque dans la littérature que ce travail doctoral a porté sur la modélisation de la perception du risque de collision d'un passager

de VA en combinant des mesures explicites et implicites du ressenti des passagers. Comme mentionné plus haut, les analyses ont été menées à partir de deux types de modélisations, chacune ayant pour but de répondre à des objectifs différents. Dans un premier temps, il a été question d'analyser la dynamique d'évaluation subjective du risque de collision par un passager de VA. Après plusieurs tentatives de modélisations non rapportées dans le manuscrit (e.g., déconvolution ou analyse en série chronologique), une modélisation ARX s'est finalement imposée (Ljung, 1987 ; Sanandaj et al., 2011 ; Tangirala, 2017). Cette approche prend en compte le fait que l'évaluation explicite de la perception du risque de collision résulte de deux composantes.

- Une composante autorégressive (AR) : l'évaluation explicite du risque à un instant t est dépendante de celle faite aux instants qui précèdent t . Ceci est dû à la contrainte liée à la rotation du potentiomètre. Par exemple, il n'est pas possible de passer du minimum au maximum sans passer par toutes les valeurs intermédiaires.
- Une composante externe (X) : l'évaluation du risque se fait en réaction à la perception continue de l'approche d'un piéton, à travers l'évolution du taux d'expansion rétinienne, c'est-à-dire l'inverse du TTC (Lee, 1976). Cette perception est retardée du fait du délai nécessaire au traitement cognitif.

Ce type de méthodologie est d'ordinaire utilisé en traitement du signal, en particulier pour identifier les paramètres d'un système linéaire invariant dans le temps (Tangirala, 2017). Le fait d'avoir employé une modélisation ARX pour analyser un processus d'évaluation subjective en temps réel a permis d'introduire une méthodologie originale pour le traitement de ce type de donnée. Cela offre la possibilité de mettre en relation la dynamique d'évaluation explicite d'un participant avec des éléments externes liés à la dynamique du VA et/ou à la dynamique d'interaction de ce dernier avec d'autres usagers. Par ailleurs, un modèle ARX est caractérisé par une réponse impulsionnelle (RI) qui se représente de manière graphique par une série temporelle. Cela apporte un nouvel outil pour analyser une variabilité intra- ou interindividuelle de la perception du risque suite à un évènement ou un ensemble d'évènements stimulants. Par exemple, en comparant graphiquement le délai et la dynamique de la RI d'un individu, il est possible de déterminer plus objectivement la nature de la variabilité des évaluations qu'en observant les profils d'évaluation

brute. En effet, on peut plus facilement caractériser les réponses en termes de délai d'initiation, d'intensité et de dissipation du risque perçu. De plus, une modélisation ARX n'impose pas de limite quant aux nombres de facteurs externes mis en relation avec l'évaluation subjective dont on souhaite étudier la dynamique. Un seul facteur a été introduit dans les analyses présentées (l'inverse du taux d'expansion rétinienne) afin de préserver le caractère interprétable des coefficients estimés. Pour cette raison, certaines approches testées n'ont pas été approfondies, comme les réseaux de neurones long short-term memory (LSTM). Bien que présentant de bons niveaux de performance, il est apparu impossible d'apporter une explication théorique des processus psychologiques associés aux coefficients de ce type de modèle.

Pour étudier l'influence de facteurs de la dynamique d'interaction VA-piéton sur les mesures de perception du risque et étudier la relation pouvant exister entre les deux types de mesures, une modélisation par réseau bayésien hybride a été développée. En effet, regarder l'influence de facteurs sur la perception du risque et étudier la relation entre deux types de perception du risque revient à étudier les relations de dépendances ou d'indépendance entre plusieurs variables à savoir les facteurs dynamiques et les indicateurs de perception du risque. Concrètement, cette méthode a nécessité trois étapes :

1. calculer tous les réseaux bayésiens possibles.
2. calculer les critères d'information bayésien, appelé *Bayesian information criterion* (BIC) (Schwarz, 1978 ; Raftery, 1995), de chacun des réseaux ;
3. et enfin, classer les réseaux bayésiens pour en sélectionner le meilleur (Denis et Scutari, 2015).

Cette approche par réseau bayésien s'est avérée bien adaptée pour l'étude simultanée des relations entre plusieurs variables. Elle permet d'identifier les relations les plus vraisemblables au regard d'un critère objectif. Le BIC a été choisi car il s'agit d'un critère privilégiant la simplicité d'un modèle. Si deux réseaux présentaient des vraisemblances équivalentes, le meilleur réseau était celui avec la structure de relation la plus simple. De plus, le seuil de significativité choisi pour distinguer le ou les meilleurs réseaux est lui aussi facile à interpréter. Un écart de deux points entre deux BIC signifie que le meilleur réseau est au moins trois fois plus vraisemblable que le réseau comparé (Raftery, 1995). Cependant, la méthode

de sélection du meilleur réseau bayésien reste ouverte à n'importe quel critère de sélection reposant sur la vraisemblance des données, comme l'AIC ou les versions généralisées (WAIC ou WBIC) proposées par Watanabe (2013).

Les réseaux bayésiens développés dans ce travail de thèse ont été spécifiquement adaptés à la nature des mesures étudiées. En particulier, une distribution Tweedie (Dunn et Smyth, 2005, 2008, 2018) a été employée pour caractériser la distribution d'indicateurs basés sur les SCRs, leur nombre et leur amplitude maximum. Ces indicateurs sont très utilisés dans la littérature (Caruelle et al., 2019), mais, à notre connaissance, elles n'ont jamais fait l'objet de modélisation par un phénomène stochastique. La distribution Tweedie est particulièrement adaptée pour l'étude de cette variable physiologique. D'une part, elle permet de quantifier la probabilité d'observer des SCRs chez un participant en fonction des facteurs externes. D'autre part, elle permet de prédire (en moyenne) l'amplitude de l'indicateur étudié.

Apports pour la navigation d'un véhicule autonome en espace partagé

Les résultats des expérimentations témoignent que la perception subjective du risque de collision des participants a moins été influencée par la dynamique d'approche que par les facteurs intervenant dans les derniers instants, lorsque le piéton est à proximité immédiate du VA. Ces résultats suggèrent donc que, dans le cas spécifique des espaces partagés où l'ensemble des usagers se déplacent à vitesse peu élevée, la perception du risque de collision par le passager d'un VA est moins basée sur une anticipation des trajectoires d'interception que sur une réaction à une proximité trop importante. Cela signifie que la perception d'un risque de collision n'apparaît qu'à partir d'une distance minimale avec un piéton. Cette idée rejoint les travaux sur le concept de proxémique introduit par Hall (1966). D'après ce principe, les distances d'interaction d'un individu avec son environnement et son ressenti seraient régies par quatre zones (intime, personnelle, sociale et publique). Plusieurs études récentes, ont révélé que l'approche proxémique pouvait être pertinente dans l'analyse du ressenti d'un passager de VA (Camara et Fox, 2021 ; Bilius et al., 2021). Ce ne serait que lorsque les interactions interviendraient dans la zone

personnelle d'un passager que ce dernier commencerait à percevoir un risque de collision. Plus généralement, le passager pourrait se définir un espace personnel dynamique dans lequel toute irruption pourrait provoquer la perception d'un risque de collision. Dans le contexte des espaces partagés, les situations où le VA devrait se rapprocher de très près d'un piéton pourraient être fréquentes. Dans ces situations, la perception d'un risque par le passager pourrait représenter une limite dans le processus d'acceptation des VA.

Une façon d'atténuer le sentiment d'insécurité des passagers pourrait être de développer des interfaces de communication à l'intérieur du véhicule (Bengler et al., 2020). Ces interfaces pourraient notamment permettre d'améliorer la capacité du passager à percevoir et même prédire le positionnement des piétons environnants. Ce type d'interface pourrait contribuer à la confiance que le passager pourrait accorder à son VA. D'après Mayer et al. (1995), la confiance est vue comme « la volonté d'une partie d'être vulnérable aux actions d'une autre partie sur la base de l'attente que l'autre partie réalise une action particulière importante pour le fiduciaire, indépendamment de la capacité à surveiller ou à contrôler cette autre partie » (p.712). Dans cette perspective, la confiance conduirait à la prise de risque dans une relation. Hoff et Bashir (2015) ont distingué deux composantes de la confiance. La confiance dispositionnelle qui est stable (i.e., non dépendante du contexte) et relative aux caractéristiques d'un individu comme son âge, son genre, sa culture et sa personnalité. Cela peut inclure une propension à faire confiance aux nouvelles technologies, y compris à l'automatisation des véhicules (Manchon, 2021). Par opposition, la confiance situationnelle dépend de facteurs externes. Dans le cas d'étude de ce projet, cela peut dépendre du comportement du VA (quelle distance minimale aux piétons il tolérera, par exemple ?) et de la complexité de l'environnement dans lequel il doit naviguer. L'évaluation de la complexité dont il est question est relative à l'individu, notamment aux ressources qu'ils consacrent à l'évaluation de la situation. Par exemple, si le trajet est habituel, le passager d'un VA pourra choisir de moins surveiller la situation et davantage accorder sa confiance au VA. En conclusion, la question de la confiance dans le VA n'a pas été abordée directement dans le cadre de ce travail de thèse, mais sa relation à la perception du risque est indéniable et mériterait d'être davantage étudiée dans le contexte particulier des espaces partagés.

Limites et perspectives associées

Le simulateur à base fixe utilisé au cours de ce projet ne permet pas de rendre compte du gabarit du véhicule ni de confronter des participants à un danger réel. De plus, une expérience sur simulateur de conduite ne sollicite que la vue alors que d'autres sens pourraient intervenir dans la perception du risque. Les participants ne pouvaient notamment pas ressentir les manœuvres du VA (changement de trajectoire, accélération). De plus, l'absence d'une cabine physique et l'absence de danger réel ont pu limiter les capacités des participants à évaluer leur proximité avec les piétons. Cependant, les simulateurs de conduite offrent généralement une bonne validité relative à défaut d'être absolu : ils permettent de révéler des mécanismes intervenant dans la conduite en véhicule réel à défaut de générer des métriques totalement conformes (Mecheri et Lobjois, 2018). Concernant la perception du risque, il semble raisonnable de penser que le risque virtuel n'est sûrement pas aussi impactant que le risque réel, mais que les mécanismes sous-jacents sont les mêmes (Kaptein et al., 1996 ; Wynne et al., 2019). Pour autant, il peut être utile de réaliser des évaluations complémentaires en milieu réel. En effet, la relation entre les deux types de perception du risque gagnerait à être évaluée dans un environnement dont la dynamique est à la fois plus réaliste et plus complexe. À mesure que l'environnement deviendrait plus complexe, de nouveaux facteurs de perception du risque pourraient être révélés (en plus de la dynamique VA-environnement).

Par ailleurs, les études qui ont été menées dans le cadre de ce projet de thèse n'ont pas évalué l'influence des changements de comportement du piéton ou des adaptations du comportement du VA sur le ressenti du passager. L'étude de ces phénomènes constitue une perspective de recherche intéressante. En effet, dans des situations réelles, un piéton pourrait finalement décider de ne pas traverser la voie devant le VA ou ce dernier pourrait ajuster sa vitesse pour passer devant le piéton ou au contraire, le laisser passer (Jayaraman et al., 2019 ; Nunez Velasco et al., 2019 ; Kalantari et al., 2021). La perception du risque d'un passager de VA naviguant parmi des piétons pose également la question du style de conduite souhaitée. Cette problématique implique la maîtrise de deux principaux critères dynamiques : la vitesse du VA et sa trajectoire (Basu et al., 2017 ; Rossner et al., 2020, Natarajan et al., 2022). Réunis, ces deux critères soulèvent la question des marges

de sécurité dynamiques qu'un passager de VA peut accepter lorsqu'il se déplace dans un espace partagé. Cette question représente un enjeu majeur, car elle pourrait contribuer au développement de navigations autonomes respectueuses de la sécurité de tous les usagers tout en s'accordant avec les conventions sociales en vigueur.

Conclusion

Cette thèse a reposé sur un travail interdisciplinaire, à l'articulation entre psychologie cognitive, ergonomie et mathématiques appliquées. Les analyses développées ont permis d'étudier la dynamique de la perception du risque, ainsi que l'articulation entre deux types de processus sous-tendant cette perception, au moyen de modélisations originales, à savoir des processus ARX et des réseaux bayésiens hybrides. Ces travaux proposent donc à la fois de nouvelles méthodologies et de nouveaux éléments de compréhension de la perception humaine, avec une visée applicative dans la perspective du développement de la conduite autonome à proximité de piéton. Elle permettra peut-être d'éclairer de futures recherches sur la perception du risque pour développer un comportement de navigation autonome satisfaisant les attentes de tous les usagers, piétons et passagers.



ANNEXES

A.1 Estimation et optimisation des coefficients de modélisation par réponse impulsionnelle

A.1.1 Identification d'un modèle ARX et optimisation de la distance d'arrêt

```
function [perf, dist_opt] = my_arx(delay, data, distance, risk)

sys_arx = arx(data, [2, 2, delay]);

% Save some data for the current iteration
response = compare(sys_arx, data);
response = response.y;

%% filter the response
min_id = find(distance == min(distance));
response(response < 0) = 0;

approche = zeros([numel(response), 1]);
approche(min_id:end) = 1;
dist_range = 0:5:20;
dist_perfs = zeros(numel(dist_range), 1);
%%

%% optimize distance for cutting response
for k = 1:numel(dist_range)
    dist = dist_range(k);
    resp = response;
    resp(approche & distance > dist) = 0;
    dist_perfs(k) = goodnessOfFit(resp, risk, 'NRMSE');
```

```

end
%%

dist_opt = dist_range(find(dist_perfs == max(dist_perfs), 1));
response(approche & distance > dist_opt) = 0;
perf = goodnessOfFit(response, risk, 'NRMSE');
end

```

A.1.2 Optimisation globale des paramètres

```

function metrics = arx_coeffs(home, participant, data)

data = data{1};

% define a threshold based on TTC
threshold = 5;

%% loop over the 32 pedestrians

all_pedestrians = unique(data.Pedestrian);
n_pedestrians = numel(all_pedestrians);
metrics = zeros(n_pedestrians, 10);

% directory for exporting the results
directory = sprintf('%s/ARX_coeffs/%s', home, participant);
s = warning('error', 'MATLAB:MKDIR:DirectoryExists');
try
    mkdir(directory);
catch
    fprintf('Directory %s already exists\n', directory);
end

% restore the warnings
warning(s)

% set up the warning for detecting strange data
s = warning('error', 'MATLAB:singularMatrix');
for k = 1:n_pedestrians
    %k = 1;

```

```

pedestrian = all_pedestrians(k);
test_idx = find(data.Pedestrian == pedestrian);

% prepare data for ARX
risk = data.Risk(test_idx);
stim = data.TauxExpansion(test_idx);
stim(stim < 1/threshold) = 0; % filter TTC > threshold
% store the distance for filtering output data
distance = data.Distance(test_idx);
test_data = iddata(risk, stim, .05);

try
    %% optimize delay
    delay_range = 2:2:60; % delay of 3 seconds max
    delay_perfs = zeros(numel(delay_range), 3);
    for i = 1:numel(delay_range)
        delay = delay_range(i);
        [perf, dist] = my_arx(delay, test_data, distance, risk);
        delay_perfs(i, :) = [delay, perf, dist];
    end

    %% fit the optimal model
    id_opt = find(delay_perfs(:, 2) == max(delay_perfs(:, 2)), 1);
    par_opt = num2cell(delay_perfs(id_opt, :));
    [delay_opt, ~, dist_opt] = deal(par_opt{:});
    order = [2, 2, delay_opt];
    arx_opt = arx(test_data, order);

    %% save the coefficients
    A_coeffs = arx_opt.A(2:end);
    B_coeffs = arx_opt.B(end-1:end);

    %% save the response and filter it
    response = compare(arx_opt, test_data);
    response = response.y;

    % filter the response
    response(response < 0) = 0;
    min_id = find(distance == min(distance));

```

```

    approche = zeros([numel(response), 1]);
    approche(min_id:end) = 1;
    response(approche & distance > dist_opt) = 0;

    %% Compute metrics and IR
    nrmse = goodnessOfFit(response, risk, 'NRMSE');
    metrics(k, :) = [pedestrian nrmse order dist_opt...
        A_coeffs B_coeffs];

    %% finally print message trace in the console
    fprintf("Participant %s --- pedestrian %d --- NRMSE=%5.2f%%\n", ...
        participant, pedestrian, nrmse*100);
catch
    fprintf('Data error for pedestrian %d\n', pedestrian);
end
end

% Restore the warnings back to their previous (non-error) state
warning(s);

%% Now export the results
fprintf("Now exporting ARX orders into CSV file\n");

%set column names
metrics = dataset2table(...
    dataset({metrics 'Pedestrian', 'NRMSE', 'a', 'b', 'n', 'Dist', ...
        'a1', 'a2', 'bn1', 'bn2'}));

writetable(metrics, sprintf('%s/arx_orders.csv', directory));

end

```

A.2 Estimation et comparaison de réseaux bayésiens hybrides

A.2.1 Calcul du BIC d'un réseau bayésien hybride

```

#' @param dag object of class 'bn'
#' @param data data.frame containing the variables in the model

```

```

#' @param by.node logical (default TRUE) that indicate if the
#'       score should be returned by node
#' @param use.tweedie logical (default TRUE)
#'
#' @return Numeric vector containing BIC scores
Hscore <-
  function(dag, data, by.node = TRUE, use.tweedie = TRUE) {
    if (is.character(dag)) dag <- bnlearn::model2network(dag)
    nodes <- rlang::set_names(names(dag$nodes), names(dag$nodes))
    scores <- purrr::map_dbl(.x = nodes,
                           .f = node_score,
                           use.tweedie = use.tweedie,
                           data = data,
                           dag = dag)

    if (by.node) {
      return(scores)
    } else {
      sum(scores)
    }
  }

```

A.2.2 Analyse par cluster

```

#' @param .data Data to use for performing the cluster analysis.
#' @param node Node name as character.
#' @param factors Should be an expression of a single factor, or a list of
#'       mutliple factors.
#' @param node_score Function to compute the BIC.
#'       For now, there are only two possibilities:
#'       Either the Gaussian distribution ('node_score = gaussian_score'),
#'       or the Tweedie distribution ('node_score = tweedie_score').
#'
#' @return A tibble containing the interaction groupings and
#'       their BIC scores. Fist columns are the interaction groupings,
#'       last column is the BIC. Groupings are specified with a
#'       group index that is, two interactions with the same grouping
#'       index belong to the same group.
cluster_analysis <-
  function(.data, node, factors,
          node_score = c(gaussian_score, tweedie_score))

```

```

{
  # create Interaction column
  data_inter <- .data %>%
    dplyr::mutate(Inter = interaction({factors}), sep = "-", drop = TRUE))

  # generate parts with the number of interaction
  parts <- partitions::setparts(x = length(unique(data_inter$Inter))) %>%
    as.matrix()

  # create chunk for each grouping (parallel processing)
  grouping_parts <- parts %>%
    magrittr::set_colnames(paste0("Grouping", 1:ncol(parts))) %>%
    tibble::as_tibble() %>%
    furrr::future_map_if(is.numeric,
      ~tibble::tibble(Inter = unique(data_inter$Inter),
        Grouping = as.factor(.x)))

  # compute the score (parallel processing)
  furrr::future_map(grouping_parts,
    .f = function(grouping) {
      bic <- merge(data_inter, grouping) %>%
        node_score(node = node, parents = "Grouping")
      tibble::deframe(grouping) %>% c(BIC = bic)
    }) %>%
    dplyr::bind_rows() %>%
    dplyr::arrange(BIC)
}

```

A.2.3 Fonctions annexes

Calcul du BIC pour un nœud

```

#' @param node character: node name
#' @param dag object of class 'bn'
#' @param data data frame containing the variables in the model
#' @param use.tweedie logical (default = TRUE), should the function use
#' the tweedie family for SCR node ?
#' @return The BIC score at the node with
#' attribute a 'components' attributes.
node_score <-
  function(data, node, dag, use.tweedie) {

```

```

if (is.character(dag)) dag <- bnlearn::model2network(dag)
k <- log(nrow(data))

if (!is.numeric(data[[node]])) {
  obj <- logLik_multinom(node, data)
  BIC(logliks = list(obj), k = k)
} else {
  parents <- dag$nodes[[node]]$parents

  if (stringr::str_detect(node, "SCR") & use.tweedie) {
    tweedie_score(data, node, parents, k)
  } else {
    gaussian_score(data, node, parents, k)
  }
}
}

#' @param node character: node name
#' @param data data frame containing the variables in the model
#' @param parents character (default NULL),
#'     containing the parent node names
#' @param k numeric: penalty used for computing the BIC.
#' The default value set to 'log(nrow(data=))'.
#' @return The BIC score at the node.
gaussian_score <-
function(data, node, parents = NULL, k = log(nrow(data))) {
  factor_parents <- get_factor(data, parents)
  if (length(factor_parents) > 0) {
    numeric_parents <- parents[!(parents %in% factor_parents)]
    logliks <- group_factors(data, factor_parents) %>% # combine factors
      dplyr::group_split(.data$Factor) %>%
      purrr::map(function(chunk) {
        ll <- logLik_gaussian(fm = create_formula(node, numeric_parents),
                             data = chunk)
        ll$factor <- unique(chunk$Factor)
        return(ll)
      })
  } else {
    logliks <- list(logLik_gaussian(fm = create_formula(node, parents),
                                   data = data))
  }
}

```

```

    BIC(logliks = logliks, k = k)
  }

tweedie_score <-
function(data, node, parents = NULL, k = log(nrow(data))) {
  factor_parents <- get_factor(data, parents)
  if (length(factor_parents) > 0) {
    numeric_parents <- parents[!(parents %in% factor_parents)]
    logliks <- group_factors(data, factor_parents) %>% # combine factors
      dplyr::group_split(.data$Factor) %>%
      purrr::map(function(chunk) {
        ll <- logLik_tweedie(fm = create_formula(node, numeric_parents),
                           data = chunk)
        ll$factor <- unique(chunk$Factor)
        return(ll)
      })
  } else {
    logliks <- list(logLik_tweedie(fm = create_formula(node, parents),
                                  data = data))
  }

  BIC(logliks = logliks, k = k)
}

```

Calcul de vraisemblance

```

###--- For a factor

#' @param node character: node name
#' @param data data frame containing the variables in the model
#'
#' @return BIC score
logLik_multinom <-
function(node, data) {
  table_values <- table(data[[node]])
  ll <- lapply(data[[node]], '==', names(table_values)) %>%
    sapply(stats::dmultinom, size = 1,
           prob = prop.table(table_values), log = TRUE) %>%
    sum()
}

```

```

    structure(list(ll = ll,
                  df = length(table_values)- 1),
              freq = prop.table(table_values),
              class = c("logLik.multinom", "list"))
}

###--- For a Tweedie indicator

#' @param fm model formula
#' @param data data to use for computing the model
#' @param link.power link for fitting the GLM, 0 means 'log'.
#'       For other values see \link[statmod]{tweedie}
#' @param optimizer a character string that determines which optimization
#'       routine is to be used in estimating the index and the
#'       dispersion parameters.
#'       Possible choices are "nlminb" (the default, see nlminb),
#'       "bobyqa" (bobyqa) and "L-BFGS-B" (optim).
#'       See \link[cplm]{cpglm}.
#' @param ... other parameters passed to \link[cplm]{cpglm}
#'
#' @return The log-likelihood of the GLM with Tweedie family
#'         in a structure with paramaters
logLik_tweedie <-
  function(fm, data, link.power = 0, optimizer = "nlminb", ...) {

    cpglm_obj <- cplm::cpglm(stats::formula(fm),
                            data = data,
                            link = link.power,
                            optimizer = optimizer)

    # compute the density with the optimal parameters and the model coefficients
    dens <- tweedie::dtweedie(y = cpglm_obj$y,
                              mu = cpglm_obj$fitted.values,
                              xi = cpglm_obj$p,
                              phi = cpglm_obj$phi)

    # tprof$glm.obj$rank is the number of estimated parameters in the model
    # we add 2 to this value since the dispersion was estimated for computing
    # the log-likelihood and the parameter p was optimized
    structure(list(ll = sum(log(dens)),
                  df = length(cpglm_obj$coefficients) + 2,

```

```

        p = cpglm_obj$p,
        phi = cpglm_obj$phi),
cpglm = cpglm_obj,
class = c("logLik.tweedie", "list"))
}

###--- For a Gaussian indicator

#' @param fm model formula
#' @param data data to use for computing the model
#'
#' @return An object list of class 'logLik.gaussian'
logLik_gaussian <-
function(fm, data) {
  glm_object <- stats::glm(fm, data = data,
                           family = stats::gaussian(link = "identity"))

  # compute the density with the optimal parameters and the model coefficients
  # This metho uses the pearson estimate for the SD. This method
  # was found to be consistent with the stats::logLik function
  sd <- sqrt(stats::deviance(glm_object) / stats::nobs(glm_object))
  likelihood <- stats::dnorm(x = glm_object$y,
                             mean = glm_object$fitted.values,
                             sd = sd)

  # df is set to glm_object$rank + 1 since we estimate the dispersion
  structure(list(ll = sum(log(likelihood)),
                df = glm_object$rank + 1,
                mean = mean(glm_object$fitted.values),
                sd = sd),
            model = glm_object,
            class = c("logLik.gaussian", "list"))
}

```

Fonctions implémentées pour factoriser certaines instructions

```

###--- Manipulating formula

#' @param y response variable

```

```

#' @param x predictor
#'
#' @return object 'formula'
create_formula <-
  function(y, x) {
    if(length(x) == 0) {
      paste0(y, "~1")
    } else {
      paste0(y, "~", paste(x, collapse = "+"))
    }
  }

###--- Structure print methods

#' @param logliks list of log-likelihood structures
#' @param k penalty
#'
#' @return A 'node.score' structure
BIC <- function(logliks, k) {
  bic <- purrr::map(logliks, function(elt) {
    -2*elt$l1 + k*elt$df
  }) %>%
  purrr::reduce('+')

  # return the result as a structure
  structure(bic,
            k = k,
            df = purrr::map_dbl(logliks, '[["df"]) %>% sum()',
            logLik = logliks,
            class = "node.score")
}

###--- Extract factor

#' @param .data data.frame like object
#' @param vars vector of column names to check
#'
#' @return Names of the factors
get_factor <-
  function(.data, vars = names(.data)) {
    dplyr::select(.data, dplyr::all_of(vars)) %>%

```

```

    purrr::map_lgl(is.numeric) %>%
    tibble::enframe() %>%
    dplyr::filter(!.data$value) %>%
    dplyr::pull(.data$name)
  }

### -- Grouping levels

#' @param .data data.frame like
#' @param factors vector of factors
#'
#' @return The data with a new column named "Factor"
group_factors <-
  function(.data, factors) {
    dplyr::group_by(.data, dplyr::across(dplyr::all_of(factors))) %>%
      dplyr::mutate(Factor = dplyr::cur_group()) %>%
      dplyr::mutate(Factor = tidyr::unite(.data$Factor, col = "_")) %>%
      dplyr::mutate(Factor = tibble::deframe(.data$Factor)) %>%
      dplyr::ungroup()
  }

```

A.3 Formulaire de consentement éclairé

Page 1/2

Formulaire de consentement

Etude sur la perception de collision d'un passager à bord d'un véhicule autonome

Responsable : M. Jeffery Petit, doctorant

Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes (LS2N)
UMR CNRS 6004 - Campus de l'École Centrale de Nantes
1, rue de la Noë - B.P. 92101
44321 Nantes Cedex 03

Avant d'accepter de participer à ce projet de recherche, veuillez prendre le temps de lire et de comprendre les renseignements qui suivent ; n'hésitez pas à poser toutes les questions que vous jugerez utiles.

Toute demande d'information complémentaire pourra être adressée ultérieurement aux coordonnées suivantes :

Chercheur en charge de l'expérimentation

- **M. Jeffery Petit**
- Doctorant à l'école Centrale Nantes
- jeffery.petit@ls2n.fr
- +33(0)761306342
- LS2N, Ecole centrale Nantes, 1 rue de la Noë – 44321 Nantes // bâtiment S – bureau 208

Chercheur titulaire responsable scientifique du projet

- **M. Franck Mars**
- Directeur de Recherche au CNRS
- Franck.mars@ls2n.fr
- +33(0)2 40 37 69 17
- LS2N, Ecole centrale Nantes, 1 rue de la Noë – 44321 Nantes

Ce que l'on attend de vous :

Actuellement, de nombreux constructeurs (Waymo, Daimler, Audi, Renault, PSA, etc) sont engagés dans le développement de véhicules autonomes. Toutefois, l'adoption de tels véhicules ne pourra se faire que si les utilisateurs sont en confiance avec le véhicule et son système de navigation. Cette confiance sera d'autant plus critique lorsque le véhicule devra naviguer parmi des usagers vulnérables. Ce projet a pour objectif d'étudier le ressenti d'un passager à bord d'un véhicule autonome circulant entre des piétons. L'enjeu est de déterminer les facteurs qui influencent la perception de risque du passager afin d'être capable de les maîtriser et ainsi de contribuer au développement de systèmes de navigation en adéquation avec le confort des utilisateurs.

Cette expérience vise en particulier à étudier la perception du risque de collision. Votre tâche consistera donc à évaluer votre perception du risque à l'aide d'un dispositif analogique au cours d'un déplacement dans un véhicule autonome (simulateur de conduite).

Cette expérience requiert l'installation de deux capteurs sur la surface de l'une de vos mains afin de recueillir une mesure de conductance cutanée (activité électrodermale). En début d'étude, vous remplirez un formulaire d'informations générales sur votre profil et votre expérience de conduite. Pendant un peu moins de 20 min, vous assisterez à plusieurs scénarios d'interaction entre un véhicule autonome et des piétons. Vous devrez évaluer votre perception du risque de collision à l'aide d'un dispositif analogique auquel vous aurez été préalablement initié.e. Aucune action sur les commandes ne vous sera demandée, le véhicule avancera de manière totalement autonome.

Vos droits de vous retirer de la recherche à tout moment :

Votre contribution à cette recherche est volontaire. Vous pourrez à tout moment interrompre les scénarios et mettre fin à l'expérimentation. Votre décision de participer, de refuser, ou de cesser votre participation n'aura aucun effet sur vos notes, votre statut ou vos relations futures avec le LS2N, Centrale Nantes et l'Université de Nantes.

UN EXEMPLAIRE DE CE DOCUMENT VOUS EST REMIS, UN AUTRE EXEMPLAIRE SERA CONSERVE

Vos droits à la confidentialité, à la sécurité des données et au respect de la vie privée :

Les données obtenues seront traitées avec la confidentialité la plus entière ; nous masquerons votre identité à l'aide d'un code alphanumérique et aucun autre renseignement ne pourra révéler votre identité. Toutes les données seront gardées dans un endroit sécurisé et seuls le responsable scientifique et les chercheurs adjoints y auront accès. Conformément aux dispositions de la loi Informatique et Libertés, vous pourrez exercer vos droits d'accès et de rectification ou suppression auprès du responsable scientifique du projet. Conformément au RGPD repris dans la Loi n°2018-493 relative à la Protection des données personnelles : droit d'accès, de rectification, d'opposition et de limitation des données et la possibilité d'introduire une réclamation auprès de la CNIL (art.13 2d du RGPD).

Bénéfices de l'études :

Les avantages attendus de cette recherche sont d'obtenir :

- Une meilleure compréhension des facteurs qui influencent la perception du risque par un passager de véhicule autonome circulant parmi des piétons.
- Une meilleure compréhension de la relation entre différents systèmes cognitifs et physiologiques impliqué dans la perception du risque.

Critère d'arrêt de l'expérimentation :

Certaines personnes présentent des symptômes nauséux similaires à ceux du mal des transports en simulateur de conduite. Avec ce simulateur à base fixe (sans restitution de mouvement) proposant une immersion visuelle relativement réduite, la fréquence et la vitesse d'occurrence de ces symptômes est très faible. Si cela devait vous arriver, informez-en l'expérimentateur et demandez à ce que l'expérience soit interrompue avant que les troubles ne deviennent réellement désagréables.

Diffusion :

Les résultats et conclusions de cette recherche seront diffusés dans des colloques au sein du laboratoire ou lors d'évènements nationaux ou internationaux. Ils seront aussi publiés dans des actes de colloque et des articles de revues académiques.

Vos droits à poser des questions à tout moment :

Vous pourrez poser des questions au sujet de la recherche à chaque moment de pause dans l'expérience. Il vous sera en revanche demandé de ne pas parler en cours de scénario afin de ne pas altérer le recueil de mesures, sauf pour signifier votre volonté d'interrompre l'essai. Vous pourrez également communiquer avec le responsable scientifique du projet par courrier électronique ou téléphone (coordonnées mises à disposition en début de formulaire).

Date de l'expérimentation : (JJ) ____/(MM)____/(AA)___

J'ai lu et compris les renseignements ci-dessus et j'accepte de plein gré de participer à cette recherche.

Date de naissance du·de la participant·e :(JJ) ____/(MM)____/(AA)_____

NOM, Prénom et signature du·de la participant·e :

Nom de l'expérience :

NOM, Prénom et signature de l'expérimentateur :

UN EXEMPLAIRE DE CE DOCUMENT VOUS EST REMIS, UN AUTRE EXEMPLAIRE SERA CONSERVE

A.4 Fiche d'information soumise aux participants

Fiche d'informations

Informations générales

Nom :

Prénom :

Age :

Genre :

Coordonnées : @

.....

Expérience de conduite

Année d'obtention du permis de conduire :

Nombre de kilomètres annuels (en moyenne) :

Combien de fois conduisez-vous par semaine (en moyenne) :

Remarques éventuelles :

.....

.....

Cadre réservé à l'expérimentateur

Date :

Identifiant du participant :

LISTE DES ACRONYMES

- ADAS** *advanced driver-assistance systems*. 21–24, 26
- AED** *activité électrodermale*. 11, 45, 46, 83–86, 111, 113, 115, 129, 137, 143, 156, 157, 160, 163
- ARX** *auto-regressive with external input*. 91, 98, 102, 104, 105, 107, 159, 160, 168, 169, 173
- BIC** *Bayesian information criterion*. 118–121, 123, 145, 147, 149, 151, 169
- CDA** *continuous decomposition analysis*. 85, 86
- DAG** *directed acyclic graph*. 115, 118, 121, 125, 145
- eHMI** *external human-machine interface*. 29, 135
- FoST** *field of safe travel*. 10, 58–60, 63, 91, 130, 136
- HIANIC** *Human Inspired Navigation in Crowd*. 26, 28, 73, 74
- iHMI** *internal human-machine interface*. 29, 135
- iSA** *integrated subjective assessment*. 87, 94, 100, 113–118, 120, 121, 123–125, 142, 143, 145, 146, 148, 149, 151, 154
- mSA** *maximum of subjective assessment*. 87, 94, 100, 113–118, 120, 121, 123–125, 142, 143, 145, 146, 148, 149, 151–154
- mSCR** *maximum of skin conductance responses*. 86, 113–115, 117, 118, 121, 123, 125, 142, 143, 145, 147, 149, 151, 154
- nSCR** *number of skin conductance responses*. 86, 113–115, 117, 118, 121, 123, 125, 142, 143, 145, 146, 149, 151, 154
- RI** *réponse impulsionnelle*. 97, 99, 104–106, 168

-
- SA** *subjective assessment*. 87, 142, 143, 145
- SCR** *skin conductance response*. 46, 82, 85, 86, 111–115, 117, 119–121, 123, 125, 129, 130, 133, 137, 142, 143, 145–149, 151, 155–157, 159, 160, 162–165, 170
- SNA** système nerveux autonome. 10, 43, 44, 46, 156, 162, 165
- SNS** système nerveux sympathique. 111, 130, 164
- TTC** *time-to-collision*. 13, 50, 52, 53, 55, 77, 90–95, 99–102, 111, 112, 115–118, 120, 121, 123–125, 129, 130, 136, 159, 164, 168
- TTI** *time-to-interaction*. 53, 54, 77, 136, 156
- VA** véhicule autonome. 15–18, 21, 22, 24–26, 28, 29, 31, 39, 45, 47, 54, 55, 63, 66, 69–74, 76, 77, 81, 82, 85, 87, 90, 91, 96, 99, 104, 106, 107, 110–112, 114, 125, 129, 130, 133–137, 144, 149–157, 159, 160, 162–173

BIBLIOGRAPHIE

- Antin, J. F., Lee, S., Perez, M. A., Dingus, T. A., Hankey, J. M., & Brach, A. (2019, novembre). Second strategic highway research program naturalistic driving study methods. *Safety Science*, *119*, 2–10. doi: 10.1016/j.ssci.2019.01.016
- Basu, C., Yang, Q., Hungerman, D., Singhal, M., & Dragan, A. D. (2017). Do You Want Your Autonomous Car To Drive Like You? In *Proceedings of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction* (pp. 417–425). New York, NY, USA : ACM. doi: 10.1145/2909824.3020250
- Beggiato, M., Hartwich, F., & Krems, J. (2018). Using Smartbands, Pupillometry and Body Motion to Detect Discomfort in Automated Driving. *Frontiers in Human Neuroscience*, *12*.
- Beggiato, M., Hartwich, F., & Krems, J. (2019, octobre). Physiological correlates of discomfort in automated driving. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, *66*, 445–458. doi: 10.1016/j.trf.2019.09.018
- Bellem, H., Schönenberg, T., Krems, J. F., & Schrauf, M. (2016, août). Objective metrics of comfort : Developing a driving style for highly automated vehicles. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, *41*, 45–54. doi: 10.1016/j.trf.2016.05.005
- Bellem, H., Thiel, B., Schrauf, M., & Krems, J. F. (2018, mai). Comfort in automated driving : An analysis of preferences for different automated driving styles and their dependence on personality traits. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, *55*, 90–100. doi: 10.1016/j.trf.2018.02.036
- Benedek, M., & Kaernbach, C. (2010). Decomposition of skin conductance data by means of nonnegative deconvolution. *Psychophysiology*, *47*(4), 647–658. doi: 10.1111/j.1469-8986.2009.00972.x
- Bengler, K., Rettenmaier, M., Fritz, N., & Feierle, A. (2020, février). From HMI to HMIs : Towards an HMI Framework for Automated Driving. *Information*, *11*(2), 61. doi: 10.3390/info11020061
- Bilius, L.-B., Vatavu, R.-D., & Marquardt, N. (2021). Smart Vehicle Proxemics : A

-
- Conceptual Framework Operationalizing Proxemics in the Context of Outside-the-Vehicle Interactions. In C. Ardito et al. (Eds.), *Human-Computer Interaction – INTERACT 2021* (Vol. 12933, pp. 150–171). Cham : Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-85616-8_11
- Binder, D. A. (1978, avril). Bayesian cluster analysis. *Biometrika*, 65(1), 31–38. doi: 10.1093/biomet/65.1.31
- Boer, E. R. (2006). Driving on the tail of catastrophe ; Towards an understanding of the risk managing interaction between driver, vehicle, automation, traffic, and infrastructure. In *SICE-ICASE, 2006. International Joint Conference* (pp. 33–40). IEEE.
- Boffa Miskell. (2012, août). *Roading Excellence Awards 2012 | News and Insights | Boffa Miskell*. <https://www.boffamiskell.co.nz/news-and-insights/article.php?v=roading-excellence-awards-2012>.
- Bootsma, R. J., & Craig, C. M. (2003, mai). Information Used in Detecting Upcoming Collision. *Perception*, 32(5), 525–544. doi: 10.1068/p3433
- Boucsein, W. (2012). *Electrodermal Activity*. Springer Science & Business Media.
- Braithwaite, J. J., Watson, D. G., Jones, R., & Rowe, M. (2013). A guide for analysing electrodermal activity (EDA) & skin conductance responses (SCRs) for psychological experiments. *Psychophysiology*, 49(1), 1017–1034.
- Breckler, S. J. (1984). Empirical validation of affect, behavior, and cognition as distinct components of attitude. *Journal of Personality and Social Psychology*, 47(6), 1191–1205. doi: 10.1037/0022-3514.47.6.1191
- Breyer, F., Blaschke, C., Farber, B., Freyer, J., & Limbacher, R. (2010). Negative Behavioral Adaptation to Lane-Keeping Assistance Systems. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2(2), 21–32. doi: 10.1109/MITS.2010.938533
- Camara, F., & Fox, C. (2021, décembre). Space Invaders : Pedestrian Proxemic Utility Functions and Trust Zones for Autonomous Vehicle Interactions. *International Journal of Social Robotics*, 13(8), 1929–1949. doi: 10.1007/s12369-020-00717-x
- Car Postal. (s. d.). *Projet «SmartShuttle»*. <https://www.postauto.ch/fr/projet-smartshuttle>.
- Caruelle, D., Gustafsson, A., Shams, P., & Lervik-Olsen, L. (2019, novembre). The

-
- use of electrodermal activity (EDA) measurement to understand consumer emotions – A literature review and a call for action. *Journal of Business Research*, 104, 146–160. doi: 10.1016/j.jbusres.2019.06.041
- Cerema. (2020, mars). *Les expérimentations de véhicules autonomes* (Rapport technique N° C17TV0004).
- Charron, C. (2016). *La place des enjeux dans l'adaptation et le développement. Ce que nous apprennent les prises de risque choisies dans la mobilité piétonne, à ski ou en voiture* (Synthèse Des Travaux En Vue de l'obtention d'une Habilitation à Diriger Des Recherches En Psychologie). Ecole Doctorale Sciences Humaines et Sociales.
- Chen, R., Sherony, R., & Gabler, H. C. (2016, avril). *Comparison of Time to Collision and Enhanced Time to Collision at Brake Application during Normal Driving* (SAE Technical Paper N° 2016-01-1448). Warrendale, PA : SAE International. doi: 10.4271/2016-01-1448
- Choi, B., Jebelli, H., & Lee, S. (2019, juin). Feasibility analysis of electrodermal activity (EDA) acquired from wearable sensors to assess construction workers' perceived risk. *Safety Science*, 115, 110–120. doi: 10.1016/j.ssci.2019.01.022
- Cutting, J. E., Vishton, P. M., & Braren, P. A. (1995). How We Avoid Collisions With Stationary and Moving Obstacles. , 26.
- Damerow, F., & Eggert, J. (2015, septembre). Risk-Aversive Behavior Planning under Multiple Situations with Uncertainty. In *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems* (pp. 656–663). doi: 10.1109/ITSC.2015.113
- Daviaux, Y., Bonhomme, E., Ivers, H., de Sevin, É., Micoulaud-Franchi, J.-A., Bioulac, S., ... Altena, E. (2020, février). Event-Related Electrodermal Response to Stress : Results From a Realistic Driving Simulator Scenario. *Human Factors*, 62(1), 138–151. doi: 10.1177/0018720819842779
- Defense 92. (2019, juin). *L'expérimentation des navettes autonomes prend fin sur un bilan mitigé*.
- Denis, J.-B., & Scutari, M. (2015). *Réseaux bayésiens avec R*. EDP Sciences. doi: 10.1051/978-2-7598-1742-9
- Dillen, N., Ilievski, M., Law, E., Nacke, L. E., Czarnecki, K., & Schneider, O. (2020,

-
- avril). Keep Calm and Ride Along : Passenger Comfort and Anxiety as Physiological Responses to Autonomous Driving Styles. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1–13). New York, NY, USA : Association for Computing Machinery.
- Dingus, T. A., Guo, F., Lee, S., Antin, J. F., Perez, M., Buchanan-King, M., & Hankey, J. (2016, mars). Driver crash risk factors and prevalence evaluation using naturalistic driving data. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113*(10), 2636–2641. doi: 10.1073/pnas.1513271113
- Distefano, N., Leonardi, S., Pulvirenti, G., Romano, R., Merat, N., Boer, E., & Woolridge, E. (2020, mai). Physiological and driving behaviour changes associated to different road intersections. *European Transport*, *77*.
- Droulers, O., Lajante, M., & Lacoste-Badie, S. (2013, novembre). Apport de la démarche neuroscientifique à la mesure des émotions : Importation d'une nouvelle méthode de mesure de l'activité électrodermale. *Décisions Marketing*. doi: 10.7193/dm.072.87.101
- Dunn, P. K. (2017). *Tweedie : Evaluation of tweedie exponential family models* [Manual].
- Dunn, P. K., & Smyth, G. K. (2005, octobre). Series evaluation of Tweedie exponential dispersion model densities. *Statistics and Computing*, *15*(4), 267–280. doi: 10.1007/s11222-005-4070-y
- Dunn, P. K., & Smyth, G. K. (2008, mars). Evaluation of Tweedie exponential dispersion model densities by Fourier inversion. *Statistics and Computing*, *18*(1), 73–86. doi: 10.1007/s11222-007-9039-6
- Dunn, P. K., & Smyth, G. K. (2018). *Generalized Linear Models With Examples in R*. New York, NY : Springer New York. doi: 10.1007/978-1-4419-0118-7
- ERTRAC. (2019, mars). *Connected Automated Driving Roadmap* (Rapport technique N° 8).
- European Road Transport Research Advisory Council. (2015, juillet). *Automated Driving Roadmap* (Rapport technique).
- European Transport Safety Council. (2016, avril). *Prioritising the Safety Potential of Automated Driving in Europe | ETSC* (Rapport technique).
- Evans, J. S. B. T. (2008, janvier). Dual-Processing Accounts of Reasoning, Judgment, and Social Cognition. *Annual Review of Psychology*, *59*(1), 255–278.

-
- doi: 10.1146/annurev.psych.59.103006.093629
- Evans, J. S. B. T., & Stanovich, K. E. (2013, mai). Dual-Process Theories of Higher Cognition : Advancing the Debate. *Perspectives on Psychological Science*, 8(3), 223–241. doi: 10.1177/1745691612460685
- Faas, S. M., Mathis, L.-A., & Baumann, M. (2020, janvier). External HMI for self-driving vehicles : Which information shall be displayed? *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 68, 171–186. doi: 10.1016/j.trf.2019.12.009
- Faas, S. M., Stange, V., & Baumann, M. (2021, août). Self-Driving Vehicles and Pedestrian Interaction : Does an External Human-Machine Interface Mitigate the Threat of a Tinted Windshield or a Distracted Driver? *International Journal of Human-Computer Interaction*, 37(14), 1364–1374. doi: 10.1080/10447318.2021.1886483
- Fagnant, D. J., & Kockelman, K. (2015, juillet). Preparing a nation for autonomous vehicles : Opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 77, 167–181. doi: 10.1016/j.tra.2015.04.003
- Février, F., Gauducheau, N., Jamet, É., Rouxel, G., & Salembier, P. (2011, juin). La prise en compte des affects dans le domaine des interactions homme-machine : quels modèles, quelles méthodes, quels bénéfices? *Le travail humain*, Vol. 74(2), 183–201.
- Findlay, F. (2017, septembre). *How to get Great Electrodermal Activity (EDA) Data.Analysis Essentials* [Webinar].
- Franzén, J. (2008). Bayesian Cluster Analysis. , 161.
- Gandrez, C., Mantelet, F., Aoussat, A., Jeremie, F., & Landel, E. (2020, mai). Assessing the driver's risk perception during autonomous driving. *Proceedings of the Design Society : DESIGN Conference*, 1, 1435–1444. doi: 10.1017/dsd.2020.276
- Gibson, J. J., & Crooks, L. E. (1938, juillet). A Theoretical Field-Analysis of Automobile-Driving. *The American Journal of Psychology*, 51(3), 453. doi: 10.2307/1416145
- Great Britain, & Department of Transport. (2011). *Shared space*. Norwich : TSO.
- Groupe Renault. (2017). *Véhicule autonome et conduite autonome - Renault*

-
- Group. <https://www.renaultgroup.com/innovation/vehicule-autonome/>.
- Ha, T., Kim, S., Seo, D., & Lee, S. (2020, août). Effects of explanation types and perceived risk on trust in autonomous vehicles. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, *73*, 271–280. doi: 10.1016/j.trf.2020.06.021
- Hall, E. T. (1966). *The hidden dimension* (Vol. 609). Garden City, NY : Doubleday.
- Hamilton-Baillie, B. (2008, juin). Towards shared space. *URBAN DESIGN International*, *13*(2), 130–138. doi: 10.1057/udi.2008.13
- Hankin, R. (2006, juin). Additive Integer Partitions in R. *Journal of Statistical Software*, *16*. doi: 10.18637/jss.v016.c01
- Hankin, R. K. S., & West, L. G. (2007). Set Partitions in R. *Journal of Statistical Software*, *23*(Code Snippet 2). doi: 10.18637/jss.v023.c02
- Harper, C. D., Hendrickson, C. T., Mangones, S., & Samaras, C. (2016, novembre). Estimating potential increases in travel with autonomous vehicles for the non-driving, elderly and people with travel-restrictive medical conditions. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, *72*, 1–9. doi: 10.1016/j.trc.2016.09.003
- Hartwich, F., Beggiano, M., & Krems, J. F. (2018, août). Driving comfort, enjoyment and acceptance of automated driving – effects of drivers’ age and driving style familiarity. *Ergonomics*, *61*(8), 1017–1032. doi: 10.1080/00140139.2018.1441448
- He, X., Stapel, J., Wang, M., & Happee, R. (2022, avril). Modelling perceived risk and trust in driving automation reacting to merging and braking vehicles. *Transportation Research Part F Traffic Psychology and Behaviour*, *86*, 178–195. doi: 10.1016/j.trf.2022.02.016
- Healey, J., & Picard, R. (2005, juin). Detecting stress during real-world driving tasks using physiological sensors. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *6*(2), 156–166. doi: 10.1109/TITS.2005.848368
- Herrero-Fernández, D., Parada-Fernández, P., Oliva-Macías, M., & Jorge, R. (2020, octobre). The influence of emotional state on risk perception in pedestrians : A psychophysiological approach. *Safety Science*, *130*, 104857. doi: 10.1016/j.ssci.2020.104857
- Hoedemaeker, M., & Brookhuis, K. (1998, décembre). Behavioural adaptation

-
- to driving with an adaptive cruise control (ACC). *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 1(2), 95–106. doi: 10.1016/S1369-8478(98)00008-4
- Hoff, K. A., & Bashir, M. (2015, mai). Trust in Automation : Integrating Empirical Evidence on Factors That Influence Trust. *Human Factors*, 57(3), 407–434. doi: 10.1177/0018720814547570
- Hollande, F., Valls, M., Royal, S., & Cazeneuve, B. (2016, août). *Ordonnance n° 2016-1057 du 3 août 2016 relative à l'expérimentation de véhicules à délégation de conduite sur les voies publiques* (N° 2016-1057).
- Hruschka, C. M., Töpfer, D., & Zug, S. (2019, février). Risk Assessment for Integral Safety in Automated Driving. In *2019 2nd International Conference on Intelligent Autonomous Systems (ICoIAS)* (pp. 102–109). doi: 10.1109/ICoIAS.2019.00025
- J. B. Manchon. (2021, décembre). Construction et évolution de la confiance pendant la conduite automatisée. , 262.
- Jayaraman, S. K., Creech, C., Tilbury, D. M., Yang, X. J., Pradhan, A. K., Tsui, K. M., & Robert, L. P. (2019). Pedestrian Trust in Automated Vehicles : Role of Traffic Signal and AV Driving Behavior. *Frontiers in Robotics and AI*, 6, 117. doi: 10.3389/frobt.2019.00117
- Johnson, C. (2015, septembre). *Shared Space Aims to Create Safer, More Polite Roads*.
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect theory : An analysis of decisions under risk. *Econometrica*, 47, 278.
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1999). La peur et le goût du risque. *Pour la science. Les mathématiques sociales. Hors série Juillet*, 74–80.
- Kalantari, A. H., Markkula, G., Uzundu, C., Lv, W., Pedro, J., Madigan, R., . . . Merat, N. (2021). *Vehicle-Pedestrian Interactions at Uncontrolled Locations : Leveraging Distributed Simulation to Support Game-Theoretic Modeling*. doi: 10.13140/RG.2.2.15469.72165
- Kalantari, A. H., Markkula, G., Uzundu, C., Lv, W., Pedro, J., Madigan, R., . . . Merat, N. (2022). *Vehicle-Pedestrian Interactions at Uncontrolled Locations : Leveraging Distributed Simulation to Support Game-Theoretic Modeling*.
- Kaparias, I., Bell, M. G. H., Chan, C., Biagioli, T., & Kennedy, J. (2011). Investigating

-
- the Willingness of Drivers to Share Space with Pedestrians. , 14.
- Kaparias, I., Bell, M. G. H., Miri, A., Chan, C., & Mount, B. (2012, mai). Analysing the perceptions of pedestrians and drivers to shared space. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 15(3), 297–310. doi: 10.1016/j.trf.2012.02.001
- Kapteijn, N., Theeuwes, J., & van der horst, R. (1996, novembre). Driving Simulator Validity : Some Considerations. *Transportation Research Record*, 1550, 30–36. doi: 10.3141/1550-05
- Kolekar, S., de Winter, J., & Abbink, D. (2020a, septembre). Human-like driving behaviour emerges from a risk-based driver model. *Nature Communications*, 11(1), 1–13. doi: 10.1038/s41467-020-18353-4
- Kolekar, S., de Winter, J., & Abbink, D. (2020b, novembre). Which parts of the road guide obstacle avoidance? Quantifying the driver's risk field. *Applied Ergonomics*, 89, 103196. doi: 10.1016/j.apergo.2020.103196
- Kolekar, S., Petermeijer, S., Boer, E., de Winter, J., & Abbink, D. (2021, novembre). A risk field-based metric correlates with driver's perceived risk in manual and automated driving : A test-track study. *Tissue Engineering Part C Methods*, 133, 103428. doi: 10.1016/j.trc.2021.103428
- Kondoh, T., Yamamura, T., Kitazaki, S., Kuge, N., & Boer, E. R. (2008). Identification of Visual Cues and Quantification of Drivers' Perception of Proximity Risk to the Lead Vehicle in Car-Following Situations. *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, 1(2), 170–180. doi: 10.1299/jmtl.1.170
- Kopelias, P., Demiridi, E., Vogiatzis, K., Skabardonis, A., & Zafiropoulou, V. (2020, avril). Connected & autonomous vehicles – Environmental impacts – A review. *Science of The Total Environment*, 712, 135237. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135237
- Kouabénan, D. R., Cadet, B., Hermand, D., & Muñoz Sastre, M. T. (2007). Chapitre 2. Percevoir et évaluer les risques : les apports de la psychologie en matière de traitement des informations. In *Psychologie du risque* (pp. 29–42). Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur. doi: 10.3917/dbu.kouab.2007.01.0029
- Kyriakidis, M., de Winter, J. C. F., Stanton, N., Bellet, T., van Arem, B., Brookhuis, K., ... Happee, R. (2019, mai). A human factors perspective on automated

-
- driving. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 20(3), 223–249. doi: 10.1080/1463922X.2017.1293187
- Lazarus, R. S., & Folkman, S. (1984). *Stress, appraisal, and coping* (11. [print.] éd.). New York : Springer.
- Lee, D. N. (1976, décembre). A Theory of Visual Control of Braking Based on Information about Time-to-Collision. *Perception*, 5(4), 437–459. doi: 10.1068/p050437
- Les navettes sans conducteur ont débuté leur service à La Défense.* (2017, juin).
- Ljung, L. (1987). *System Identification : Theory for the User*. Pearson Education Canada.
- Lodinger, N. R., & DeLucia, P. R. (2019, juillet). Does automated driving affect time-to-collision judgments? *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 64, 25–37. doi: 10.1016/j.trf.2019.04.025
- Loewenstein, G. F., Weber, E. U., Hsee, C. K., & Welch, N. (2001). Risk as feelings. *Psychological Bulletin*, 127(2), 267–286. doi: 10.1037/0033-2909.127.2.267
- Lokshina, I., Kniezova, J., & Lanting, C. (2022). On Building Users' Initial Trust in Autonomous Vehicles. *Procedia Computer Science*, 198, 7–14. doi: 10.1016/j.procs.2021.12.205
- Lu, G., Cheng, B., Lin, Q., & Wang, Y. (2012, novembre). Quantitative indicator of homeostatic risk perception in car following. *Safety Science*, 50(9), 1898–1905. doi: 10.1016/j.ssci.2012.05.007
- Mandeep Singh, & Abdullah Bin Queyam. (2013, décembre). Stress Detection in Automobile Drivers using Physiological Parameters : A Review. *International Journal of Electronics Engineering*, 5, 1–5.
- Martinez, F. (2010). L'individu face au risque : L'apport de Kahneman et Tversky. *Idées économiques et sociales*(3), 15–23.
- MATLAB. (2018). *Matlab*.
- Mayer, R. C., Davis, J. H., & Schoorman, F. D. (1995). An Integrative Model of Organizational Trust. *The Academy of Management Review*, 20(3), 709–734. doi: 10.2307/258792
- Mecheri, S., & Lobjois, R. (2018, août). Steering Control in a Low-Cost Driving Simulator : A Case for the Role of Virtual Vehicle Cab. *Human Factors*, 60(5), 719–734. doi: 10.1177/0018720818769253

-
- Métayer, N., & Coeugnet, S. (2021, octobre). Improving the experience in the pedestrian's interaction with an autonomous vehicle : An ergonomic comparison of external HMI. *Applied Ergonomics*, 96, 103478. doi: 10.1016/j.apergo.2021.103478
- Ministère de la transition écologique. (2021, juin). *Décret n° 2021-873 du 29 juin 2021 portant application de l'ordonnance n° 2021-443 du 14 avril 2021 relative au régime de responsabilité pénale applicable en cas de circulation d'un véhicule à délégation de conduite et à ses conditions d'utilisation - Légifrance* (N° TRAT2034544D).
- Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, en charge des relations internationales sur le climat. (2016, août). Ordonnance n° 2016-1057 du 3 août 2016 relative à l'expérimentation de véhicules à délégation de conduite sur les voies publiques.
- Moody, S., & Melia, S. (2014, novembre). Shared space : Research, policy and problems. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 167(6). doi: 10.1680/tran.12.00047
- Morange-Majoux, F. (2017). 5. Les indices psycho-physiologiques pour appréhender le comportement. *Manuels visuels de Licence*, 113–131.
- Morgenstern, O., & Von Neumann, J. (1953). *Theory of games and economic behavior*. Princeton university press.
- Näätänen, R., & Summala, H. (1974, décembre). A model for the role of motivational factors in drivers' decision-making*. *Accident Analysis & Prevention*, 6(3), 243–261. doi: 10.1016/0001-4575(74)90003-7
- Näätänen, R., & Summala, H. (1976). Road-user behaviour and traffic accidents. *Publication of : North-Holland Publishing Company*.
- Natarajan, M., Akash, K., & Misu, T. (2022, mars). Toward Adaptive Driving Styles for Automated Driving with Users' Trust and Preferences. In *Proceedings of the 2022 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction* (pp. 940–944). Sapporo, Hokkaido, Japan : IEEE Press.
- National Highway Traffic Safety Administration. (2008, juillet). *National Motor Vehicle Crash Causation Survey : Report to Congress* (Rapport technique N° DOT HS 811 059).
- NHTSA. (2013, février). *Forward Collision Warning System Confirmation Test*

-
- (Rapport technique). Washington, DC 20590 : U.S. Department of Transportation.
- Nuñez Velasco, J. P., Farah, H., van Arem, B., & Hagenzieker, M. P. (2019, octobre). Studying pedestrians' crossing behavior when interacting with automated vehicles using virtual reality. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, *66*, 1–14. doi: 10.1016/j.trf.2019.08.015
- Observatoire national interministériel de la sécurité routière. (2022, janvier). *Bilan 2021 de la sécurité routière*. <https://www.onisr.securite-routiere.gouv.fr/etat-de-l-insecurite-routiere/bilans-annuels-de-la-securite-routiere/bilan-2021-de-la-securite-routiere>.
- Ondřej, J., Pettré, J., Olivier, A.-H., & Donikian, S. (2010, juillet). A synthetic-vision based steering approach for crowd simulation. *ACM Transactions on Graphics*, *29*(4), 123 :1–123 :9. doi: 10.1145/1778765.1778860
- O'Neill, B., & Williams, A. (1998). Risk homeostasis hypothesis : A rebuttal. *Injury Prevention*, *4*(2), 92–93.
- ONU. (2020, juin). *Adoption à Genève d'une norme de l'ONU sur les systèmes de voitures autonomes*. <https://news.un.org/fr/story/2020/06/1071712>.
- Pascale, M. T., Rodwell, D., Coughlan, P., Kaye, S.-A., Demmel, S., Dehkordi, S. G., ... Glaser, S. (2021, novembre). Passengers' acceptance and perceptions of risk while riding in an automated vehicle on open, public roads. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, *83*, 274–290. doi: 10.1016/j.trf.2021.10.012
- Perello-March, J. R., Burns, C. G., Birrell, S. A., Woodman, R., & Elliott, M. T. (2022). Physiological Measures of Risk Perception in Highly Automated Driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1–12. doi: 10.1109/TITS.2022.3146793
- Petit, J., Charron, C., & Mars, F. (2019, octobre). Risk perception at the driver seat in an autonomous vehicle. In *Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter Annual Meeting*. France.
- Petit, J., Charron, C., & Mars, F. (2020). A Pilot Study on the Dynamics of Online Risk Assessment by the Passenger of a Self-driving Car Among Pedestrians. In H. Krömker (Ed.), *HCI in Mobility, Transport, and Automotive Systems. Automated Driving and In-Vehicle Experience Design* (pp. 101–113). Cham :

-
- Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-50523-3_8
- Petit, J., Charron, C., & Mars, F. (2021, novembre). Risk assessment by a passenger of an autonomous vehicle among pedestrians : Relationship between declarative and physiological measures. *Frontiers in Neuroergonomics*, 2, 682119. doi: 10.3389/fnrgo.2021.682119
- Poh, M.-Z., Swenson, N. C., & Picard, R. W. (2010, mai). A Wearable Sensor for Unobtrusive, Long-Term Assessment of Electrodermal Activity. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 57(5), 1243–1252. doi: 10.1109/TBME.2009.2038487
- Prédhumeau, M. (s. d.). Modélisation et simulation de comportements piétons réalistes en espace partagé avec un véhicule autonome. , 183.
- Quimby, A., & Castle, J. (s. d.). A Review of Simplified Streetscape Schemes. , 66.
- R Core Team. (2020). *R : A language and environment for statistical computing* [Manual]. Vienna, Austria.
- Radhakrishnan, V., Merat, N., Louw, T., Lenné, M. G., Romano, R., Paschalidis, E., ... Boer, E. R. (2020, août). Measuring Drivers' Physiological Response to Different Vehicle Controllers in Highly Automated Driving (HAD) : Opportunities for Establishing Real-Time Values of Driver Discomfort. *Information*, 11(8), 390. doi: 10.3390/info11080390
- Raftery, A. E. (1995). Bayesian Model Selection in Social Research. *Sociological Methodology*, 25, 111–163. doi: 10.2307/271063
- Raftery, A. E. (1999, février). Bayes Factors and BIC : Comment on “A Critique of the Bayesian Information Criterion for Model Selection”. *Sociological Methods & Research*, 27(3), 411–427. doi: 10.1177/0049124199027003005
- Raufaste, É., Daurat, A., Mélan, C., & Weerd, C. R.-V. D. (2004). Chapitre 8. Aspects intensifs de la cognition en situation de travail. In *Psychologie ergonomique : tendances actuelles* (pp. 175–199). Presses Universitaires de France.
- Renault présente la technologie « Eyes off/Hands off » pour le véhicule autonome de demain - Renault Group. (s. d.). <https://www.renaultgroup.com/news-onair/actualites/renault-presente-la-technologie-eyes-offhands-off-pour-le-vehicule-autonome-de-demain/>.
- Rossner, P., & Bullinger, A. C. (2019). Do You Shift or Not? Influence of Trajectory

-
- Behaviour on Perceived Safety During Automated Driving on Rural Roads. In *HCI in Mobility, Transport, and Automotive Systems* (pp. 245–254). Cham : Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-22666-4_18
- Rossner, P., & Bullinger, A. C. (2020a). How Do You Want to be Driven? Investigation of Different Highly-Automated Driving Styles on a Highway Scenario. In N. Stanton (Ed.), *Advances in Human Factors of Transportation* (pp. 36–43). Cham : Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-20503-4_4
- Rossner, P., & Bullinger, A. C. (2020b). I Care Who and Where You Are – Influence of Type, Position and Quantity of Oncoming Vehicles on Perceived Safety During Automated Driving on Rural Roads. In H. Krömker (Ed.), *HCI in Mobility, Transport, and Automotive Systems. Driving Behavior, Urban and Smart Mobility* (pp. 61–71). Cham : Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-50537-0_6
- Rota, G.-C. (1964). The Number of Partitions of a Set. *The American Mathematical Monthly*, 71(5), 498–504. doi: 10.2307/2312585
- Rudin-Brown, C. M., Jenkins, R. W., Whitehead, T., & Burns, P. C. (2009, juillet). Could ESC (Electronic Stability Control) Change the Way We Drive? *Traffic Injury Prevention*, 10(4), 340–347. doi: 10.1080/15389580903043446
- SAE International. (2020a, février). <https://www.sae.org/site/about/history>.
<https://www.sae.org/site/about/history>.
- SAE International. (2020b, février). The Principles of Operation Framework : A Comprehensive Classification Concept for Automated Driving Functions. *SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles*, 3(1), 12-03-01-0003. doi: 10.4271/12-03-01-0003
- Sanandaj, B. M., Vincent, T. L., Wakin, M. B., Toth, R., & Poola, K. (2011, décembre). Compressive System Identification of LTI and LTV ARX models. In *IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference* (pp. 791–798). Orlando, FL, USA : IEEE. doi: 10.1109/CDC.2011.6160935
- Scherer, K. R. (2005). What are emotions? And how can they be measured? *Social science information*, 44(4), 695–729.
- Scherer, K. R. (2009, novembre). The dynamic architecture of emotion : Evidence for the component process model. *Cognition and Emotion*, 23(7), 1307–1351.

-
- doi: 10.1080/02699930902928969
- Schwarz, C. (2014, novembre). On computing time-to-collision for automation scenarios. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 27, 283–294. doi: 10.1016/j.trf.2014.06.015
- Schwarz, G. (1978). Estimating the Dimension of a Model. *The Annals of Statistics*, 6(2), 461–464.
- Selye, H. (1976). *Stress in health and disease*. Boston : Butterworths.
- Sequeira, H., & D'Hondt, F. (2013). *Chapitre 6. L'activité électrodermale dans l'étude de la cognition*. Dunod.
- SHRP 2 | Strategic Highway Research Program 2 (SHRP 2). (s. d.). <https://www.trb.org/StrategicHighwayResearchProgram2SHRP2/Blank2.aspx>.
- Sitkin, S. B., & Pablo, A. L. (1992, janvier). Reconceptualizing the Determinants of Risk Behavior. *Academy of Management Review*, 17(1), 9–38. doi: 10.5465/amr.1992.4279564
- Slater, K. (1985). *Human comfort*. Springfield, Ill., USA : CC Thomas.
- Slater, K. (1986, mai). Discussion Paper the Assessment of Comfort. *The Journal of The Textile Institute*, 77(3), 157–171. doi: 10.1080/00405008608658406
- Slovic, P., Finucane, M. L., Peters, E., & 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.
- Slovic, P., Finucane, M. L., Peters, E., & MacGregor, D. G. (2007, mars). The affect heuristic. *European Journal of Operational Research*, 177(3), 1333–1352. doi: 10.1016/j.ejor.2005.04.006
- Stanovich, K. E., & Toplak, M. E. (2012, juin). Defining features versus incidental correlates of Type 1 and Type 2 processing. *Mind & Society*, 11(1), 3–13. doi: 10.1007/s11299-011-0093-6
- Stevens, S. S. (2017). *Psychophysics : Introduction to Its Perceptual, Neural and Social Prospects*. Routledge.
- Tangirala, A. K. (2017). *Principles of System Identification : Theory and Practice*. Boca Raton : CRC Press. doi: 10.1201/9781315222509
- Telpaz, A., Baltaxe, M., Hecht, R. M., Cohen-Lazry, G., Degani, A., & Kamhi, G. (2018, novembre). An Approach for Measurement of Passenger Comfort :

-
- Real-Time Classification based on In-Cabin and Exterior Data. In *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* (pp. 223–229). doi: 10.1109/ITSC.2018.8569653
- Trautman, P., & Krause, A. (2010, octobre). Unfreezing the robot : Navigation in dense, interacting crowds. In *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 797–803). doi: 10.1109/IROS.2010.5654369
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1974, septembre). Judgment under Uncertainty : Heuristics and Biases. *Science*, *185*(4157), 1124–1131. doi: 10.1126/science.185.4157.1124
- (U.S.), N. R. C. (Ed.). (2001). *Strategic highway research : Saving lives, reducing congestion, improving quality of life* (N° 260). Washington, DC : Transportation Research Board, National Research Council : National Academy Press.
- Vaa, T. (2001). Cognition and emotion in driver behaviour models : Some critical viewpoints. In *Proceedings of the 14th ICTCT Workshop* (pp. 48–59). ICTCT Vienna, Austria.
- Verberne, F. M. F., Ham, J., & Midden, C. J. H. (2012, octobre). Trust in Smart Systems : Sharing Driving Goals and Giving Information to Increase Trustworthiness and Acceptability of Smart Systems in Cars. *Human Factors*, *54*(5), 799–810. doi: 10.1177/0018720812443825
- Walker, F., Dey, D., Martens, M., Pfleging, B., Eggen, B., & Terken, J. (2019). *Feeling-of-Safety Slider : Measuring Pedestrian Willingness to Cross Roads in Field Interactions with Vehicles*. doi: 10.1145/3290607.3312880
- Wang, D., Fu, W., Song, Q., & Zhou, J. (2022, mars). Potential risk assessment for safe driving of autonomous vehicles under occluded vision. *Scientific Reports*, *12*(1), 4981. doi: 10.1038/s41598-022-08810-z
- Wang, J., Wu, J., & Li, Y. (2015, août). The Driving Safety Field Based on Driver–Vehicle–Road Interactions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *16*(4), 2203–2214. doi: 10.1109/TITS.2015.2401837
- Wang, J., Wu, J., Zheng, X., Ni, D., & Li, K. (2016, novembre). Driving safety field theory modeling and its application in pre-collision warning system. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, *72*, 306–324. doi: 10.1016/j.trc.2016.10.003

-
- Wang, S., & Zhao, J. (2019, août). Risk preference and adoption of autonomous vehicles. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, *126*, 215–229. doi: 10.1016/j.tra.2019.06.007
- Wilde, G. J. (1982). The theory of risk homeostasis : Implications for safety and health. *Risk analysis*, *2*(4), 209–225.
- Wilde, G. J. (1998). Risk homeostasis theory : An overview. *Injury prevention*, *4*(2), 89–91.
- Wynne, R. A., Beanland, V., & Salmon, P. M. (2019, août). Systematic review of driving simulator validation studies. *Safety Science*, *117*, 138–151. doi: 10.1016/j.ssci.2019.04.004
- Yates, J. F., & Stone, E. R. (1992). The risk construct. In *Risk-taking behavior* (pp. 1–25). Oxford, England : John Wiley & Sons.
- Zang, G., Azouigui, S., Saudrais, S., Peyricot, O., & Hebert, M. (2021, janvier). Quantitative study of vehicle-pedestrian interactions : Towards pedestrian-adapted lighting communication functions for autonomous vehicles. *Electronic Imaging*, *2021*(17), 172–172. doi: 10.2352/ISSN.2470-1173.2021.17.AVM-172
- Zhang, L., Xiao, W., Zhang, Z., & Meng, D. (2020). Surrounding Vehicles Motion Prediction for Risk Assessment and Motion Planning of Autonomous Vehicle in Highway Scenarios. *IEEE Access*, *8*, 209356–209376. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3039789
- Zhang, Y. (2013, novembre). Likelihood-based and Bayesian methods for Tweedie compound Poisson linear mixed models. *Statistics and Computing*, *23*(6), 743–757. doi: 10.1007/s11222-012-9343-7
- Zhao, C., Jiang, S., Lei, Y., & Wang, C. (2020). A Study on an Anthropomorphic Car-Following Strategy Framework of the Autonomous Coach in Mixed Traffic Flow. *IEEE Access*, *8*, 64653–64665. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2985749

Titre : Évaluation du risque ressenti par un passager de véhicule autonome naviguant parmi des piétons

Mot clés : Perception du risque, Conduite autonome, Réactions électrodermales, Réseau bayésien

Résumé : La perception du risque est un aspect crucial qu'il est nécessaire d'étudier dans le but de favoriser l'acceptation des véhicules autonomes dans des espaces partagés avec des piétons.

Ce travail s'articule autour de trois contributions empiriques. La première contribution porte sur la possibilité de modéliser la dynamique de perception subjective du risque par le biais d'une réponse impulsionnelle. Les performances obtenues sont assez inégales et reflètent une grande variabilité interindividuelle dans la stratégie d'évaluation du risque. Les deux autres contributions mettent en évidence que la perception du risque peut se mesurer en temps réel et

dans des interactions dynamiques complexes en s'appuyant à la fois sur des mesures subjectives et des mesures de réactions électrodermales. Les résultats de ces contributions sont basés sur une modélisation par réseau bayésien permettant d'analyser simultanément les relations entre facteurs dynamiques et mesures de perception du risque.

Les conclusions de ces travaux apportent des éléments théoriques sur les liens entre les dimensions implicite et explicite du risque ressenti, ainsi que des éléments concrets permettant de prendre en compte le facteur humain dans le développement des comportements de navigation des véhicules autonomes.

Title: Risk assessment by a passenger in an autonomous vehicle navigating among pedestrians

Keywords: Risk perception, Autonomous driving, Skin conductance responses, Bayesian Network

Abstract: Risk perception is a crucial aspect that needs to be investigated in order to promote the acceptance of autonomous vehicles in shared spaces with pedestrians.

This thesis is structured around three empirical contributions. The first contribution focuses on the possibility of modelling the dynamics of subjective risk perception using an impulse response. The performance obtained is rather uneven and reflects a large inter-individual variability in the risk assessment strategy. The other two contributions demonstrate that risk perception can be measured in real time and in complex

dynamic interactions using both subjective and electrodermal response measures. The results of these contributions are based on Bayesian network modelling that allows for the simultaneous analysis of relationships between dynamic factors and risk perception measures.

The conclusions of this work provide theoretical elements on the links between the implicit and explicit dimensions of risk perception, as well as concrete elements to take into account human factors in the development of navigation behaviors of autonomous vehicles.