



HAL
open science

Identification des critères déterminant l'acceptabilité des comportements d'un véhicule autonome dans des situations potentiellement conflictuelles en milieu urbain pour adapter les algorithmes de conduite autonome.

Gabriel Nativel-Fontaine

► To cite this version:

Gabriel Nativel-Fontaine. Identification des critères déterminant l'acceptabilité des comportements d'un véhicule autonome dans des situations potentiellement conflictuelles en milieu urbain pour adapter les algorithmes de conduite autonome.. Automatique. Université de Bordeaux, 2024. Français. NNT : 2024BORD0304 . tel-04850975

HAL Id: tel-04850975

<https://theses.hal.science/tel-04850975v1>

Submitted on 20 Dec 2024

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 présentée pour obtenir le grade de

Docteur de

L'UNIVERSITE DE BORDEAUX

École doctorale Sciences Physiques et de l'Ingénieur

Spécialité Automatique, productique, signal et image, ingénierie cognitive

Identification des critères déterminant l'acceptabilité des comportements d'un véhicule autonome dans des situations potentiellement conflictuelles en milieu urbain pour adapter les algorithmes de conduite autonome

Présentée par :

Gabriel Nativel-Fontaine

Soutenue le 29 Novembre 2024

Devant le jury composé de :

M. CEGARRA, Julien Professeur des Universités – Institut National Universitaire Champollion	Rapporteur
M. LEGRAND, Pierrick Professeur des Universités – Bordeaux INP-ENSC, Talence	Président du jury
Mme. LESPINET-NAJIB, Véronique Maître de Conférences - HDR – Bordeaux INP-ENSC, Talence	Directrice
Mme. LOUP-ESCANDE, Emilie Professeure des Universités – Université de Picardie Jules Vernes	Rapporteuse
Mme. RANCHET, Maud Chargée de recherche – Université Gustave Eiffel	Examinatrice

Membres invités :

M. AÏOUN, François Ingénieur de recherche – Stellantis	Invité
M. CHEVRIE, Mathieu Maître de Conférences – Bordeaux INP-ENSEIRB-MATMECA, Talence	Co-encadrant
M. OJEDA, Luciano Ingénieur de recherche – Stellantis	Invité

“Comprendre est le commencement d’approuver.”

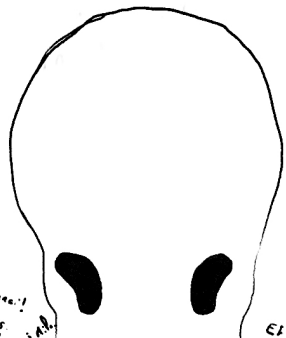
Baruch Spinoza

Remerciements

Tout d'abord, un grand merci au professeur Emile Loup-Escande, ainsi qu'au professeur Julien Cognard pour avoir accepté de co-penser mes travaux de thèse. Un immense merci à Maud Renchet d'avoir accepté d'examiner la thèse. Un merci tout particulier au professeur Pierrick Legendre pour avoir présidé le jury. Tu es l'un de mes premiers enseignants à l'université, l'airain pour président de mon jury de thèse, également beaucoup pour moi.

Je n'aurais jamais soutenu ma thèse sans ta direction. Merci aussi à tous les membres de l'équipe pédagogique pour leur accueil et leur accompagnement. Un immense merci à Hiba et à ses collègues pour leur accueil et leur accompagnement. Merci à tous les membres de l'équipe pédagogique pour leur accueil et leur accompagnement.

Merci à François Aïoun et Luciano Ojeda pour avoir accompagné mes pas chez St. Paul.



Merci à tous les membres de l'équipe pédagogique pour leur accueil et leur accompagnement.

Merci à tous les membres de l'équipe pédagogique pour leur accueil et leur accompagnement.

Merci à tous les membres de l'équipe pédagogique pour leur accueil et leur accompagnement.

Merci à tous les membres de l'équipe pédagogique pour leur accueil et leur accompagnement.

L'ENSC

A l'équipe de l'ENSC
Un immense merci pour avoir soutenu mon addiction au café. Et merci à Catherine et à l'équipe pédagogique pour avoir fait confiance dans de futurs ingénieurs de l'école.

Merci aux copains de thèse Pierre, Jean, Yous, Benjamin pour tout ces moments de bonne humeur et vos conseils. Un immense merci à Alexis, Adrien, Pierre, Lucas, un coach en on qui sera su me changer les idées quand j'en ai le plus besoin.

Merci aux amis de rencontres extraordinaires. Merci Thibault pour les "ouverts" qu'il m'a fait. Merci à tous les amis de rencontres extraordinaires. Merci Thibault pour les "ouverts" qu'il m'a fait.

Merci à Helène, quel bonheur ça a été de t'accompagner dans ta quête du second degré. Merci pour ton amitié (c'est que le début) et pour le support moral inégalable que tu es pour moi.

Merci à Florentine, la meilleure binôme de thèse dont j'ai pu bénéficier. Un immense merci pour ton soutien sans faille. Merci à toi, à Tom et à Topi pour ces merveilleux séjours au pays de la croûte.

Avant propos

Les travaux de thèse ont été menés en Convention Industrielle de Formation par la REcherche (CIFRE), dans le cadre de l'OpenLab "Electronic and Systems for Automotive", un laboratoire commun entre le groupe Stellantis et le laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS).

- Stellantis est un groupe automobile international, issu de la fusion, en 2021, des groupes Peugeot SA (PSA) et Fiat-Chrysler Automobile (FCA). Exploitant 15 marques automobiles (Peugeot, Citroën, Fiat, Alfa Romeo, etc.) et autres services. Stellantis est, à ce jour, le leader français sur le marché de l'automobile et a pour ambition d'offrir à tous une liberté de mobilité propre, sûre et abordable.
- Le laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS) (UMR CNRS 5218) est un laboratoire de recherche français, centré sur le domaine des Sciences et de l'Ingénierie des Systèmes, à la convergence des Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication, et des Sciences pour l'Ingénieur.

La spécificité de ces travaux repose sur une approche interdisciplinaire combinant Psychologie cognitive et Sciences pour l'Ingénieur. Ce projet a bénéficié de l'encadrement conjoint de spécialistes issus de ces deux domaines, aussi bien au sein du laboratoire que de l'entreprise partenaire.

Au sein du laboratoire IMS :

- Véronique Lespinet-Najib, maître de conférences à l'ENSC (Bordeaux INP) en cognitive, est experte dans le développement de méthodes d'analyse des besoins et de tests auprès de personnes en situation de handicap mental ou visuel. Elle a dirigé cette thèse.
- Mathieu Chevrié, maître de conférences à l'ENSEIRB-MATMECA (Bordeaux INP) en automatique, est spécialisé dans l'optimisation et la modélisation de systèmes dynamiques complexes, notamment appliqués au contrôle et à la performance des véhicules autonomes. Il a co-encadré la thèse.

Au sein du groupe Stellantis :

- François Aïoun, ingénieur de recherche, a apporté son expertise sur le sujet des véhicules autonomes et intelligents.

- Luciano Ojeda, ingénieur de recherche en ergonomie cognitive, a enrichi le projet par ses connaissances en facteur humain dans le contexte des véhicules autonomes.

Cette collaboration a permis de croiser les compétences et les perspectives des différents acteurs, renforçant ainsi la rigueur scientifique et la pertinence industrielle des résultats obtenus.

Productions scientifiques

Ce travail de thèse a fait l'objet d'un certain nombre de publications et de conférences :

Articles de revues scientifiques à comité de lecture

Nativel-Fontaine, G., Lespinet-Najib, V., Chevrie, M., Aïoun, F., & Ojeda, L. (2024b). *Examining the influence of wait times, traffic and a safety prompt on the acceptability of fully autonomous vehicles* (Soumis)

Nativel-Fontaine, G., & Lespinet-Najib, V. (2023). Exploration of the acceptability of different behaviors of an autonomous vehicle in so-called conflict situations. *Accident Analysis & Prevention*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2023.107041>

Conférences avec actes

Nativel-Fontaine, G., Lespinet-Najib, V., Chevrie, M., Aïoun, F., & Luciano, O. (2024a). Effect of Safety Instructions on the Acceptability of the Autonomous Vehicle in a Virtual Reality. *33rd International Congress of Psychology, Pragues, Czech Republic*

Nativel-Fontaine, G., Lespinet-Najib, V., Chevrie, M., Aïoun, F., & Luciano, O. (2023). Effet d'une Phase de Familiarisation Sur Les Mesures Subjectives Dans Une Simulation de Véhicule Autonome En Réalité Virtuelle. *12ème Colloque de Psychologie Ergonomique - EPIQUE 2023, Paris, France*, 286-290

Présentation de travaux et vulgarisation scientifique

Journée R&T Cognition

Présentation d'un démonstrateur de véhicule autonome en situation conflictuelle en réalité virtuelle.

Cité des Sciences et de l'Industrie, Paris

Ma Thèse en 180 secondes 2024

Finaliste de l'Université de Bordeaux

[Lien vers la vidéo Youtube](#)

Note au lecteur

Afin de rendre ce document accessible au plus grand nombre, un formalisme spécifique a été adopté. Bien qu'il puisse paraître inhabituel au premier abord, il répond à des exigences d'accessibilité.

Nous avons opté pour une police sans empattement (sans serif), car les empattements peuvent compliquer la reconnaissance des lettres, notamment pour les personnes dyslexiques ou ayant des troubles cognitifs (Rello & Baeza-Yates, [2016](#)).

Le texte n'est pas justifié, car la justification crée un espacement variable entre les mots, ce qui peut rendre la lecture plus difficile pour ces mêmes publics (Galliussi et al., [2020](#)).

Un interligne d'au moins 1,5 pt a été choisi, conformément aux recommandations de Bernard et al. ([2007](#)), afin de faciliter la lecture et la compréhension.

Enfin, la taille de police est d'au moins 12 pt, suivant les recommandations de de Leeuw ([2010](#)) et Rello et Baeza-Yates ([2017](#)), garantissant ainsi une lisibilité optimale. Ces choix visent à assurer que ce document soit accessible à tous, indépendamment des besoins spécifiques de lecture.

Identification des critères déterminant l'acceptabilité des comportements d'un véhicule autonome dans des situations potentiellement conflictuelles en milieu urbain pour adapter les algorithmes de conduite autonome.

Résumé : L'objectif de la thèse est de déterminer des critères qui rendront acceptable l'utilisation des véhicules autonomes en milieu urbain, dans des situations potentiellement conflictuelles. Nous étudions les véhicules autonomes de niveau 5, qui impliquent une automatisation totale des fonctions de conduite. L'acceptabilité du comportement est analysée du point de vue des passagers. L'acceptabilité des technologies suit un *continuum* : *a priori*, avant la confrontation, *in situ*, pendant la confrontation et appropriation. À ce jour, le niveau 5 est seulement à l'essai dans des conditions strictement définies, l'étude de l'acceptabilité se fait donc principalement en simulation, *a priori*, et repose notamment sur des modèles comme Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT). Nos travaux ont consisté à explorer les éléments du comportement influençant l'acceptabilité ressentie par les passagers dans des situations conflictuelles, en simulation. Cependant, certains cas demeurent problématiques, comme le fait de ne pas marquer l'arrêt à un feu rouge pour laisser passer un véhicule d'urgence. Dans ces situations, la perception des passagers joue un rôle clé dans l'acceptabilité. Nous avons donc exploré l'efficacité de la communication véhicule-passager comme contre-mesure à la perte d'acceptabilité dans des contextes spécifiques. Une première expérimentation a permis d'étudier l'influence du mode de conduite et du contexte sur l'acceptabilité du comportement du véhicule. Les modes de conduite, qui varient principalement par leur attitude envers le Code de la route, ont été testés dans des intersections urbaines. Le mode de conduite s'est avéré être le facteur le plus influent, alors que ni le type d'intersection, ni les caractéristiques sociodémographiques n'ont montré d'effet significatif. Une seconde expérimentation a étudié l'effet de certaines composantes du comportement sur l'acceptabilité des passagers, via une simulation en réalité virtuelle. Lors du trajet, les participants ont vécu des situations où le comportement du véhicule a varié, notamment en jouant sur le temps d'attente avant l'engagement. Les résultats ont mis en évidence l'importance de la communication préalable avec les passagers, l'amorce mettant l'accent sur la sécurité augmentant l'acceptabilité dans toutes les situations. Ces données nous ont permis de définir des plages de paramètres optimales en fonction de la situation. La première partie de la thèse se concentre sur l'analyse de la variation de l'acceptabilité *in situ* du comportement du véhicule autonome. Ces résultats servent ensuite à proposer des recommandations aux constructeurs, visant à améliorer l'acceptabilité, soit directement par une modification appropriée du comportement au niveau des algorithmes, soit par la communication véhicule-passager au niveau des interfaces humain-machine (IHM). Les décisions des véhicules autonomes, régies par des algorithmes, ont un impact direct sur l'acceptabilité. Ces algorithmes peuvent être ajustés en fonction de divers paramètres pour influencer positivement l'acceptabilité. Nous proposons une méthodologie de transfert technologique, depuis la recherche académique jusqu'à l'industrialisation, via des modèles mathématiques fondés sur des données expérimentales. Ceux-ci permettraient de déterminer les valeurs optimales des paramètres pour maximiser l'acceptabilité. Enfin, l'étude de la transparence et de l'explication du comportement a montré que la combinaison de modalités de communication (visuelle et auditive) améliore l'explicabilité et l'acceptabilité. En multipliant

les canaux sensoriels pour expliquer le comportement du véhicule, nous avons observé une augmentation significative de l'acceptabilité, en particulier dans les situations conflictuelles où le comportement du véhicule semble ambigu. Cela valide l'hypothèse selon laquelle l'explicabilité perçue, renforcée par des modalités sensorielles variées, joue un rôle clé dans l'acceptabilité *in situ* et que cette explicabilité améliore l'acceptabilité des passagers en situation de doute.

Mots-clés : Cognitique, Facteur humain, Modélisation, Acceptabilité, Accessibilité, Véhicule autonome.

Identification of the criteria determining the acceptability of the behaviour of an autonomous vehicle in potentially conflicting situations in an urban environment in order to adapt the autonomous driving algorithms.

Abstract: This thesis will identify the criteria that will make the use of autonomous vehicles in urban environments, particularly in potentially conflictual situations, acceptable. Our focus is on level 5 autonomous vehicles, which involve full automation of driving functions. We analyze the acceptability of vehicle behavior from the passengers' perspective. The literature describes the acceptability of technologies in three phases: *a priori* acceptability (before exposure), *in situ* acceptability (during exposure), and appropriation (after exposure). A technology is accepted when it is used in a non-professional context. As there is no level 5 vehicle currently available, the study of its acceptability is theoretical and *a priori*. It relies notably on models such as the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT). We identified the behavioral elements influencing passengers' perceived acceptability in conflictual situations using a simulated exposure to the technology. These studies allowed us to definitively propose acceptable operating ranges for vehicle behavior. However, there are still some cases where the technology is not acceptable, such as not stopping at a red light to allow an emergency vehicle to pass. Passenger perception is a crucial factor in determining acceptability in these situations. We therefore explored the effectiveness of vehicle-passenger communication as a countermeasure to the loss of acceptability in specific contexts. Our first experiment examined the influence of driving mode and context on the acceptability of vehicle behavior. We tested the driving modes, which varied in their attitude toward traffic laws, at typical urban intersections. Driving mode proved to be the most influential factor, and neither the type of intersection nor sociodemographic characteristics showed significant effects. A second experiment definitively demonstrated the impact of specific behavioral components on passengers' acceptability. This was achieved through a virtual reality simulation in which participants experienced a journey in a Level 5 autonomous vehicle. During the trip, participants encountered a variety of situations in which we deliberately varied the vehicle's behavior, particularly in terms of waiting time before engaging in the situation. The results clearly showed that prior communication with passengers is essential for safety. When passengers were introduced in a way that focused on safety, they were more accepting of all situations. We defined optimal waiting time ranges for each situation. The first part of this thesis analyses the variation *in situ* acceptability of autonomous vehicle behaviour. These findings provide clear recommendations for manufacturers to improve passenger acceptability. These recommendations can be implemented directly through vehicle behavior or through

vehicle-passenger communication. The decisions made by autonomous vehicles, governed by algorithms, directly impact acceptability. These algorithms can and should be adjusted through various parameters to positively influence acceptability. We present a methodology for transferring technology from academic research to industrialization, using mathematical models based on experimental data. These models will allow manufacturers to determine optimal parameter values to maximize acceptability. Finally, the study of transparency and behavior explanation demonstrated that combining multiple communication modalities (visual, auditory) significantly improves explicability and acceptability. By using multiple sensory channels to explain the vehicle's behavior, we observed a substantial increase in acceptability, particularly in conflictual situations where the vehicle's behavior seemed ambiguous. This proves that perceived explicability, reinforced by diverse sensory modalities, is the key to *in situ* acceptability. Furthermore, this explicability enhances passenger acceptability *in situations* of uncertainty.

Keywords: Cognitive, Human factor, Modeling, Acceptability, Accessibility, Autonomous vehicle

Unité de recherche

Laboratoire IMS - UMR 5218, 33400 Talence, France.

Table des matières

Liste des figures	xv
-------------------	----

Liste des tableaux	xxi
--------------------	-----

Introduction générale

I Partie théorique

1 Véhicules autonomes	11
1.1 Vers une automatisation totale	11
1.2 Niveaux d'automatisation	13
1.2.1 Niveaux d'automatisation	13
1.2.2 L'automatisation du point de vue ergonomique	15
1.2.3 Les véhicules autonomes aujourd'hui sur nos routes	17
1.2.4 Rôle du conducteur	19
1.3 Architectures	21
1.3.1 Rationalisation de la tâche de conduite	21
1.3.2 Architecture en couches	22
1.4 Comportement	24
1.5 Comportement et conflit	25
1.5.1 Définition	25
1.5.2 Situation conflictuelle	26
2 Acceptabilité	29
2.1 Introduction : une définition	29
2.1.1 Acceptabilité <i>a priori</i>	30
2.1.2 Acceptabilité <i>in situ</i>	33
2.1.3 Appropriation	35
2.2 Confiance : concept influant dans les théories de l'acceptabilité	38
2.3 Comment mesurer l'acceptabilité	39

2.3.1	Mesure subjective par questionnaire	39
2.3.2	Mesure subjective par entretien et focus group	40
2.3.3	Mesures diverses	41
3	Acceptabilité du comportement des véhicules autonomes	43
3.1	Introduction	43
3.2	Acceptabilité <i>a priori</i> des véhicules autonomes	44
3.3	Acceptabilité <i>in situ</i> des véhicules autonomes	48
4	Identification des problématiques et des objectifs de travail	53
4.1	Contexte	53
4.2	Problématique et objectifs	53
4.3	Organisation de la thèse	54
II	Partie empirique	
1	Méthodologie	59
1.1	Méthodologie	59
1.1.1	Introduction	59
1.1.2	Protocole expérimental	59
1.2	Analyse de données	67
1.2.1	Analyses statistiques	67
1.2.2	Tests statistiques	69
1.2.3	Classification ascendante hiérarchique	72
2	Caractérisation de l'acceptabilité <i>in situ</i>	75
2.1	Expérimentation 1 : Etude des effets du mode de conduite d'un véhicule autonome sur l'acceptabilité	76
2.1.1	Introduction	76
2.1.2	Matériel & Méthodes	78
2.1.3	Résultats	81
2.1.4	Discussion	90
2.1.5	Conclusion	93
2.2	Expérimentation 2 : Etude des paramètres liés au comportement du véhicule autonome	95
2.2.1	Introduction	95
2.2.2	Études préliminaires	98
2.2.3	Expérimentation	108
3	Ingénierie de l'acceptabilité <i>in situ</i>	133
3.1	Interfaces Humain-Machine	134
3.1.1	Introduction	134
3.1.2	Expérimentation 1 : Acceptabilité et explicabilité	137

3.1.3	Expérimentation 2 : Acceptabilité et transparence	144
3.1.4	Conclusion	154
3.2	Transfert technologique	155
3.2.1	Introduction	155
3.2.2	Création ou adaptation du modèle	158
3.2.3	Intégration de l'acceptabilité dans les algorithmes des véhicules autonomes	170
3.2.4	Conclusion	176

III Discussion générale

Discussion générale

1	Synthèse du travail réalisé	181
1.1	Rappel des objectifs et du contexte de recherche	181
1.2	Dans le contexte de la conduite autonome, quel lien y a-t-il entre accep- tabilité <i>in situ</i> et acceptabilité <i>a priori</i> ?	183
1.2.1	Modifier l' <i>a priori</i>	185
1.2.2	Limites	186
1.3	Quels sont les paramètres qui influencent l'acceptabilité <i>in situ</i> du com- portement du véhicule autonome du point de vue du passager et du véhicule?	186
1.3.1	Influence du comportement du véhicule sur l'acceptabilité <i>in situ</i> .	187
1.3.2	Les freins et les leviers de l'acceptabilité <i>in situ</i>	188
1.3.3	Limites	190
1.4	Comment les constructeurs de véhicules autonomes peuvent-ils amé- liorer ou maintenir l'acceptabilité de leurs véhicules à travers des ajuste- ments d'algorithmes et d'interfaces utilisateurs?	192
1.4.1	Une méthodologie d'intégration : de l'humain vers la machine . . .	192
1.4.2	Prise en compte des interfaces entre le véhicule et le passager . .	195
1.5	Ce qu'il faut retenir	196
2	Perspectives	199
2.1	La place de l'humain dans le véhicule autonome	199
2.1.1	De conducteur à passager	199
2.1.2	De véhicule autonome à véhicule... intelligent	200
2.1.3	Responsabilité et éthique	200
2.2	La place du véhicule dans la société	201
2.2.1	Véhicule personnel vs. véhicule partagé	201
2.2.2	Inégalités géographiques et sociales	201
2.2.3	Vers des déplacements plus inclusifs	202

2.3	Acceptabilité	202
2.3.1	L'acceptabilité <i>a priori</i>	202
2.3.2	L'acceptabilité <i>in situ</i>	203
2.3.3	L'acceptabilité dynamique	205
2.4	Conclusion	205
Bibliographie		207
Annexes		
A	Questionnaires utilisés dans plusieurs expérimentations	233
A.1	Questionnaire UTAUT	234
A.2	Questionnaire Driving Behavior Questionnaire (DBQ)	236
A.3	Questionnaire sur les cybermalaises	239
B	Expérimentation 1 : Étude des effets du mode de conduite d'un véhicule autonome sur l'acceptabilité	241
B.1	Formulaire de consentement libre et éclairé	242
B.2	Driving Behavior Survey (DBS)	243
B.3	STAI-Y	245
B.4	Acceptabilité	247
C	Expérimentation 2 : Étude des paramètres liés au comportement du véhicule autonome	249
C.1	Formulaire de consentement libre et éclairé (expérimentation préliminaire)	250
C.2	Questionnaire démographique (expérimentation préliminaire)	252
C.3	Questionnaire de susceptibilité au cybermalaise (expérimentation préliminaire)	253
C.4	Questionnaire d'acceptabilité (expérimentation préliminaire)	255
C.5	Formulaire de consentement libre et éclairé (expérimentation principale) .	256
C.6	Questionnaire Démographie	258
C.7	Échelle de stress perçu (PSS)	259
C.8	Questionnaire d'acceptabilité	260
D	IHM - Acceptabilité et explicabilité	263
D.1	Formulaire de consentement libre et éclairé	264
D.2	Questionnaire démographique	266
D.3	Questionnaire d'explicabilité et d'acceptabilité	267
E	IHM - Acceptabilité et transparence	269
E.1	Formulaire de consentement libre et éclairé	270
E.2	Questionnaire démographique	272
E.3	Questionnaire d'acceptabilité	273

Liste des figures

I.1	Schéma représentant les niveaux d'automatisation de la conduite définis par la SAE International (2021).	14
I.2	Schéma représentant les degrés d'automatisation selon Sheridan et al. (1978).	16
I.3	Schéma représentant la comparaison entre les niveaux d'automatisation proposés par Hoc et al. (2009) et la SAE (2021).	17
I.4	Schéma représentant le rôle du conducteur devenant passager au regard des niveaux d'automatisation de la conduite définis par la SAE (2021)	19
I.5	Schéma représentant la distinction utilisateur/usager du conducteur devenant passager au regard des niveaux d'automatisation de la conduite définis par la SAE International (2021)	21
I.6	Schéma représentant la modélisation de l'activité de conduite de Michon telle que décrite par Navarro (2008).	22
I.7	Schéma représentant un exemple de traitement de l'information dans l'architecture en couche. Les capteurs perçoivent des pixels. L'information est intégrée, un obstacle empêche le passage du véhicule. Plusieurs actions sont calculées : par mesure de sécurité, il faut s'arrêter, puis un nouveau trajet peut être calculé. L'action est mise en œuvre, on freine. Les freins sont actionnés.	23
I.8	Schéma représentant le comportement d'un véhicule autonome.	26
I.9	Schéma représentant les phases de l'acceptabilité comme un <i>continuum</i> (Bel, 2016).	30
I.10	Schéma représentant le modèle UTAUT (Venkatesh et al., 2003).	32
I.11	Schéma représentant le modèle UTAUT 2.	33
I.12	Schéma représentant le modèle 4A (Bauchet et al., 2020)	36
I.13	Schéma représentant une frise chronologique des différents modèles d'acceptabilité.	37
I.14	Organisation de la thèse.	56
II.15	Schéma représentant la base commune de nos protocoles expérimentaux. .	60

II.16	Exemples de distributions du score d'acceptabilité <i>a priori</i>	63
II.17	Exemple de distribution du score d'acceptabilité <i>in situ</i>	65
II.18	Schéma représentant l'Échelle SAM issue de Bradley et Lang (1994). La première ligne mesure la valence, la deuxième ligne mesure l'éveil et la dernière ligne mesure la dominance.	67
II.19	Schéma représentant l'échelle GEW.	67
II.20	Exemple de représentation de deux distributions statistiques à l'aide d'une boîte à moustaches.	68
II.21	Exemple d'un dendrogramme illustrant la sélection de 3 classes.	73
II.22	Schéma représentant le plan de la thèse	75
II.23	Simulateur de conduite utilisé pour l'expérimentation. 3 écrans offrent une vision à 80° de la situation. Le volant et les pédales permettent une meilleure immersion.	78
II.24	Schéma du protocole expérimental.	80
II.25	Distribution des scores d'acceptabilité <i>in situ</i> (compris entre 1 et 6) selon le mode de conduite (défensif, agressif, transgressif). Les différences significatives entre les groupes ont été évaluées à l'aide d'un test de Friedman, suivi de tests post-hoc de Wilcoxon pour les comparaisons par paires.	83
II.26	Distribution des scores d'acceptabilité <i>in situ</i> selon le type d'intersections.	84
II.27	Distribution des scores d'acceptabilité <i>in situ</i> selon le type d'intersections proposées pour le mode de conduite DÉFENSIF	85
II.28	Distribution des scores d'acceptabilité <i>in situ</i> selon le type d'intersections pour le mode de conduite AGRESSIF	85
II.29	Distribution des scores d'acceptabilité <i>in situ</i> selon le type d'intersections pour le mode de conduite TRANSGRESSIF	86
II.30	Regroupement des individus en fonction des réponses au questionnaire DBS. L'axe des X représente le score des réponses aux questions représentant la modalité de comportement hostile lié à l'anxiété. L'axe des Y représente le score des réponses aux questions représentant la modalité de mesure des déficits de performance dus à l'anxiété. L'axe Z représente le score des réponses aux questions représentant la modalité de mesure des comportements de sécurité exagérés. La figure II.30a montre le résultat du regroupement sur les dimensions X et Z et la figure II.30b montre le résultat du regroupement sur les dimensions X et Y.	87
II.31	Répartition des émotions choisies par les participants dans chaque situation. Le graphique radar indique le nombre de fois où chaque émotion a été sélectionnée par les participants.	88
II.32	Répartition des émotions choisies par les participants dans chaque mode de conduite.	89
II.33	Schéma reprenant le point de vue du conducteur présenté dans chacune des vidéos du questionnaire.	98

II.34	Schéma reprenant le point de vue extérieur présentant la situation dans laquelle se trouve le véhicule.	99
II.35	Temps de réaction en fonction de la vitesse des véhicules sur la voie principale.	101
II.36	Temps de réaction en fonction du temps inter-véhiculaire et de la vitesse des véhicules sur la voie principale.	102
II.37	Schéma du protocole expérimental.	105
II.38	Photographie d'un des participants portant le casque de réalité virtuelle. . .	105
II.39	Résultats obtenus dans les deux groupes "Avec" et "Sans" pour le score de sentiment de présence.	106
II.40	Photographie d'un participant portant le casque de réalité virtuelle, immergé dans l'environnement de simulation.	109
II.41	La figure illustre les différents paramètres examinés dans les 14 scénarios du protocole expérimental. Les variables indépendantes sont le temps d'attente (avec quatre variations, tandis que la cinquième variation représente les situations où le temps n'a pas été étudié), la distance (avec cinq variations), la vitesse (avec trois variations) et le type de route (avec quatre variations).	111
II.42	Illustration du point de vue perçu dans les vidéos, avec un champ de vision étendu.	111
II.43	Schéma présentant le protocole expérimental.	112
II.44	Résultats des scores d'acceptabilité et de familiarité avant l'immersion en simulateur en fonction du groupe "sécurité" ou "naïf".	116
II.45	Comparaison de l'acceptabilité <i>in situ</i> entre les femmes et les hommes. . . .	117
II.46	Comparaison de l'acceptabilité <i>in situ</i> entre les participants ayant au moins un permis de conduire et ceux n'ayant aucun permis.	118
II.47	Comparaison de l'acceptabilité <i>in situ</i> entre la condition "sécurité" et la condition "naïve". La figure montre la distribution des scores dans chaque condition.	118
II.48	Comparaison de l'acceptabilité de <i>in situ</i> en fonction du niveau d'acceptabilité <i>a priori</i>	120
II.49	Comparaison de l'acceptabilité de <i>in situ</i> entre les conditions "sécurité" et "naïf" pour chaque type de route; les comparaisons post-hoc sont des tests de Wilcoxon.	121
II.50	Comparaison de l'acceptabilité <i>in situ</i> en fonction de la densité de trafic. . .	122
II.51	Comparaison de l'acceptabilité <i>in situ</i> entre la condition "sécurité" et la condition "naïve" dans différents temps d'attente pour (a) les carrefours à sens giratoire et (b) les intersections avec panneau STOP; les comparaisons post-hoc sont des tests de wilcoxon.	124
II.52	Comparaison de l'acceptabilité <i>in situ</i> en fonction du temps d'attente pour les carrefours à sens giratoire.	124

II.53	Comparaison des émotions évaluées dans les situations de carrefour à sens giratoire	125
II.54	Comparaison des émotions évaluées dans les situations de carrefour à feu de signalisation	126
II.55	Comparaison des émotions évaluées dans les situations de dépassement en ligne droite	127
II.56	Comparaison des émotions évaluées dans les situations d'intersection avec STOP	128
II.57	Schéma reprenant le plan de la thèse	133
II.58	Photographie de l'installation.	137
II.59	Vidéo montrant le véhicule passant un feu rouge afin de laisser passer un véhicule de pompiers.	138
II.60	Vidéo montrant le véhicule s'insérant dans un carrefour à sens giratoire après un temps d'attente de 15 secondes.	138
II.61	Captures d'écran issues de l'interface proposée.	139
II.62	Schéma du protocole expérimental.	140
II.63	Score d'explicabilité ressenti par les participants en fonction du niveau d'explicabilité proposé.	141
II.64	Score d'acceptabilité <i>in situ</i> en fonction du niveau d'explicabilité proposé.	142
II.65	Effet de l'acceptabilité <i>a priori</i> sur l'explicabilité et l'acceptabilité <i>in situ</i>	143
II.66	Photographie de l'installation.	144
II.67	Capture d'écran issue des vidéos présentées durant l'expérimentation.	146
II.68	Interfaces présentées durant l'expérimentation durant la situation dans laquelle le véhicule dépasse un cycliste.	146
II.69	Interfaces présentées durant l'expérimentation durant la situation dans laquelle le véhicule ne s'arrête pas au feu orange, car il a détecté la présence d'une moto s'engageant proche de lui à l'intersection précédente.	147
II.70	Schéma du protocole expérimental.	148
II.71	Score d'acceptabilité <i>in situ</i> en fonction du groupe.	149
II.72	Score d'acceptabilité <i>in situ</i> en fonction du niveau de transparence.	150
II.73	Score d'acceptabilité <i>in situ</i> en fonction du niveau de transparence dans les situations de giratoire et de feu de signalisation avec véhicule prioritaire.	151
II.74	Score d'acceptabilité <i>in situ</i> en fonction de si les participants ont reçu un amorçage (groupe "sécurité") ou non (groupe "naïf").	152
II.75	Score d'acceptabilité <i>in situ</i> en fonction du niveau d'acceptabilité <i>a priori</i>	153
II.76	Schéma représentant les niveaux de maturité d'une technologie décrits dans Mankins (1995)	156
II.77	Schéma de la méthodologie proposée.	158
II.78	Acceptabilité en fonction du temps d'attente dans 2 types d'intersections.	160
II.79	Acceptabilité en fonction du temps d'attente dans 2 types d'intersections.	161

II.80	Comparaison entre la densité et la fonction de répartition pour un temps d'attente de 0 seconde	165
II.81	Comparaison entre la densité et la fonction de répartition pour un temps d'attente de 10 secondes	165
II.82	Comparaison entre la densité et la fonction de répartition pour un temps d'attente de 15 secondes	165
II.83	Comparaison entre la densité et la fonction de répartition pour un temps d'attente de 20 secondes	166
II.84	Comparaison entre la densité et la fonction de répartition pour un temps d'attente de 0 seconde	167
II.85	Comparaison entre la densité et la fonction de répartition pour un temps d'attente de 10 secondes	167
II.86	Comparaison entre la densité et la fonction de répartition pour un temps d'attente de 20 secondes	167
II.87	Lissage par noyau (KDE)	168
II.88	Stratégie d'insertion dans une intersection avec un STOP dans laquelle le véhicule respecte uniquement le Code de la route.	170
II.89	Stratégie d'insertion dans une intersection avec un STOP intégrant le temps d'attente.	171
II.90	Stratégie d'insertion dans une intersection avec un STOP intégrant le temps d'attente et l'accélération.	172
II.91	Paramètres impliqués dans la stratégie, déterminés dans la prise de décision.	172
II.92	Architecture dite "en couche" utilisée dans le développement des véhicules autonomes.	174
II.93	Schématisation du module d'acceptabilité qui reçoit les paramètres à optimiser, le domaine de conception opérationnel (ODD) et renvoie la valeur des paramètres qui maximisent l'acceptabilité et le niveau d'acceptabilité associé.	174
II.94	Schématisation du module d'acceptabilité qui reçoit les paramètres à optimiser, le domaine de conception opérationnel (ODD), ici une intersection avec un STOP, et renvoie la valeur des paramètres qui maximisent l'acceptabilité et le niveau associé.	175
II.95	Schématisation de l'intégration d'un module d'acceptabilité dans l'architecture de véhicule autonome.	176
III.96	Cadre d'étude de l'acceptabilité du comportement d'un véhicule autonome.	183
III.97	Place de l'amorçage dans le continuum de l'acceptabilité	185
III.98	Exemples de métacomportements.	188
III.99	Travaux menés dans le contexte des problématiques posées.	197
III.100	L'humain dans un véhicule autonome passe de conducteur à passager. . . .	199
III.101	Le modèle UX (Hassenzahl, 2005)	203

Liste des tableaux

I.1	Influence des huit modèles sur le modèle de Venkatesh.	32
I.2	Tableau reprenant la liste des questions utilisées dans le cadre de l'évaluation de l'acceptabilité <i>a priori</i> des technologies.	40
I.3	Principaux déterminants de l'acceptabilité des véhicules autonomes.	46
I.4	Synthèse des résultats obtenus sur les effets des facteurs personnels (genre, âge et éducation) sur l'acceptabilité du véhicule selon le mode de présentation faite au sujet de ce qu'est un véhicule autonome de niveau 5 (description, simulation, réel, pas de présentation).	47
II.5	Tableau reprenant la liste des questions utilisées dans le cadre de l'évaluation de l'acceptabilité des technologies.	62
II.6	Tableau reprenant la liste des questions utilisées dans le cadre de l'évaluation de l'acceptabilité <i>in situ</i> du comportement d'un véhicule autonome.	65
II.7	Liste des vidéos en fonction de l'intersection et du mode de conduite.	79
II.8	Résultat des questionnaires démographique. L'âge est mesuré en années au jour de passation de l'expérimentation. Permis est mesuré en années et décrit le nombre d'années écoulées depuis la passation du permis de conduire (permis B français) au jour de passation de l'expérimentation.	82
II.9	Résultats détaillés de l'acceptabilité <i>in situ</i> selon le type d'intersection et le mode de conduite.	83
II.10	Résultats détaillés des réponses au questionnaire STAI-Y. La colonne Cronbach donne le score α calculé pour mesurer la qualité psychométrique des résultats aux questionnaires.	86
II.11	Résultats détaillés des réponses au questionnaire DBS dans chaque composante. La colonne Cronbach donne le score α calculé pour mesurer la qualité psychométrique des résultats aux questionnaires.	88
II.12	Nombre d'occurrences et de pourcentage des catégories sémantiques selon le mode de conduite (défensif, agressif, transgressif).	90

II.13 Distances minimales à respecter en fonction du temps d'attente. Les valeurs présentées à l'intérieur du tableau sont en secondes. En rouge, on est dans la zone de danger, en jaune on est dans une zone limite proche des 2 secondes, en vert, on dépasse les 2 secondes.	99
II.14 Moyennes et écart-type des temps de réaction (en secondes) en fonction de la distance entre les véhicules et de leur vitesse.	100
II.15 Description démographique des participants de l'étude	103
II.16 Synthèse des résultats.	106
II.17 Tableau reprenant la liste des situations présentées durant l'expérimentation.	110
II.18 Résultat des questionnaires démographique. L'âge est mesuré en années au jour de passation de l'expérimentation. Permis B désigne le nombre de participants possédant un permis de conduire permettant la conduite d'une voiture. Le permis A autorise la conduite d'une moto et le permis C d'un camion de faible poids.	115
II.19 Résultats des réponses aux questionnaires démographiques. La deuxième partie du tableau détaille les résultats des questionnaires <i>a priori</i> sur l'acceptabilité, le stress et le profil de conduite. Les chiffres en gras représentent une différence significative entre les résultats du groupe "naïf" et du groupe "sécurité" (mesurée avec le test de Wilcoxon).	116
II.20 Résultats du score d'acceptabilité <i>in situ</i> en fonction de la condition.	119
II.21 Effet de la condition sur l'acceptabilité <i>in situ</i> en fonction de la familiarité avec les véhicules autonomes. Le nombre entre parenthèses représente la taille du groupe.	119
II.22 Tableau de contingence montrant le nombre de participants en fonction du niveau d'acceptabilité a priori (élevé, moyen ou faible) et de la condition expérimentale ("Sécurité" ou "Naïf").	120
II.23 Effet de la condition sur l'acceptabilité <i>in situ</i> en fonction de l'acceptabilité <i>a priori</i>	121
II.24 Effet du type de situation sur l'acceptabilité <i>in situ</i> en fonction de la condition.	122
II.25 Score d'acceptabilité <i>in situ</i> en fonction de la densité de trafic et de la condition.	123
II.26 Effet du temps d'attente dans les carrefours à sens giratoire sur l'acceptabilité <i>in situ</i> en fonction de la condition.	123
II.27 Effet du temps d'attente dans les intersections avec STOP sur l'acceptabilité <i>in situ</i> en fonction de la condition.	124
II.28 Tableau reprenant les 2 situations présentées durant l'expérimentation. . . .	138
II.29 Résultat des questionnaires démographiques. L'âge est mesuré en années au jour de passation de l'expérimentation. Permis B désigne le nombre de participants possédant un permis de conduire permettant la conduite d'une voiture.	140
II.30 Score d'explicabilité ressenti pour chacun des niveaux d'explicabilité proposés.	141

II.31	Score d'acceptabilité <i>in situ</i> pour chacun des niveaux d'explicabilité proposés.	142
II.32	Score d'acceptabilité <i>in situ</i> et d'explicabilité ressentie en fonction du niveau d'acceptabilité <i>a priori</i> .	143
II.33	Tableau reprenant les 4 situations présentées durant l'expérimentation.	145
II.34	Résultat des questionnaires démographique. L'âge est mesuré en années au jour de passation de l'expérimentation. "Permis" désigne le nombre de participants possédant un permis de conduire permettant la conduite d'une voiture.	148
II.35	Score d'acceptabilité <i>in situ</i> pour chacun des groupes.	149
II.36	Score d'acceptabilité <i>in situ</i> pour chacun des niveaux de transparence.	149
II.37	Score d'acceptabilité <i>in situ</i> pour chacun des niveaux de transparence dans les situations de giratoire et de feu de signalisation avec véhicule prioritaire.	150
II.38	Score d'acceptabilité <i>in situ</i> en fonction du niveau de transparence et de l'amorçage.	152
II.39	Score d'acceptabilité <i>in situ</i> en fonction du niveau d'acceptabilité <i>a priori</i> .	152
II.40	Tableau de contingence montrant le nombre de participants en fonction du niveau d'acceptabilité <i>a priori</i> (élevé, moyen ou faible) et de la condition expérimentale ("Sécurité" ou "Naïf").	153
II.41	Comparaison des approches déterministe et probabiliste pour la modélisation de l'acceptabilité <i>in situ</i> .	169
II.42	Résumé des situations conflictuelles utilisées en interne par Stellantis, paramètres et apports en termes d'acceptabilité.	173

Introduction générale

“Est-ce que vous monteriez dans une voiture qui n’a ni volant ni pédales ?

Vraiment ? Une voiture capable de se conduire toute seule ?”

Dans un monde où les embouteillages seront un lointain souvenir, les accidents anecdotiques et la mobilité accessible à tous, c’est la question qu’il faudra peut-être se poser.

Dans une dynamique qui semble tendre vers une automatisation totale des véhicules autonomes, nous nous sommes intéressés à la question de l’acceptabilité d’une telle technologie dans nos sociétés. Cette question nous semble primordiale pour une bonne intégration des véhicules autonomes sur les routes. Cette intégration passera d’abord par une phase de tests sur routes dédiées, puis s’ouvrira aux essais sur route ouverte, ce qui déclenchera une phase de transition durant laquelle les véhicules autonomes navigueront parmi les véhicules non autonomes.

S’il est correctement développé, un véhicule autonome peut s’avérer plus performant que le conducteur humain.

- il peut détecter des obstacles plus efficacement et réagir plus rapidement qu’un humain ;
- il est insensible à la fatigue ;
- il peut analyser le trafic et optimiser les temps de trajet ;
- il peut rendre une autonomie à des personnes en incapacité de conduire.

On peut donc se demander pourquoi il y aurait des problèmes d’acceptabilité. Les points exposés semblent tous positifs ; mais ils peuvent être perçus négativement durant leur intégration.

La fatigue se décrit par l’usure des pièces dans une machine. Pour y remédier, il est nécessaire de réfléchir au maintien en conditions opérationnelles de la technologie. D’une part, le suivi de l’usure des pièces permet d’anticiper les défaillances matérielles, mais implique un coût supplémentaire. Aujourd’hui, ce coût est imputé au propriétaire de la voiture qui est garant de l’entretien de son véhicule, validé, en France, par un contrôle technique obligatoire tous les deux ans. Dans un contexte d’autonomie, on peut garantir une sécurité accrue en dupliquant les systèmes. Ainsi, en cas de défaillance d’un système, celui-ci peut être suppléé par une copie plus ou moins identique, permettant d’éviter l’accident. Cette solution, utilisée notamment dans l’aviation, est efficace, mais implique des coûts technologiques supplémentaires.

Dans un monde idéal, le véhicule autonome, respecte scrupuleusement le Code de la route. Lorsqu’il arrive à une intersection avec un STOP, il s’arrête et attend que l’intersection soit libre pour s’engager. Cette situation représente le cas d’école, celle qui survient dans la majorité des situations. Maintenant, dans cet exemple, augmentons la densité du trafic : la file de voitures est continue, paraît infinie, et aucun véhicule ne semble vouloir céder le passage, chacun étant dans son bon droit, ayant la priorité. Toujours respectueux du Code de la route, notre véhicule autonome va attendre d’avoir la place de s’engager. Il va donc calculer la distance au véhicule qui

approche et déterminer l'accélération nécessaire pour s'engager sans créer de collision. Plusieurs options sont disponibles :

- Attendre... 5 secondes, 10 secondes ... 30 secondes... j'invite le lecteur à se représenter ces 30 secondes au volant de son véhicule, au milieu d'un trafic dense, en ajoutant peut-être quelques klaxons provenant des voitures derrière, leurs conducteurs s'étant agacés bien plus tôt.
- Accélérer fortement. Le véhicule garantit que le passage se fera sans collisions, mais les passagers sont projetés en arrière et sur les côtés du véhicule en tournant.

La solution optimale en matière de sécurité n'est pas forcément la plus acceptable du point de vue des passagers ou des autres usagers de la route.

Une série de questions dépendent des choix que feront les constructeurs :

Quand j'entre dans un véhicule autonome, comment lui faire comprendre ma destination, puis-je configurer des paramètres de confort ? Faut-il paramétrer le véhicule à l'aide d'un expert en concession ou bien puis-je changer mes préférences pendant un trajet ?

Le développement des nouvelles technologies d'automatisation des systèmes de conduite place les industriels du secteur de l'automobile face à un enjeu majeur : la prise en compte des facteurs humains dans le développement de ces technologies.

Dans le contexte des véhicules autonomes, il devient important d'étudier l'acceptabilité des comportements de ces systèmes automatisés pour permettre l'implémentation des véhicules du futur et éviter un rejet social de la technologie.

L'homme a toujours automatisé, soit pour se remplacer dans des tâches laborieuses, soit pour effectuer des tâches qui seraient autrement impossibles. L'automatisation a joué un rôle dans la plupart des grandes réalisations des derniers siècles, et l'automatisation moderne est toujours d'actualité (Diebold, 1960 ; Nof, 2009).

L'industrie automobile développe la mobilité autonome, ce qui représente un défi important. Dans un premier temps, il a fallu explorer la faisabilité de la technologie, en se concentrant sur les aspects techniques des technologies d'automatisation. Avec le développement de ces technologies, différents niveaux d'autonomie ont été proposés. Les premiers niveaux (1 à 3) décrivent des fonctionnalités d'aide à la conduite qui automatisent certaines fonctions dans des conditions très spécifiques. Les niveaux 4 et 5 décrivent la capacité du véhicule à prendre des décisions dans un environnement plus ou moins contrôlé (SAE International, 2021).

Les systèmes automatisés soulèvent des questions sociétales allant de l'éthique à la sociologie (Khogali & Mekid, 2023), il est clair que l'introduction de véhicules entièrement autonomes sur nos routes modifiera profondément le concept de mobilité de la société (Duarte & Ratti, 2018 ; Khogali & Mekid, 2023). Dans ce contexte, il devient important de se concentrer sur la notion d'acceptabilité des véhicules autonomes.

L'acceptabilité est un processus temporel (Bel et al., 2019). Des modèles théoriques, tels que le modèle UTAUT, étudient l'acceptabilité *a priori*, i.e. avant la confrontation

avec la technologie. Ces modèles décrivent l'effet direct des habitudes et des conditions facilitantes, ainsi que l'effet modérateur de l'âge, du sexe et de l'expérience sur l'intention d'utiliser une technologie (Venkatesh & Bala, 2008). La plupart des études se concentrent sur le comportement global des véhicules autonomes pour expliquer la variation de l'acceptabilité en fonction du comportement du véhicule autonome (Carteni, 2020 ; Hilgarter & Granig, 2020). Un fossé subsiste cependant entre la nature holistique de ces modèles et la possibilité de les mettre en œuvre dans les algorithmes de véhicules autonomes actuellement en cours de développement. C'est tout l'enjeu de ce travail de thèse, déterminer les paramètres qui influent sur l'acceptabilité du comportement d'un véhicule autonome et préconiser la façon d'intégrer le facteur humain au sein de ces algorithmes.

Afin de répondre aux enjeux scientifiques et industriels liés à cette problématique, ce travail est structuré en trois parties.

Dans la première partie, nous aborderons les concepts clés nécessaires à la compréhension du sujet : nous décrirons les véhicules autonomes et ferons un état des lieux de l'industrie à ce stade. Nous définirons également le concept d'acceptabilité des technologies et analyserons le véhicule autonome à travers ce prisme. Cette section permettra d'identifier les principales problématiques et les objectifs à atteindre.

La deuxième partie sera consacrée à une exploration empirique des facteurs influençant l'acceptabilité du comportement d'un véhicule autonome en termes de freins et de leviers pour l'acceptabilité du point de vue des passagers. Nous proposerons également des recommandations, pour les industriels, pour améliorer l'acceptabilité dans des situations potentiellement conflictuelles.

Enfin, la troisième partie se concentrera sur les contributions de nos travaux, tout en ouvrant la discussion sur les perspectives futures dans ce domaine.

Première partie

Partie théorique

Introduction

Dans cette première partie, nous exposons le cadre théorique dans lequel la thèse s'inscrit en introduisant les concepts essentiels à la compréhension du sujet et permettant de définir la problématique et les objectifs.

Dans un premier temps, nous explicitons le concept d'autonomie d'un véhicule en détaillant les différents niveaux d'autonomie et leur fonctionnement, depuis l'assistance à la conduite jusqu'à l'autonomie complète. Cette analyse permet de situer les technologies actuelles et de mieux en appréhender les enjeux.

Nous nous intéressons ensuite à la notion d'acceptabilité des technologies, un facteur clé pour l'adoption des véhicules autonomes par le public. Nous définissons les critères d'acceptabilité, en tenant compte des dimensions techniques, sociales et psychologiques, afin de mieux comprendre les freins et les leviers à actionner pour favoriser l'acceptation.

Ce prisme d'analyse nous permettra d'étudier les enjeux liés à l'intégration des véhicules autonomes dans la société.

Chapitre 1

Véhicules autonomes

1.1 Vers une automatisation totale

On définit l'automatisation comme l'exécution d'une tâche par une machine fonctionnant sans intervention humaine (Éditions Larousse, 2024b). Dérivé du grec αυτοματος (automatos) signifiant "*qui se meut de soi-même*", l'automate désigne la machine, automatique, capable d'imiter des corps animés par le moyen de dispositifs mécaniques ou électriques (Éditions Larousse, 2024a). Le terme autonome provient, lui, du grec αυτονομος (autonomos) signifiant "*qui se gouverne par ses propres lois*". Il peut servir à définir quelqu'un (ou quelque chose) capable d'agir sans avoir recours à autrui (Éditions Larousse, 2024c).

Dès le début du 19^e siècle, les opérations de fabrication sont découpées et spécialisées. Les années 1910 sont marquées par l'apparition du travail à la chaîne dans les usines d'assemblage. Henry Ford s'inspire alors du Taylorisme pour optimiser les processus de fabrication de la Ford T, modèle qui marque le début de la fabrication en série des automobiles. C'est cette rationalisation du travail qui va permettre, plus tard, la robotisation des tâches de production : l'automatisation.

L'automatisation ne s'arrête pas aux processus de fabrication ; rapidement, différentes tâches de la conduite sont étudiées pour être automatisées. Dans les années 1930, des systèmes de transmission automatique apparaissent, ancêtres de la boîte de vitesse automatique que nous connaissons aujourd'hui (la boîte Fleischel est inventée par le français Gaston Fleischel). Dans les années 1950, le mécanisme du régulateur de vitesse est inventé (le premier régulateur de vitesse est imaginé par l'américain Ralph Teetor) ; ce mécanisme permet au conducteur de sélectionner une vitesse qui est maintenue par le véhicule (consigne), permettant au conducteur de ne plus appuyer sur l'accélérateur. Les fonctions automatisées sont souvent des mécanismes permettant de rendre la conduite plus sûre, beaucoup d'innovations sont importées du monde de l'aviation comme c'est le cas pour le système antiblocage des roues (ABS). Ce mécanisme a été imaginé pour empêcher le blocage des roues pendant le freinage et éviter les dérapages des avions qui atterrissent. Le principe a été importé dans le monde de l'automobile dans les années 1930 et est aujourd'hui un dispositif

obligatoire sur les nouveaux véhicules en Union européenne. Le domaine de l'automobile s'inspire énormément de l'aviation. La complexité de maintenir un avion en vol a conduit les chercheurs à s'intéresser très tôt à l'automatisation des systèmes avioniques, permettant ainsi de réduire le nombre de personnes nécessaires à faire voler un avion (Banks et al., 2019). Avant l'avènement des commandes électriques dans les années 1980, les grands avions commerciaux nécessitaient la présence de :

- un commandant de bord pour la prise de décision ;
- un copilote pour assister le commandant ;
- un ingénieur de vol pour gérer les différents systèmes de l'avion (moteurs, carburant, etc.) ;
- un navigateur pour calculer les routes en suivant des balises radio tout le long du vol.

En 2024, seuls deux pilotes (un commandant de bord et un copilote) sont nécessaires à la mise en œuvre d'un vol commercial. Les tâches comme le calcul et le suivi d'une route, le maintien du cap, de l'altitude et de la vitesse ou la gestion des moteurs sont maintenant automatisées et gérées à travers un ordinateur de bord. Les pilotes sont devenus des planificateurs et des superviseurs de plan de vol.

Cependant, les avions évoluent dans des environnements "simples" de par la faible quantité d'obstacles que l'on peut trouver dans le ciel. Si on omet les autres aéronefs, le suivi d'une route est une tâche simple. Si on se place du point de vue d'un véhicule terrestre, de nombreuses variables viennent s'ajouter à la complexité de la tâche de conduite (nombre d'usagers, conformation des routes, etc.).

Le volonté d'automatiser la conduite est motivée par plusieurs facteurs sociaux, parmi lesquels :

- La volonté de réduire les accidents de la route : environ 90 % des accidents sont dus à des erreurs humaines. Les véhicules autonomes pourraient réduire le risque d'accident et améliorer la sécurité routière (Fagnant & Kockelman, 2015).
- L'optimisation et la fluidification du trafic : les systèmes de d'automatisation de la conduite sont conçus pour optimiser les trajets, coordonner les mouvements entre véhicules, et réduire les embouteillages. Ils peuvent aussi permettre une meilleure gestion des intersections et des flux de circulation, entraînant des déplacements plus fluides (Anderson et al., 2016 ; Bimbraw, 2015 ; Litman, 2020).
- La volonté de rendre accessible la mobilité urbaine : les véhicules autonomes ouvrent des possibilités nouvelles pour les personnes qui ne peuvent pas conduire, notamment les personnes âgées, les personnes en situation de handicap ou les personnes sans permis. Cela contribue à une mobilité plus inclusive (Harper et al., 2016)
- etc.

La recherche sur les véhicules autonomes s'est concentrée assez tôt sur les concepts de reconnaissance et de détection. Les premiers symposiums sur les véhicules intelligents, en 1992, portaient en majorité sur les technologies de reconnaissance d'éléments dans l'environnement. En 1995, Navlab 5 est l'un des premiers véhicules à avoir permis la collecte de données, en situation réelle, en ayant parcouru plus de 9500 km (6000 miles) (Jochem et al., 1995).

Les années 2000 sont marquées par un essor de l'étude des véhicules autonomes. L'objectif est d'abord militaire, afin de réduire le nombre d'humains présents sur les champs de bataille (Banks et al., 2019). En 2004, la DARPA (Agence pour les projets de recherche avancée de défense aux États-Unis) crée le Grand Challenge, un concours dont l'objectif est de concevoir un véhicule autonome capable de se déplacer sur une grande distance dans le désert. Ce challenge a été relancé l'année suivante, puis, en 2007, le DARPA Urban Challenge a permis de mettre en interaction pour la première fois des véhicules autonomes et des véhicules "classiques" dans un trafic urbain. À ce jour, l'objectif semble tendre vers une automatisation de la conduite la plus totale possible. Les acteurs du domaine travaillent à proposer des véhicules capables de se déplacer sans intervention humaine. À l'instar de l'aviation, pour des raisons de sécurité, une redondance des systèmes et un nombre important de capteurs et de calculateurs doivent être mis en place. Ceci conduit à des coûts importants des futurs véhicules totalement autonomes, ce qui peut constituer un frein important dans la généralisation de la technologie pour des particuliers. Les constructeurs envisagent donc aujourd'hui des véhicules complètement autonomes dans le cadre de flottes de véhicules partagés en milieux urbains. On commence à voir des exemples apparaître en essais, notamment aux États-Unis (voir section 1.2.3).

1.2 Niveaux d'automatisation

1.2.1 Niveaux d'automatisation

La communauté internationale automobile s'est accordée sur une définition des termes liés à la conduite automatique et autonome. Six niveaux d'automatisation de la conduite ont été définis (SAE International, 2021). Pour les niveaux 1 à 2, on parle de systèmes automatisés d'aide à la conduite (ADAS) et, pour les niveaux 3 à 5, on parle de systèmes autonomes de délégation de conduite. Ces niveaux sont mutuellement exclusifs et sont fonction du rôle de l'utilisateur dans le véhicule ainsi que des éléments qui sont automatisés (voir figure I.1).

- Niveau 0 : Aucune assistance
- Niveau 1 : Assistance à la conduite
Gestion automatisée des mouvements soit latéraux soit longitudinaux. Le conducteur reste garant du contrôle de l'environnement (détections d'obstacles et prise de décision). *Exemple* : régulateur de vitesse.

	0	1	2	3	4	5
	Pas d'assistance	Aide à la conduite	Automatisation partielle	Automatisation conditionnelle	Automatisation élevée	Automatisation totale
Véhicule		Contrôle latéral OU longitudinal	Contrôle latéral ET longitudinal	Contrôle total dans un domaine opérationnel défini Surveillance de l'environnement	Contrôle total dans un domaine opérationnel défini Surveillance de l'environnement	Contrôle total Surveillance de l'environnement
Humain		Contrôle longitudinal OU latéral Surveillance de l'environnement	Surveillance de l'environnement	Reprise en main si demandée par le véhicule	/ Pas de reprise en main	/ Pas de reprise en main
	Conducteur			Moniteur	Passager	

Figure I.1 – Schéma représentant les niveaux d'automatisation de la conduite définis par la SAE International (2021).

- Niveau 2 : Automatisation partielle
Gestion automatisée des mouvements latéraux et longitudinaux. Le conducteur supervise le contrôle de l'environnement et les systèmes d'automatisation.
Exemple : Assistance dans les embouteillages, assistance de parking.
- Niveau 3 : Automatisation sous condition.
Gestion automatisée des tâches de conduite dans des domaines de conception opérationnelle (ODD) définis. Le conducteur, appelé "fallback-ready user", est l'utilisateur prêt à reprendre la main en cas de demande du système (ou de défaillance). *Exemple* : parking automatique, conduite autoroutière.
- Niveau 4 : Automatisation élevée
Gestion automatisée des tâches de conduite dans des domaines de conception opérationnelle (ODD) définis. Il n'est pas attendu que l'utilisateur doive reprendre la main.
- Niveau 5 : Automatisation totale
Gestion automatisée des tâches de conduite sans condition. Il n'est pas attendu que l'utilisateur doive reprendre la main. L'autonomie n'est limitée à aucun domaine de conception opérationnelle (ODD).

Il est important de noter que ce n'est pas le véhicule qui est d'un niveau ou d'un autre, mais bien les fonctionnalités. Un véhicule pourrait être équipé d'un régulateur de vitesse (automatisation de niveau 1), mais également d'un système de parking automatique (automatisation de niveau 3). Le contexte de conduite (domaine de conception opérationnel (ODD)) peut ensuite permettre ou non l'utilisation des fonctions d'automatisation.

En France, le Code de la route parle de véhicule à délégation de conduite totalement automatisé. Il fait ainsi référence au véhicule autonome équipé de fonctionnalités de niveau 5, et le définit comme un "véhicule équipé d'un système de conduite automatisé exerçant le contrôle dynamique d'un véhicule pouvant répondre à tout aléa de circulation ou défaillance, sans exercer de demande de reprise en main pendant une manœuvre dans le

domaine de conception technique du système technique de transport routier automatisé auquel ce véhicule est intégré” (Journal Officiel, [2022](#)).

Dans la suite du manuscrit, nous désignons un véhicule à délégation de conduite totalement automatisé, utilisant des fonctionnalités de niveau 5 par les termes de “véhicule totalement autonome” ou “véhicule de niveau 5”.

1.2.2 L’automatisation du point de vue ergonomique

Il peut être intéressant d’étudier l’automatisation en l’analysant du point de vue de la coopération entre l’Homme et la machine. Sheridan et al. ([1978](#)) proposent une échelle en 10 niveaux caractérisant le degré d’automatisation dans la prise de décision entre un humain et une machine (voir figure 1.2) :

1. L’opérateur effectue toutes les étapes ;
2. La machine assiste l’humain dans la détermination des options ;
3. La machine assiste l’humain dans la détermination des options et lui en suggère une ;
4. La machine choisit une action et l’humain décide de l’implémentation ;
5. La machine choisit et implémente une action après accord de l’humain ;
6. La machine choisit une action et l’implémente après accord de l’humain ou après lui avoir laissé assez de temps pour l’annuler ;
7. La machine effectue toutes les étapes et informe l’humain ;
8. La machine effectue toutes les étapes et informe l’humain s’il le demande ;
9. La machine effectue toutes les étapes et informe l’humain si elle l’estime nécessaire ;
10. La machine décide s’il est nécessaire d’effectuer une action et s’il faut en informer l’humain.

Le point de vue ergonomique estime que l’automatisation doit assister plutôt que remplacer le conducteur. Hoc et al. ([2009](#)) ont proposé une application à la conduite automatisée des degrés d’automatisation exprimés par Sheridan et al. ([1978](#)) en mettant en valeur les modes de coopération et les implications psychologiques de ces modes à travers les niveaux suivants :

- Mode de perception : la machine est une extension sensorielle de l’humain.
- Mode de contrôle mutuel : la machine interprète certaines informations liées aux limites et risques de l’activité de conduite et retourne des informations au conducteur. Hoc et al. ([2009](#)) évoquent quatre sous-catégories :
 - Mode avertissement : le véhicule avertit le conducteur (e.g. avertisseur de franchissement de ligne).

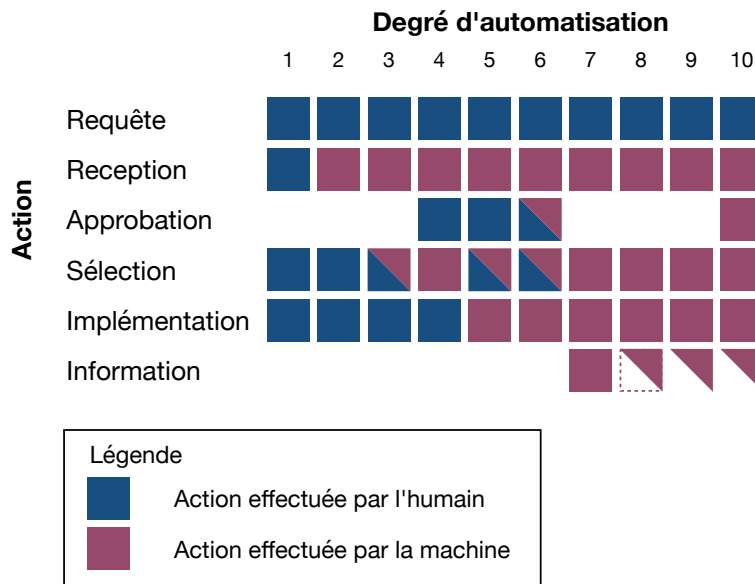


Figure I.2 – Schéma représentant les degrés d'automatisation selon Sheridan et al. (1978).

- Mode suggestion : le véhicule propose une action au conducteur (e.g. vibration du volant suggérant de tourner dans une direction donnée (Morales-Alvarez et al., 2022 ; Navarro et al., 2007).
- Mode limité : le véhicule contraint l'action du conducteur (e.g. limiteur de vitesse).
- Mode correctif : l'action en cours peut être corrigée par le conducteur ou le véhicule.
- Mode de délégation de fonctions :
 - Mode "managé" : certaines commandes sont médiées par le véhicule qui va appliquer des consignes de sécurité (e.g. : ABS).
 - Mode "sélectionné" : le conducteur prédéfinit des valeurs contrôle que la machine suit automatiquement.
- Mode d'automatisation totale.

On peut faire une analogie entre les niveaux proposés par Hoc et al. (2009) et les niveaux opérationnels proposés plus tard par la SAE (SAE International, 2021). Ainsi, le mode de perception de Hoc, proposant uniquement des informations "sensorielles" à propos de l'environnement, pourrait se trouver dans le véhicule sans assistance (niveau 0). Le mode de contrôle mutuel pourrait correspondre aux technologies d'assistance à la conduite (niveau 1) avec des technologies telles que le limiteur de vitesse. Le mode de délégation de fonction pourrait se trouver à cheval entre les technologies d'assistance à la conduite (niveau 1) avec des technologies comme le régulateur de vitesse, les technologies d'automatisation partielle (niveau 2) et les premiers niveaux d'autonomie (niveau 3). Enfin, le mode d'automatisation totale se retrouve

parfaitement dans les technologies d'automatisation élevée et totale (niveaux 4 et 5) (voir figure I.3).



Niveaux Hoc et al. (2009)	Mode de perception	Mode de contrôle mutuel	Mode de délégation de fonction		Mode de totale autonomie	
Niveaux SAE (2021)	0	1	2	3	4	5
	Pas d'assistance	Aide à la conduite	Automatisation partielle	Automatisation conditionnelle	Automatisation élevée	Automatisation totale
 Véhicule		Contrôle latéral OU longitudinal	Contrôle latéral ET longitudinal	Contrôle total dans un domaine opérationnel défini Surveillance de l'environnement	Contrôle total dans un domaine opérationnel défini Surveillance de l'environnement	Contrôle total Surveillance de l'environnement
 Humain		Contrôle longitudinal OU latéral Surveillance de l'environnement	Surveillance de l'environnement	Reprise en main si demandée par le véhicule	/ Pas de reprise en main	/ Pas de reprise en main

Figure I.3 – Schéma représentant la comparaison entre les niveaux d'automatisation proposés par Hoc et al. (2009) et la SAE (2021).

Il est important de noter que cette analogie ne correspond pas parfaitement. Notamment parce que les niveaux proposés par Hoc et al. (2009) s'appuient sur la collaboration entre le véhicule et le conducteur pour les tâches de conduite, alors que les niveaux proposés par la SAE (2021) tendent plutôt vers un remplacement complet du conducteur humain au profit d'un conducteur artificiel.

1.2.3 Les véhicules autonomes aujourd'hui sur nos routes

Aujourd'hui, en 2024, les véhicules commercialisés sur les marchés mondiaux proposent essentiellement des technologies de niveau 2. Des constructeurs comme Tesla (2024) (Autopilot®) ou General Motors (2024) (Super Cruise®) proposent essentiellement des véhicules équipés d'une technologie permettant le changement de voie automatique sur certaines autoroutes, le parking automatique ou encore l'arrêt automatique du véhicule aux feux de signalisation, mais toujours sous la surveillance du conducteur.

Autonomie de niveau 3

Depuis, 2017, des projets de recherche à l'échelle européenne, investiguent la faisabilité d'implémentation du niveau 3. Le projet L3Pilot (Weber et al., 2021) a ainsi pu tester des technologies telles que :

- Traffic Jam Chauffeur, permettant au véhicule une autonomie totale durant les embouteillages sur autoroute jusqu'à une vitesse de 60 km/h ;
- Motorway Chauffeur, permettant le déplacement sur autoroute jusqu'à 130 km/h, avec gestion du dépassement des véhicules plus lents ;
- Parking Chauffeur, permettant au véhicule de se déplacer de manière autonome dans et hors de sa place de garage (ou parking).

Certaines de ces technologies semblent se retrouver dans des essais de déploiement, notamment chez Audi (2017) qui a souhaité déployer la technologie Traffic Jam Driver® sur l'un de ses modèles afin de lui permettre de se déplacer en autonomie durant les embouteillages, mais la technologie ne semble pas avoir été commercialisée. En 2024, Mercedes a commercialisé un véhicule équipé de la technologie Drive Pilot® (Mercedes-Benz Group, 2023) pour l'état du Nevada aux États-Unis et BMW a commercialisé un véhicule équipé de la technologie Personal Pilot L3® (BMW, 2024) pour l'Allemagne. Ces technologies permettent au véhicule de prendre en charge les tâches de conduite sur autoroute à trafic dense jusqu'à 60 km/h.

Autonomie de niveau 4

À ce jour, seuls quelques essais publics sont réalisés avec des véhicules proposant des fonctionnalités d'autonomie de niveau 4. Ces essais sont limités à des domaines de conception opérationnels (ODD) précis, les voitures peuvent opérer dans certains quartiers et sont soumises à des limitations de vitesse strictes.

La société Waymo (2024) propose des trajets en taxi autonome dans les villes de San Francisco, Phoenix et Los Angeles aux États-Unis. Dans certaines zones de ces villes, il est possible de commander un trajet via une application. Le véhicule se déplace alors de manière autonome, récupère les passagers et les emmène à leur destination. La société Cruise (2024) propose également des trajets en taxi dans les villes de Dallas, Houston et Phoenix. La société DeepRoute.ai propose des robotaxis en Chine, dans les villes de Shenzhen et Guangdong.

Les essais des voitures autonomes s'annoncent prometteurs, bien qu'ils soulèvent déjà des enjeux sociaux significatifs. En 2023, les véhicules de la société Waymo ont été impliqués dans plusieurs accidents, incitant les autorités à suspendre temporairement leurs autorisations de circulation. Un incident plus anecdotique, mais révélateur, s'est produit en 2024 : ces mêmes voitures ont perturbé les riverains près de leur aire de stationnement en communiquant entre elles par klaxons, apparemment sans raison. Ce problème a rapidement été résolu, mais cet épisode, bien que mineur, met en lumière les défis d'acceptabilité et d'intégration sociale auxquels cette technologie doit encore faire face.

Autonomie de niveau 5

Le niveau 4 étant encore à l'essai, le niveau tout autonome sans condition n'est pas encore déployé. Cela reste toutefois l'objectif d'entreprises comme Tesla ou Waymo qui souhaitent voir leurs véhicules intégrés sur les routes.

Ces systèmes à l'essai dans des zones bien définies permettent d'obtenir un vrai aperçu, en conditions écologiques, des effets de l'introduction du véhicule autonome dans le paysage urbain. Ainsi, bien que proposée comme une alternative révolutionnaire par les constructeurs, on peut percevoir quelques freins à

l'introduction d'une telle technologie. Une fois la technologie mature et prête à être déployée, il faudra rapidement réfléchir aux aspects légaux pour éviter, par exemple, qu'un véhicule ne soit arrêté par un agent de police après avoir confondu un panneau de signalisation (Davis, 2024). Il faudra également penser à une intégration intelligente pour la transition. Cette transition va en effet transformer en profondeur le mode de déplacement dans les villes. Les conducteurs vont changer de rôle et devenir des passagers, parfois sans permis de conduire.

1.2.4 Rôle du conducteur

De conducteur à passager

Avec une évolution de l'automatisation des fonctions de conduite, on peut observer un changement des activités de l'humain au sein d'un véhicule. Sur les premiers niveaux d'automatisation (de 0 à 2), le conducteur contrôle le véhicule, il est responsable des actions, de la sécurité et du respect des normes. On parle de *Driver driving* (Banks et al., 2018). À l'instar des avions, dans la situation intermédiaire, l'automatisation d'un certain nombre de tâches modifie le rôle du conducteur qui devient plutôt superviseur des décisions et du contrôle opéré par le véhicule (niveau 3). On parle de *Driver monitoring* (Banks et al., 2018). Dans la situation d'autonomie totale, l'intégralité des tâches de conduite est attribuée au véhicule. Le conducteur devient passager (voir figure I.4).



	0	1	2	3	4	5
	Pas d'assistance	Aide à la conduite	Automatisation partielle	Automatisation conditionnelle	Automatisation élevée	Automatisation totale
 Véhicule		Contrôle latéral OU longitudinal	Contrôle latéral ET longitudinal	Contrôle total dans un domaine opérationnel défini Surveillance de l'environnement	Contrôle total dans un domaine opérationnel défini Surveillance de l'environnement	Contrôle total Surveillance de l'environnement
 Humain		Contrôle longitudinal OU latéral Surveillance de l'environnement	Surveillance de l'environnement	Reprise en main si demandée par le véhicule	/ Pas de reprise en main	/ Pas de reprise en main
	Conducteur			Moniteur	Passager	

Figure I.4 – Schéma représentant le rôle du conducteur devenant passager au regard des niveaux d'automatisation de la conduite définis par la SAE (2021)

D'utilisateur à usager

En français, l'Académie Française (2023c) définit l'usager comme “celui qui a droit d'usage, celui qui fait usage”. Et de manière étonnante, on ne retrouve pas de définition du terme utilisateur dans le dictionnaire de l'Académie Française. L'usager semble décrire celui qui utilise un service (en général public) (Éditions Larousse, 2023b ; Trésor de la Langue Française, 1994a) et l'utilisateur est plus généralement, celui qui

utilise (Éditions Larousse, 2023c ; Trésor de la Langue Française, 1994b). Si on s'intéresse au français québécois, l'utilisateur est défini comme la personne [...] qui a recours aux services d'une entreprise privée ou qui utilise un bien acquis à titre personnel. L'usager, en revanche, est défini comme la personne [...] qui a recours à un service public ou qui utilise un bien du domaine public. Le québécois distingue l'usager de la route de l'utilisateur d'un téléphone portable (Grand dictionnaire terminologique, 2023a, 2023b). En anglais, les termes *utilisateur* et *usager* sont tous deux traduits *user*, qui décrit l'individu qui utilise quelque chose ("*a person who uses something*"). La langue française semble donc poser une distinction entre les notions d'utilisateur et d'usager. On peut décrire l'utilisateur comme celui qui a une interaction physique avec l'objet alors que l'usager se sert d'un service.

L'exemple du tramway

Prenons l'exemple d'un trajet en tramway. Le passager, en tant qu'usager du service, bénéficie du transport sans avoir à interagir directement avec les systèmes techniques, hormis quelques éléments non liés à la tâche de conduite, comme le composteur. La conduite, quant à elle, relève entièrement du service fourni.

À l'inverse, le conducteur du tramway est un véritable utilisateur de la technologie. Il interagit de manière active et physique avec celle-ci, dans le but de piloter le véhicule et d'assurer son bon fonctionnement pour le déplacement.

Dans le contexte de la conduite, l'utilisateur est le conducteur. La conduite est l'outil lui permettant d'atteindre son objectif. Dans le cadre d'une autonomie complète de la tâche de conduite, celle-ci passe d'outil à service. Le passager est l'usager qui n'a pas besoin d'en comprendre le fonctionnement pour en faire usage (voir figure 1.5). Et nous pouvons nous demander si cette transformation de conducteur à passager (d'utilisateur à usager) aura un impact sur l'acceptabilité vis-à-vis du comportement du véhicule autonome.

	0	1	2	3	4	5
	Pas d'assistance	Aide à la conduite	Automatisation partielle	Automatisation conditionnelle	Automatisation élevée	Automatisation totale
Véhicule		Contrôle latéral OU longitudinal	Contrôle latéral ET longitudinal	Contrôle total dans un domaine opérationnel défini Surveillance de l'environnement	Contrôle total dans un domaine opérationnel défini Surveillance de l'environnement	Contrôle total Surveillance de l'environnement
Humain		Contrôle longitudinal OU latéral Surveillance de l'environnement	Surveillance de l'environnement	Reprise en main si demandée par le véhicule	/ Pas de reprise en main	/ Pas de reprise en main
	Conducteur			Superviseur	Passager	
	Utilisateur				Usager	

Figure I.5 – Schéma représentant la distinction utilisateur/usager du conducteur devenant passager au regard des niveaux d'automatisation de la conduite définis par la SAE International (2021)

Maintenant que nous avons une compréhension claire des différents niveaux d'autonomie des véhicules, nous allons explorer la façon dont cette autonomie est rendue possible, notamment au niveau de l'architecture du véhicule.

1.3 Architectures

Pour faire fonctionner un véhicule autonome, il faut des éléments matériels et logiciels qui doivent communiquer afin d'obtenir un tout cohérent. On parlera d'architecture pour désigner l'agencement des différents éléments constitutifs d'un véhicule autonome. Depuis les années 2000, les architectures développées s'inspirent du fonctionnement cognitif de la conduite humaine. Le véhicule autonome est alors considéré comme un agent rationnel (inspiré de la théorie des systèmes multiagents) en interaction avec son environnement (Tas et al., 2016).

1.3.1 Rationalisation de la tâche de conduite

De la même façon que l'on a rationalisé les chaînes de production, l'activité de conduite a été analysée. Il est possible de modéliser cette activité selon trois niveaux (Janssen, 1979 ; Michon, 1971 ; Michon, 1985) (voir figure I.6) :

- le niveau stratégique décrit les opérations de planification générale d'un trajet, l'évaluation des coûts et des risques ;
- le niveau tactique décrit les opérations de planification à court terme, contraintes par la situation actuelle (évitement, dépassement, etc.) ;
- le niveau opérationnel décrit les actions sur les commandes du véhicule.

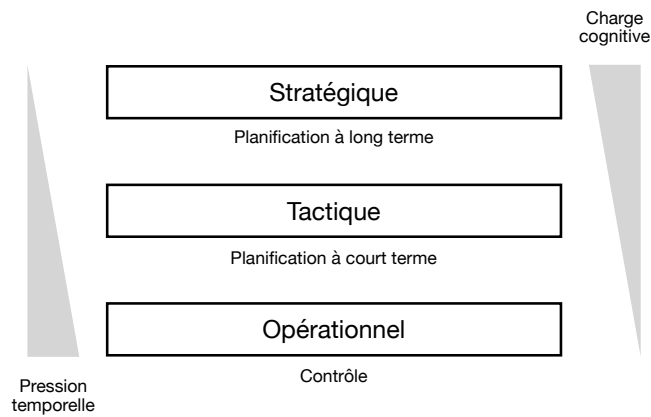


Figure I.6 – Schéma représentant la modélisation de l'activité de conduite de Michon telle que décrite par Navarro (2008).

1.3.2 Architecture en couches

L'agent de conduite est communément constitué d'une architecture en couches, dont chacune représente une composante de la conduite autonome incluant les différentes fonctions (ou module) associées :

- **La couche de perception** permet à l'agent de percevoir son environnement. Les différents capteurs (GPS, radar, etc.) lui permettent d'obtenir des données brutes (positions GPS, nuages de points issus d'un scanner de l'environnement, etc.).
- **La couche de fusion (ou d'intégration)** traite les données brutes et les intègre pour produire des données plus "intelligibles" (position des autres voitures, localisation dans l'espace urbain, etc.).
- **La couche de décision** choisit les actions à effectuer en fonction des éléments perçus et des normes (sécurité, code de la route, etc.). Ce sont des modules tactiques (garant de la sécurité et qui s'intéressent à l'environnement immédiat pour prévoir le trafic) et stratégiques (contrôle la planification du trajet) (Bayouth et al., 1998).
- **La couche action** enclenche les processus choisis et fait l'interface avec la **couche de manipulation de la plateforme** qui comprend les éléments responsables du déplacement effectif (freinage, accélération, direction, etc.).

La figure I.7 présente un exemple simplifié d'une architecture en couche appliquée à une situation concrète.

La littérature présente souvent des variantes en trois ou quatre couches (Behere & Törngren, 2015 ; Berger & Rumpe, 2014 ; Broggi et al., 2015 ; de Miguel et al., 2020 ; Ziegler et al., 2014), dans lesquelles le module de perception comprend les fonctions de détection de l'environnement, du véhicule dans l'espace, mais également d'intégration des différents capteurs, et les modules de décision et les actions peuvent être confondus (contrôle du comportement du véhicule dans son environnement, gestion de la trajectoire, gestion de l'énergie, gestion des erreurs, etc.).

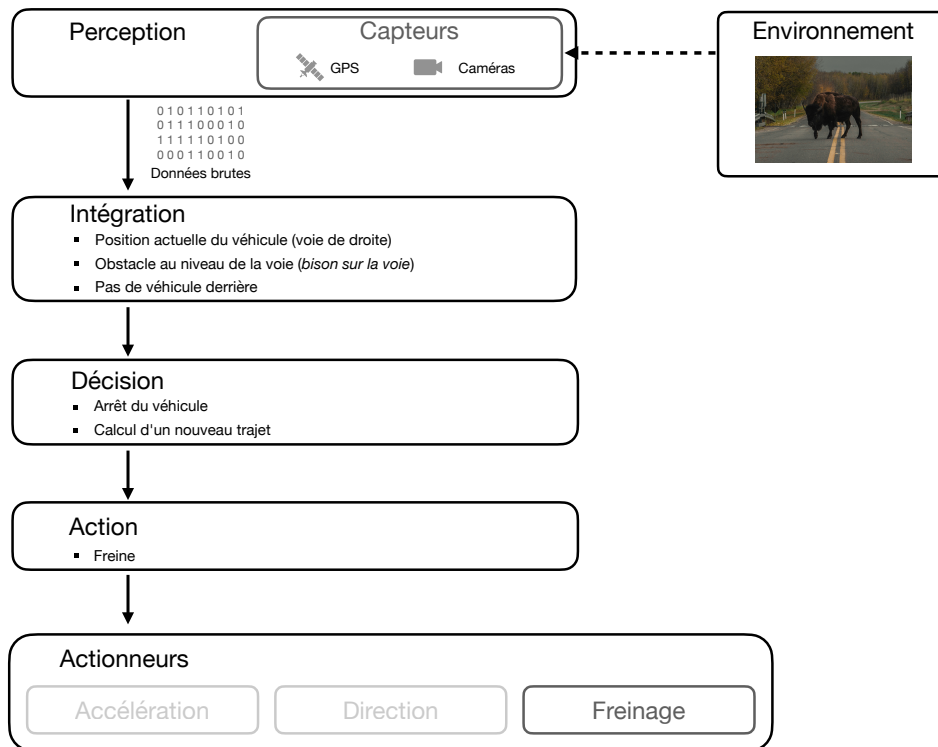


Figure I.7 – Schéma représentant un exemple de traitement de l'information dans l'architecture en couche. Les capteurs perçoivent des pixels. L'information est intégrée, un obstacle empêche le passage du véhicule. Plusieurs actions sont calculées : par mesure de sécurité, il faut s'arrêter, puis un nouveau trajet peut être calculé. L'action est mise en œuvre, on freine. Les freins sont actionnés.

Ce genre d'architecture a été pensé dès le début de la conception des véhicules autonomes, dans l'idée que chaque couche puisse être opérée à la fois par un humain et par le véhicule. Une fonctionnalité peut alors être autonome et reprise en main par le conducteur au besoin (niveau 3 d'autonomie). Ceci permet également l'évolution entre les différents niveaux de conduite autonome, la reprise en main par le conducteur, mais également la suppléance des fonctions en cas de défaut de l'une ou l'autre des composantes.

À la fin des années 2000, avec l'essor des réseaux de neurones et de l'apprentissage profond (deep learning), sont apparues des architectures alternatives. L'architecture End-to-End (Bojarski et al., 2016) propose une boîte noire, constituée d'un réseau de neurones entraîné pour recevoir le flux des caméras positionnées sur un véhicule et transmettre des commandes directement au volant. Le principe a ensuite été transposé, soit sur l'ensemble du processus de conduite (Bansal et al., 2018; Bojarski et al., 2017), soit de manière hybride, en proposant une architecture en couches dont les couches sont composées de réseaux de neurones (Codevilla et al., 2018). Les méthodes d'apprentissage par réseau de neurones sont des méthodes basées sur l'exemple : on fait en sorte de minimiser l'écart entre la sortie du réseau et la sortie attendue. Da Lio et al. (2018) ont proposé une architecture inspirée de la cognition humaine. Cette architecture combine des données réelles et simulées permettant au véhicule d'apprendre. Les situations réelles vécues sont enregistrées et utilisées pour

générer des simulations dites “rêvées”, permettant au véhicule d’explorer et d’apprendre des stratégies de conduite dans des scénarios simulés. Ces expériences “rêvées” servent ensuite à ajuster et améliorer les algorithmes de contrôle du véhicule, renforçant ainsi sa capacité à gérer des situations complexes et imprévues. L’architecture des véhicules autonomes constitue le cadre technologique. Après avoir exploré la structure interne de ces systèmes, nous allons nous intéresser à la façon dont ils interagissent avec leur environnement et produisent des comportements.

1.4 Comportement

Nous souhaitons étudier le comportement d’un véhicule autonome en situation conflictuelle, en milieu urbain.

La notion de comportement est une notion humaine. En psychologie, selon l’hypothèse cognitiviste, les comportements résultent de processus mentaux internes. Ces processus incluent la perception des stimuli, le stockage et la récupération de l’information en mémoire, et la prise de décision en fonction des informations disponibles. La façon dont ces informations sont traitées influe directement sur le comportement (Bandura, 1977b). Selon la théorie computationnaliste, qui postule que l’esprit humain fonctionne de manière similaire à un ordinateur, ces processus mentaux sont modélisés sous forme d’algorithmes qui transforment des entrées sensorielles en sorties comportementales (Fodor, 1975). Ainsi, dans ce cadre, la production d’un comportement résulte du traitement de l’information perçue de l’environnement, de la création de représentations internes (similaires à des représentations mentales), de l’anticipation des conséquences possibles des actions, et de la planification en vue d’atteindre des objectifs précis. Les architectures actuelles (voir section 1.3) suivent une approche computationnaliste. Dans ce contexte, le développement d’un véhicule autonome consiste à établir ces processus afin d’obtenir le comportement souhaité. Mais quel est le comportement souhaité pour un véhicule autonome ?

- Le comportement normal, au sens de la norme, est celui qui respecte strictement le Code de la route (Goodall, 2014);
- Le comportement moyen est celui qui imite le comportement du conducteur moyen (Bansal et al., 2017);
- Le comportement social est celui qui se soumet à la norme sociale, aux règles implicites (Feyerabend et al., 2019);
- Le comportement optimal est le meilleur comportement pour atteindre son objectif (Gonzalez et al., 2016);
- Le comportement individuel est celui respectant les préférences de son passager (Gao et al., 2019);
- Le comportement transgressif est celui qui ne respecte pas la norme (Lin, 2016).

L'humain est un agent adaptable, capable de jongler entre différents comportements. Tout l'enjeu du développement du véhicule autonome consiste à formaliser les processus permettant l'obtention de ces comportements et de déterminer les moments de leur mise en œuvre.

Pour un véhicule autonome, le comportement résulte en l'action simultanée ou non de trois actionneurs dans le temps :

- le frein ;
- l'accélérateur ;
- la direction.

En fonction des paramètres environnementaux, la façon dont ces caractéristiques opérationnelles sont mises en œuvre peut permettre de caractériser des comportements :

- Un comportement transgressif pourrait être un comportement dans lequel, l'accélération est brutale après un arrêt, le freinage est tardif et les distances de sécurité sont faibles (Taubman-Ben-Ari & Yehiel, [2012](#) ; Taubman-Ben-Ari et al., [2004](#));
- Un comportement altruiste pourrait être un comportement dans lequel les accélérations sont douces et les distances entre le véhicule et les usagers élevées afin de céder le passage plus facilement (Kaye et al., [2022](#));
- Un comportement sportif pourrait être un comportement dans lequel les accélérations sont vives, les distances de sécurité minimales, et la vitesse élevée, tout en maintenant une maîtrise parfaite du véhicule. Cette conduite privilégie la réactivité et la performance dynamique du véhicule, avec des dépassements rapides et des manœuvres serrées (Mühl et al., [2020](#)).

Les comportements présentés sont des exemples et ne sont pas exclusifs. Ils font émerger des paramètres intermédiaires permettant de les caractériser et créent une sorte de *continuum* entre des métacomportements et les paramètres opérationnels (voir figure I.8). Nous décrivons ici des comportements individuels. Dans le contexte routier urbain, il est nécessaire de s'intéresser à ce comportement dans un contexte social. Contexte dans lequel plusieurs véhicules peuvent avoir des comportements différents, pouvant entraîner un conflit.

1.5 Comportement et conflit

1.5.1 Définition

Conflit vient du latin *confligere*, signifiant lutter. Le conflit désigne une opposition, une rivalité. Il peut être relationnel (entre plusieurs individus) ou interne (Picard & Marc, [2012](#)). Pour Durkheim ([1893](#)) ou Comte ([1830](#)), le conflit est l'élément perturbateur du

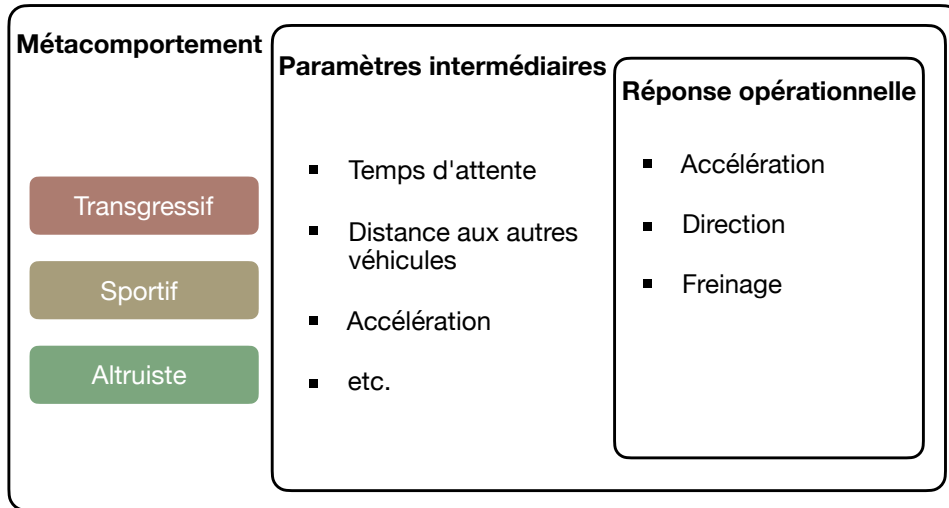


Figure I.8 – Schéma représentant le comportement d'un véhicule autonome.

système social. Alors que pour Marx et Engels (1848), Simmel (1908) ou Moscovici (1961), il est un moteur du lien social qui nécessite d'intégrer la réalité d'un système différent et fait évoluer les normes et les relations. Le conflit peut être dû à une "rivalité lorsque des acteurs sont en compétition pour atteindre le même but" (Picard & Marc, 2012). On va s'intéresser à cette rivalité dans le contexte de la conduite.

1.5.2 Situation conflictuelle

Une zone de conflit peut être décrite comme une zone dans laquelle plusieurs usagers vont avoir une trajectoire qui se croise, dans ce type de situation, l'un des usagers devra céder le passage à l'autre (Bin-Nun et al., 2022).

En général, cette situation est réglée par le respect du Code de la route. En France, la priorité prévaut en l'absence de signalisation contraire. Ainsi, le conducteur venant de la gauche doit toujours céder le passage au conducteur venant de la droite (Journal Officiel, 2001). Cette règle suppose que les deux conducteurs vont respecter le Code de la route. Si l'un des conducteurs ne respecte pas cette règle (par choix ou par négligence), le conflit apparaît, pouvant mener à une collision. Dans cet exemple, les deux usagers sont égaux dans le sens où on parle de deux conducteurs de voitures, protégés par une carrosserie. La complexité du système routier implique cependant d'autres usagers et les conflits potentiels sont multiples.

Dans le cas d'un passage piéton, le Code de la route français donne la priorité aux piétons sur et hors des passages prévus à leur intention (Journal Officiel, 2018). Même en cas de priorité pour la voiture, le conducteur doit rester vigilant. En cas de conflit de trajectoires, la collision pourrait entraîner des blessures au piéton qui ne dispose pas de la protection d'une carrosserie.

La définition proposée implique que, si aucun des usagers impliqués dans une situation conflictuelle ne cède le passage à l'autre, un accident peut survenir. C'est pourquoi nous avons décidé de nous concentrer sur les intersections, des lieux particulièrement propices aux rencontres entre usagers de la route, et donc aux situations à risque. Les

intersections représentent des points de convergence où différents types de véhicules, piétons et autres usagers se croisent, augmentant ainsi les probabilités d'incidents et donc de situations conflictuelles. Selon l'Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière (ONISR), près de 40% des accidents corporels se produisent à des intersections. Parmi les types d'intersections qui nous intéressent, on retrouve :

- les carrefours à sens giratoires ;
- les intersections avec STOP ;
- les intersections avec feux de signalisation ;
- les intersections avec passage piéton.

Nous l'avons vu, l'aspect technique de cette technologie est d'une importance capitale pour assurer sa maturité et son intégration dans la société. Cependant, il est également nécessaire de s'intéresser au facteur humain, car ce sont les usagers potentiels qui jugeront s'ils acceptent ou non de l'utiliser. L'étude de l'acceptabilité des véhicules autonomes représente donc également un enjeu sociétal majeur.

Chapitre 2

Acceptabilité

2.1 Introduction : une définition

Le dictionnaire de la langue française définit l'acceptabilité comme le caractère de ce qui est acceptable (Académie Française, 2023b), ou tolérable (Académie Française, 2023a). Accepter, c'est consentir à recevoir, admettre auprès de soi, tolérer ou accueillir avec faveur (Éditions Larousse, 2023a). Si on s'intéresse à son étymologie, le terme serait un terme du XII^e siècle, issu du latin *acceptare*, une variation de *capio*, signifiant saisir, auquel on ajoute le suffixe *ad-* pour donner *ad capio*, prendre vers. Ceci a donné le terme *accipio* signifiant accueillir, recevoir. En grec ancien, on retrouve des équivalences dans le terme *επιλαμβανω* (*epilambano*), signifiant prendre à soi (Ernout et al., 2001). Les traces du terme et de ses dérivés peuvent remonter au II^e siècle. Dans son traité de grammaire *De Ortografia*, le linguiste Flavius Caper, utiliserait *accipimus* pour évoquer la notion de recevoir volontiers (Ernout et al., 2001). L'acceptabilité désigne donc ce qui est accueilli par l'esprit et n'est pas rejeté. Accepter, c'est être en accord avec ce qui est accepté ; c'est approuver.

Acceptabilité des technologies

Nous nous intéressons, ici, à l'acceptabilité des technologies. La notion d'acceptabilité est, en général, décrite comme un *continuum*, c'est un processus temporel (Barcenilla & Bastien, 2010 ; Bauchet et al., 2020 ; Bobillier-Chaumon & Dubois, 2010). Ce processus peut être découpé en trois phases (Bel et al., 2019) que l'on peut observer sur la figure 1.9 :

- l'acceptabilité *a priori* étudie les perceptions et l'attitude initiale des individus avant la première confrontation à la technologie. Il s'agit d'une estimation de l'intention d'utilisation en amont de la confrontation à une technologie ;
- l'acceptabilité *in situ* (ou *acceptation* ou *acceptance*) s'intéresse aux premières confrontations à la technologie et s'intéresse notamment à l'expérience de l'utilisateur ;

- l'appropriation désigne la phase durant laquelle l'utilisateur a pleinement intégré l'utilisation de l'outil dans l'accomplissement de sa tâche. Durant cette phase, l'utilisateur peut développer une compréhension fine de l'outil et s'adapter à ses limites.



Figure I.9 – Schéma représentant les phases de l'acceptabilité comme un *continuum* (Bel, 2016).

2.1.1 Acceptabilité *a priori*

En psychologie, la méthode d'étude est centrée sur le comportement des utilisateurs. La théorie de l'action raisonnée (*Theory of Reasoned Action*) modélise l'intention comportementale pour déterminer le comportement réel et l'acceptabilité *a priori* (Fishbein & Ajzen, 1975). L'observation est centrée sur les performances, mais ajoute également une dimension sociale, comme le propose la théorie du comportement planifié, une extension de la théorie de l'action raisonnée (*Theory of Planned Behavior*) (Ajzen, 1991). Les modèles proposés par Bandura (1977a) et Compeau et Higgins (1995), centrés sur l'agent, prennent en compte les concepts de motivation et de jugement personnel. La théorie de la diffusion de l'innovation étudie particulièrement le processus qui permet à une innovation d'être créée, propagée, acceptée et intégrée au sein des sociétés (Rogers, 2003). Des approches centrées sur la productivité et l'utilisateur offrent une place plus importante à la facilité d'utilisation (Davis, 1985, 1989) et à l'influence sociale (Venkatesh & Davis, 2000). Le modèle UTAUT (Venkatesh et al., 2003) synthétise les paramètres issus de ces différents modèles théoriques pour proposer un nouveau modèle de l'acceptabilité des technologies. La version 2 du modèle (Venkatesh et al., 2012) propose de s'intéresser au point de vue du consommateur là où la première version s'intéresse plus particulièrement au milieu professionnel. Cette seconde version intègre au modèle les notions de prix et de plaisir à l'utilisation (voir section 2.1.1.1).

On retrouve de nombreux critères plus ou moins indépendants et similaires dans l'étude de l'acceptabilité et les modèles proposés.

2.1.1.1 Théorie unifiée de l'acceptation et de l'utilisation des technologies

Première version

En 2003, Venkatesh propose un métamodèle, le modèle UTAUT, résultat de la combinaison des huit modèles utilisés en psychologie sociale (Venkatesh et al., 2003). Le modèle reprend et combine les concepts des modèles suivants (voir tableau I.1) :

- *Theory of Reasoned Action* (TRA) ou théorie de l'action raisonnée (Fishbein & Ajzen, 1975);
- *Technology Acceptance Model* (TAM) ou modèle d'acceptation des technologies (Davis, 1985);
- *Motivational Model* (MM) ou modèle motivationnel (Davis et al., 1992);
- *Theory of Planned Behavior* (TPB) ou théorie du comportement planifié (Ajzen, 1991);
- *Combined TAM and TPB* (C-TAM-TPB) (Taylor & Todd, 1995);
- *Model of PC Utilization* (MPCU) ou modèle d'utilisation des ordinateurs personnels (Thompson et al., 1991);
- *Innovation Diffusion Theory* (IDT) ou théorie de diffusion des innovations (Rogers, 2003);
- *Social Cognitive Theory* (SCT) ou théorie sociale cognitive (Bandura, 1986).

La théorie unifiée de l'acceptation et de l'utilisation des technologies (UTAUT) est aujourd'hui l'un des modèles les plus utilisés. Le modèle est appliqué à l'origine dans les milieux professionnels, lors de l'intégration de nouveaux outils au sein d'entreprises (Venkatesh et al., 2003), dans le milieu médical (Ammenwerth, 2019; Wills et al., 2008), dans le milieu de l'éducation (Hsu, 2012; Šumak et al., 2010) et dans bien d'autres domaines. Les auteurs proposent quatre paramètres principaux qui influencent directement l'intention d'utilisation d'une technologie (voir figure I.10) :

- l'attente de performances décrit la façon dont un individu perçoit l'utilisation d'une technologie comme un élément qui va lui permettre d'accomplir sa tâche (avec performances);
- l'attente d'efforts décrit la facilité avec laquelle un individu pense qu'il utilisera la technologie;
- l'influence sociale décrit la façon dont un individu perçoit le regard des autres au regard de son utilisation de la technologie;
- les conditions facilitantes décrivent les éléments qui vont aider l'utilisateur dans son utilisation de la technologie (*exemple* : l'accès à une connexion internet de qualité est une condition facilitante à l'intégration de technologies de communications à distance dans le cadre du télétravail dans une entreprise).

Le modèle ajoute des variables modératrices qui influencent indirectement ces composantes : le genre, le sexe, l'âge, l'expérience, etc. (voir figure I.10). Ainsi, l'effet de la performance attendue est décrit comme plus fort chez les hommes jeunes. L'effort attendu et l'influence sociale sont décrits comme plus forts chez les femmes âgées présentant une expérience limitée. Les conditions facilitantes ont plus d'effet chez les personnes âgées avec une plus grande expérience (Venkatesh & Bala, 2008). Des éléments comme l'anxiété et la confiance sont souvent ajoutés au modèle en tant que variables modératrices (Hoque & Sorwar, 2017; Patil et al., 2020).

Composante UTAUT	Composante	Modèle
Performances attendues	Utilité perçue Motivation extrinsèque <i>Job fit</i> Avantage relatif Résultats attendus	TAM (Davis, 1985), TAM2 (Venkatesh & Davis, 2000), C-TAM-TPB (Taylor & Todd, 1995) MM (Davis et al., 1992) MPCU (Thompson et al., 1991) IDT (Rogers, 2003) SCT (Bandura, 1986)
Efforts attendus	Facilité d'utilisation perçue Complexité Facilité d'utilisation	TAM (Davis, 1985) MPCU (Thompson et al., 1991) IDT (Rogers, 2003)
Influence sociale	Norme subjective Facteurs sociaux Image	TRA (Fishbein & Ajzen, 1975), TAM (Davis, 1985), TPB (Ajzen, 1991), C-TAM-TPB (Taylor & Todd, 1995) MPCU (Thompson et al., 1991) IDT (Rogers, 2003)
Conditions facilitantes	Contrôle comportemental perçu Conditions facilitantes Compatibilité	TPB (Ajzen, 1991), C-TAM-TPB (Taylor & Todd, 1995) MPCU (Thompson et al., 1991) IDT (Rogers, 2003)

Tableau I.1 – Influence des huit modèles sur le modèle de Venkatesh.

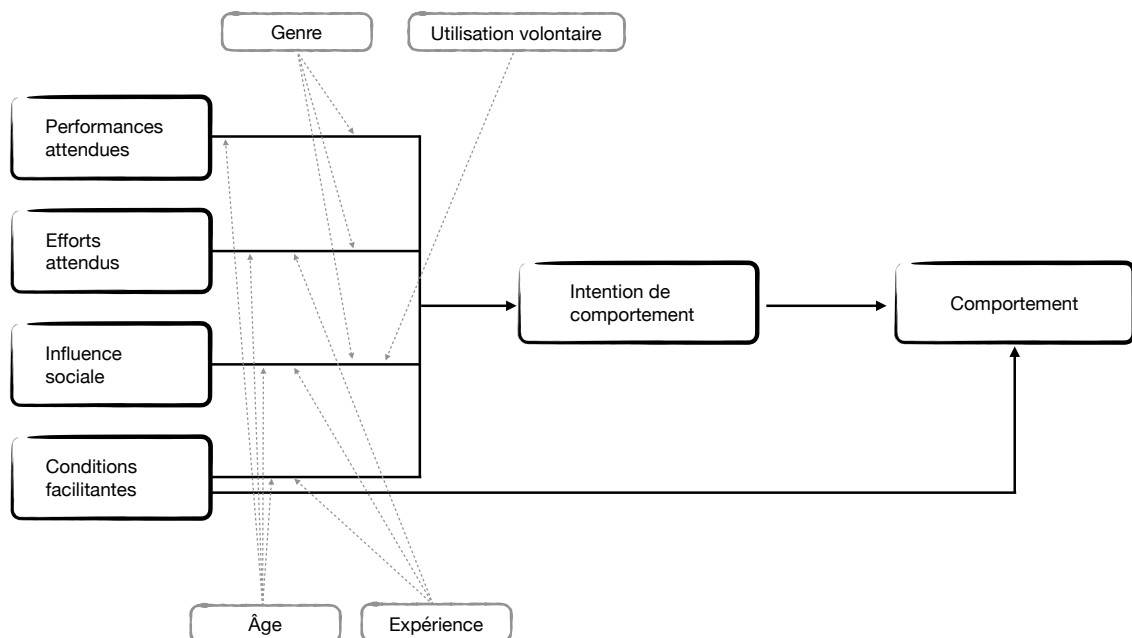


Figure I.10 – Schéma représentant le modèle UTAUT (Venkatesh et al., 2003).

Deuxième version

Le modèle UTAUT, dans sa version initiale, a été créé dans un contexte professionnel d'utilisation des technologies. L'outil était alors imposé à l'utilisateur. Le modèle initial a, par exemple, été testé dans le cadre de l'implémentation d'un nouvel outil de consultations des mails au sein d'une entreprise (Venkatesh et al., 2003).

Venkatesh et al. (2012) ont proposé une version alternative du modèle pour s'adapter à un contexte non professionnel orienté vers le consommateur. Ce modèle propose l'ajout de facteurs supplémentaires, prenant en compte le comportement du consommateur :

- le prix désigne le coût perçu de la technologie prenant en compte les frais d'achat, mais également les coûts d'entretien et d'utilisation ;
- l'habitude désigne la tendance des individus à utiliser la technologie de manière fréquente, c'est un facteur lié aux notions d'expérience et de familiarité à la technologie ;
- le plaisir dans l'utilisation de la technologie, désigne les aspects hédoniques et la satisfaction émotionnelle lors de l'utilisation de la technologie.

Ce nouveau modèle permet de mieux prendre en compte les intentions des utilisateurs dans un contexte de consommation (Venkatesh et al., 2012) (voir figure I.11).

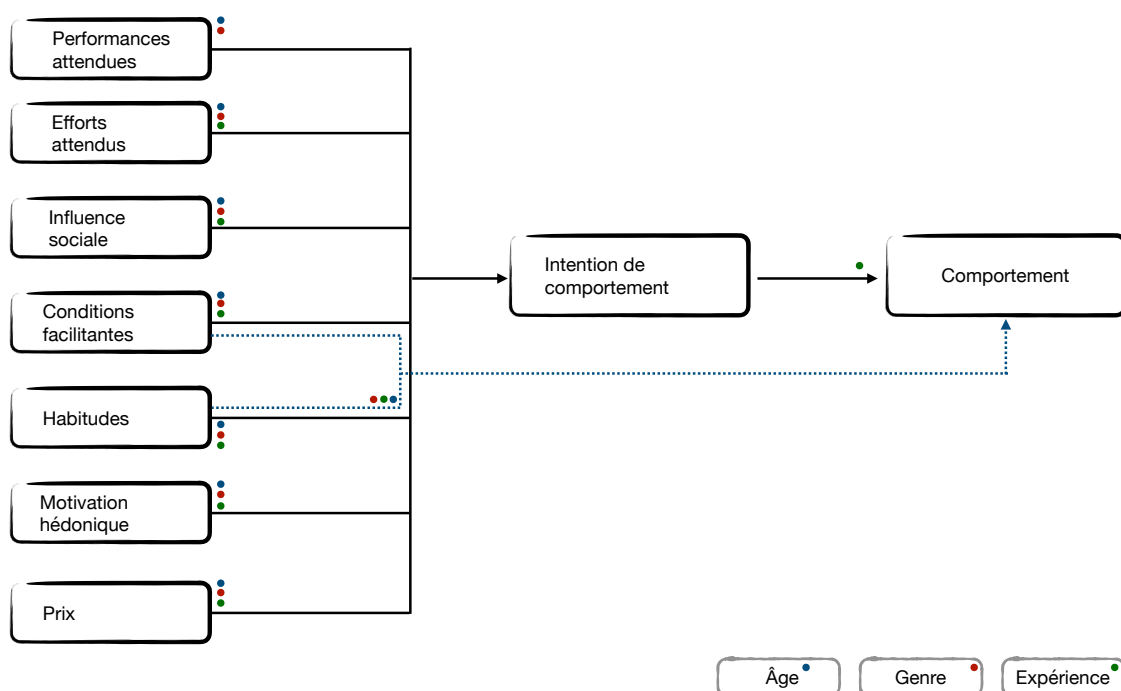


Figure I.11 – Schéma représentant le modèle UTAUT 2.

2.1.2 Acceptabilité *in situ*

Nous parlons d'acceptabilité *in situ* pour évoquer les premiers stades d'utilisation d'une technologie. L'acceptation située proposée par (Bobillier-Chaumon & Dubois, 2010)

étudie la relation entre l'humain et la technologie en condition d'usage réelle, en contexte, dans laquelle on peut étudier les qualités instrumentales et non instrumentales de l'outil (Bobillier Chaumon, 2016 ; Sagnier et al., 2019).

Les qualités instrumentales décrivent les qualités physiques de l'outil. Par exemple, en ergonomie, on s'intéresse à l'utilisabilité, qui décrit la capacité d'une technologie à être utilisée par un humain "facilement" et "efficacement" (Shackel, 2009). On peut l'interpréter comme un critère d'acceptation (Dubois & Bobillier-Chaumon, 2009) que l'on divise en 5 dimensions : efficacité, satisfaction, facilité d'apprentissage, facilité et fiabilité (Harvey et al., 2011 ; Molich & Nielsen, 1990 ; Nielsen, 1987 ; Nielsen & Molich, 1990).

Ces critères permettent d'évaluer la manière dont une technologie facilite ou complique l'interaction avec l'utilisateur. En particulier, la simplicité d'apprentissage et la capacité de l'utilisateur à utiliser rapidement un système de manière efficace sont cruciales pour l'acceptation initiale, tandis que la mémorisation et la réduction des erreurs influencent l'acceptation à long terme, assurant que l'utilisateur puisse revenir facilement à l'outil sans frustration.

La norme *ISO 9241-11 :2018* décrit un produit utilisable comme un produit qui permet à l'utilisateur d'accomplir la tâche avec efficacité (c'est-à-dire permettant d'atteindre le résultat attendu), efficience (c'est-à-dire en empruntant le meilleur chemin pour atteindre le résultat) et satisfaction dans un contexte d'utilisation spécifique (International Organization for Standardization, 2018).

Les qualités non instrumentales concernent les aspects subjectifs de l'expérience utilisateur, tels que les émotions, l'esthétique et l'engagement personnel. Ces dimensions jouent un rôle important dans l'acceptabilité de la technologie. La réponse émotionnelle suscitée par l'interaction avec l'outil peut significativement influencer l'attitude de l'utilisateur envers celui-ci. Par exemple, des émotions positives, une interface esthétique ou une expérience engageante peuvent augmenter l'acceptabilité initiale, mais aussi créer une relation plus durable entre l'utilisateur et la technologie (Thüring & Mahlke, 2007). À l'inverse, des émotions négatives, telles que la frustration ou l'anxiété, peuvent entraîner un rejet de la technologie, malgré des qualités instrumentales optimales.

Ainsi, l'expérience utilisateur (UX), qui englobe à la fois les qualités instrumentales et non instrumentales, est devenue un concept clé dans la compréhension et la promotion de l'acceptabilité des technologies. En intégrant des dimensions à la fois cognitives, émotionnelles et comportementales, l'UX offre une perspective globale pour analyser la relation entre l'utilisateur et la technologie. Le modèle de l'expérience utilisateur proposé par (Hassenzahl, 2005), analyse l'interaction entre l'utilisateur et la technologie en tenant compte de ces trois grandes dimensions.

- La dimension cognitive se concentre sur la manière dont l'utilisateur perçoit et comprend la technologie. Elle inclut des aspects comme la facilité d'apprentissage et l'utilisabilité, qui influencent directement la capacité de

l'utilisateur à prendre en main un outil. Une interface intuitive et bien conçue réduit la charge cognitive, ce qui améliore l'expérience globale de l'utilisateur dès les premières interactions.

- La dimension émotionnelle explore l'impact des émotions sur l'acceptation technologique. Une interface agréable et engageante peut provoquer des émotions positives qui renforcent la motivation à utiliser la technologie. L'esthétique, l'interaction tactile et visuelle, ainsi que le design d'interaction sont autant de facteurs qui contribuent à l'expérience émotionnelle de l'utilisateur.
- La dimension comportementale se réfère à l'usage effectif de la technologie par l'utilisateur. Elle permet de mesurer la façon dont les interactions initiales influencent l'appropriation et l'adoption à long terme. Le comportement utilisateur, en fonction de ses expériences, évolue en permanence, avec des ajustements dans la fréquence et le mode d'utilisation de la technologie.

L'intégration de ces trois dimensions dans le modèle UX permet de mieux comprendre comment une technologie est perçue, vécue et utilisée par les individus dans leur contexte quotidien.

2.1.3 Appropriation

Une technologie utilisée est une technologie qui a été adoptée (Barcenilla & Bastien, 2010). Bauchet et al. (2020) proposent de dissocier adoption et appropriation. L'adoption désignant une phase *in situ*, d'utilisation de la technologie en contexte réel et l'appropriation une utilisation de la technologie appliquée à d'autres milieux que ceux prévus initialement (Dubois & Bobillier-Chaumon, 2009 ; Rabardel, 1995). Ce modèle met en évidence les interactions dynamiques au sein du continuum après la confrontation initiale avec la technologie. Des boucles de rétroaction se forment, montrant comment l'expérience d'utilisation peut progressivement influencer et ajuster les attitudes et comportements vis-à-vis de la technologie. Ainsi, même après l'adoption et l'appropriation, l'acceptabilité reste un processus évolutif. Les utilisateurs réévaluent et redéfinissent leur relation à l'outil à la lumière de leurs expériences et de l'évolution de leurs besoins (voir figure I.12).

Dans le cadre de l'étude des véhicules autonomes de niveau 5, nous nous concentrerons sur l'étude *a priori* de l'acceptabilité, ainsi que sur l'analyse *in situ*, via la simulation, des premières interactions avec cette technologie.

Dans ce manuscrit, nous parlerons d'acceptabilité *in situ* pour décrire les premières confrontations à la technologie en situations simulées.

De nombreuses modélisations de l'acceptabilité des technologies ont été proposées selon différents points de vue : en ergonomie (utilisabilité, expérience utilisateur), en sociologie, en psychologie, etc. Ces modèles sont représentés sur la figure I.13, dans l'ordre chronologique de publication, et un code coloré indique si le modèle vise à étudier l'acceptabilité *a priori*, *in situ* ou *a posteriori*.

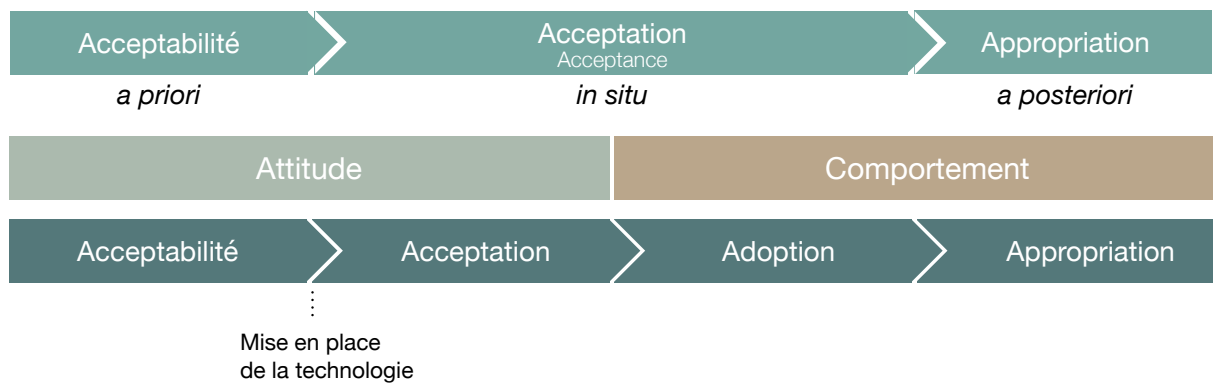


Figure I.12 – Schéma représentant le modèle 4A (Bauchet et al., 2020)

Modèle d'acceptabilité a priori

Modèle d'acceptabilité in situ

Modèle d'appropriation

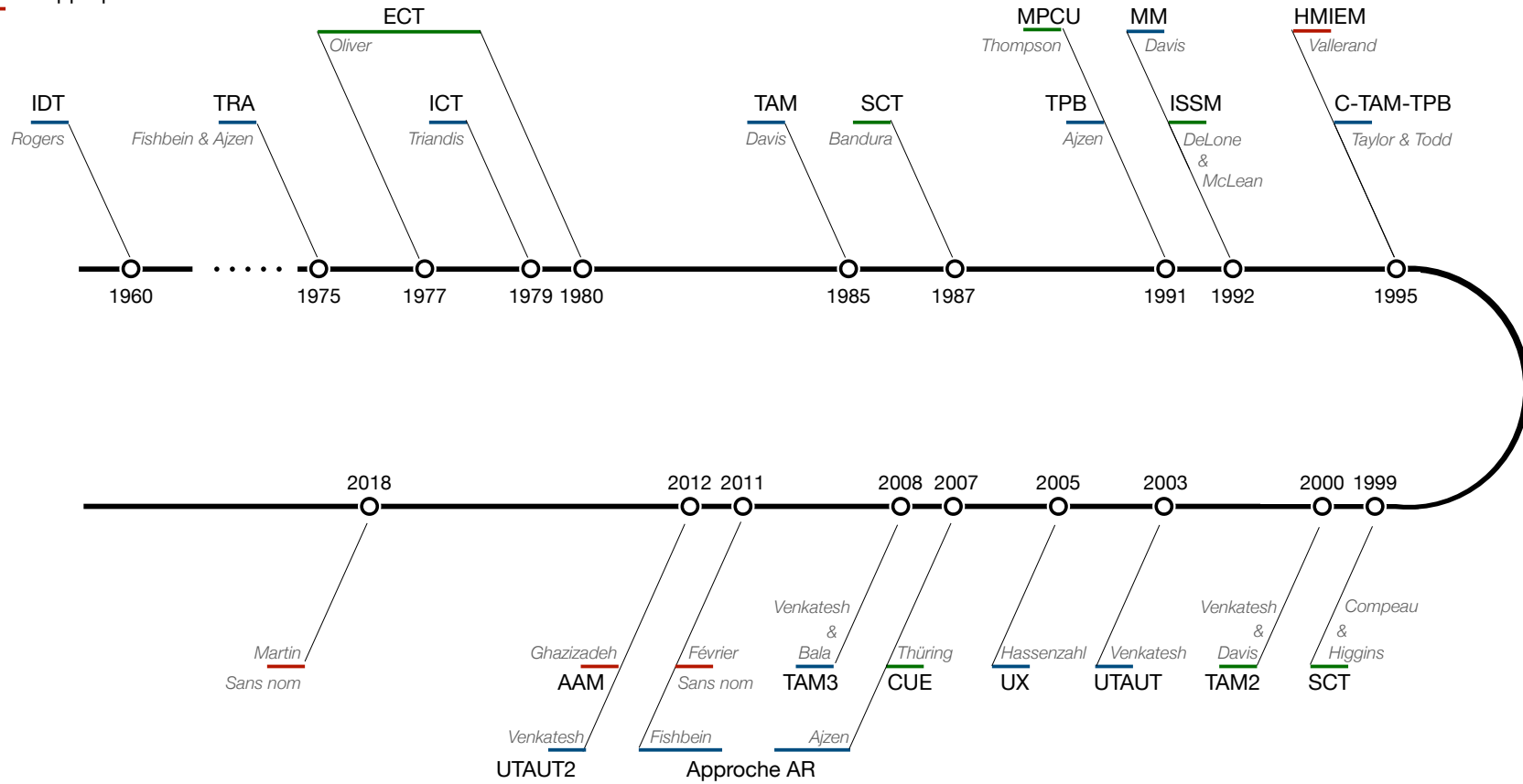


Figure I.13 – Schéma représentant une frise chronologique des différents modèles d'acceptabilité.

2.2 Confiance : concept influant dans les théories de l'acceptabilité

La notion de confiance est un concept qui revient souvent au côté de l'acceptabilité. Certaines variantes des modèles théoriques décrits plus haut intègrent la confiance comme un facteur influant sur l'intention d'utilisation.

Dans son sens étymologique, le terme confiance vient du latin *cum*, "avec" et *fidere*, "se fier à", la confiance implique que l'on se fie à quelqu'un, en s'abandonnant à sa bonne foi (Marzano, 2010). Cette définition marque ainsi une sorte de dépendance à l'autre. Mayer (1995) définit la confiance comme *"la volonté d'être vulnérable aux actions d'autrui sur la base de l'attente que l'autre partie effectue une action importante pour le donneur de confiance, indépendamment de la capacité à surveiller ou à contrôler cette autre partie."*

Lee (2004) définit la confiance comme *"une attitude selon laquelle un agent aidera à atteindre les objectifs d'un individu dans une situation caractérisée par l'incertitude et la vulnérabilité"*.

Lorsque l'on parle de confiance entre un humain et une machine, l'absence de confiance (méfiance) peut entraîner une sous-utilisation (voire une non-utilisation) d'un système et une mauvaise confiance peut entraîner une confiance excessive, voire des erreurs (Stanton & Young, 2000). À l'instar de l'acceptabilité, la confiance présente un aspect dynamique. La confiance *a priori* influe sur la confiance qui évolue durant l'usage (Cohen et al., 1998; Hoff & Bashir, 2015; Lee & See, 2004). La confiance joue un rôle important dans le maintien de l'acceptation (Choi & Ji, 2015).

La confiance est un concept complètement entremêlé à l'acceptabilité, souvent intégré comme un modérateur de l'acceptabilité dans les modèles théoriques (Choi & Ji, 2015; Ghazizadeh et al., 2012). Le modèle d'acceptation de l'automatisation (AAM) offre un double point de vue, intégrant les observations effectuées dans la recherche sur l'acceptabilité des systèmes d'information (TAM), mais également dans la recherche sur l'acceptabilité en ingénierie cognitive en intégrant les notions d'adéquation à la tâche et de "human- technology coagency" (Ghazizadeh et al., 2012). Dans ce modèle, la confiance est intégrée comme un précurseur de l'acceptation des technologies. À l'inverse, d'autres modèles ajoutent la confiance comme un paramètre qui influence directement l'utilisation (Choi & Ji, 2015).

La confiance a également été étudiée dans le cadre du modèle UTAUT, avec plusieurs extensions intégrant cette variable pour mieux comprendre l'acceptabilité technologique. Par exemple, Alharbi (2014) a ajouté la dimension de la confiance dans son étude sur l'acceptabilité des technologies de partage de fichiers en ligne. De même, Cody-Allen et Kishore (2006) ont inclus la confiance pour examiner l'adoption des technologies de *e-business*. Ces adaptations du modèle soulignent l'importance de la confiance en tant que facteur déterminant dans l'acceptation et l'adoption de nouvelles technologies.

2.3 Comment mesurer l'acceptabilité

2.3.1 Mesure subjective par questionnaire

L'acceptabilité est le plus souvent mesurée à l'aide d'un questionnaire subjectif après une première confrontation à la technologie, qu'elle soit réelle, simulée ou décrite (Venkatesh et al., 2003, 2012). Le questionnaire subjectif permet de recueillir des opinions, des sentiments ou des perceptions sur un sujet, à l'aide d'échelles de Likert ou de questions ouvertes. Il fait opposition au questionnaire objectif conçu pour recueillir des données factuelles, ne laissant pas de place à l'interprétation ou aux opinions des répondants. On trouve également des mesures simplifiées en un seul item, permettant d'obtenir un avis plus global de l'évaluation de l'outil (Christophersen & Konradt, 2011). En proposant son modèle d'acceptabilité, Venkatesh et al. (2012) a également proposé un questionnaire composé d'une série de questions évaluant les différentes composantes du modèle (voir tableau I.2).

Question	Effet mesuré
I find ... useful in my daily life. Je trouve ... utile dans mon quotidien.	Attentes de performances
Using ... helps me accomplish things more quickly. Utiliser ... m'aide à accomplir les choses plus rapidement.	Attentes de performances
Using ... increases my productivity. Utiliser ... augmente ma productivité.	Attentes de performances
Learning how to ... is easy for me. Apprendre à utiliser ... est facile pour moi.	Attentes d'efforts
My interaction with ... is clear and understandable. Mon interaction avec ... est claire et compréhensible.	Attentes d'efforts
I find ... easy to use. Je trouve ... facile à utiliser.	Attentes d'efforts
It is easy for me to become skillful at using ... Il est facile pour moi de devenir compétent à utiliser ...	Attentes d'efforts
People who are important to me think that I should use ... Les personnes qui sont importantes pour moi pensent que je devrais utiliser ...	Influence sociale
People who influence my behavior think that I should use ... Les personnes qui influencent mon comportement pensent que je devrais utiliser ...	Influence sociale
People whose opinions that I value prefer that I use ... Les personnes dont j'apprécie les opinions préfèrent que j'utilise ...	Influence sociale
I have the resources necessary to use J'ai les ressources nécessaires pour utiliser	Conditions facilitantes
I have the knowledge necessary to use J'ai les connaissances nécessaires pour utiliser	Conditions facilitantes
... is compatible with other technologies I use. ... est compatible avec les autres technologies que j'utilise.	Conditions facilitantes

Question	Effet mesuré
I can get help from others when I have difficulties using Je peux obtenir de l'aide lorsque j'ai des difficultés à utiliser	Conditions facilitantes
Using ... is fun. Utiliser ... est amusant.	Motivation hédonique
Using ... is enjoyable. Utiliser ... est agréable.	Motivation hédonique
Using ... is very entertaining. Utiliser ... est très divertissant.	Motivation hédonique
... is reasonably priced. ... est à un prix raisonnable.	Valeur (monétaire)
... is a good value for the money. ... offre un bon rapport qualité-prix.	Valeur (monétaire)
At the current price, ... provides a good value. Au prix actuel, ... offre une bonne valeur.	Valeur (monétaire)
The use of ... has become a habit for me. L'utilisation de ... est devenue une habitude pour moi.	Habitudes
I am addicted to using ... Je suis accro à l'utilisation de	Habitudes
I must use ... Je dois utiliser	Habitudes
I intend to continue using ... in the future. J'ai l'intention de continuer à utiliser ... à l'avenir.	Intention comportementale
I will always try to use ... in my daily life. Je vais toujours essayer d'utiliser ... dans ma vie quotidienne.	Intention comportementale
I plan to continue to use ... frequently. Je prévois de continuer à utiliser ... fréquemment.	Intention comportementale
Please choose your usage frequency for each of the following... Veuillez choisir votre fréquence d'utilisation pour chacun des éléments suivants...	Usage

Tableau I.2 – Tableau reprenant la liste des questions utilisées dans le cadre de l'évaluation de l'acceptabilité *a priori* des technologies.

2.3.2 Mesure subjective par entretien et focus group

Il est souvent intéressant d'associer les méthodes d'analyses quantitatives à des méthodes qualitatives. On peut ainsi aider les participants à expliciter et éclairer ce qui est implicite. Des méthodes comme l'entretien d'explicitation font revivre la situation au participant (Lallemand et al., 2018; Vermersch, 1991). D'autres méthodes comme l'entretien d'autoconfrontation confrontent à nouveau le participant à la situation vécue, sous la forme de vidéos le plus souvent (Lallemand et al., 2018; Mollo & Falzon, 2004). Davis (1989) a conduit des entretiens dans la conception de son échelle de mesure de l'acceptabilité. Venkatesh et al. (2013) propose d'enrichir la compréhension des concepts étudiés à l'aide de méthodes mixtes, mêlant des moyens d'études quantitatifs et qualitatifs. La méthode du focus group consiste à recueillir des données

qualitatives lors d'un échange en groupe (Krueger & Casey, 2015; Lallemand et al., 2018). Cette méthode permet d'étudier le ressenti des participants dans un contexte social, en interaction avec les autres. La méthodologie a été étudiée dans le contexte de l'acceptabilité, par exemple Dahlberg et al. (2003) l'ont utilisée en complément de mesures quantitatives. Ces méthodes permettent de nuancer les résultats quantitatifs (Felber et al., 2024).

2.3.3 Mesures diverses

Nous ne présenterons pas ici une liste exhaustive des méthodes permettant de mesurer l'acceptabilité, mais il est important de souligner qu'il est possible d'évaluer séparément les différentes composantes incluses dans les modèles d'acceptabilité. La **composante émotionnelle** du modèle UTAUT, par exemple, peut être mesurée à l'aide de données physiologiques. Il est bien établi que des indicateurs tels que l'activité pupillaire ou la fréquence cardiaque sont de bons marqueurs des variations émotionnelles chez un individu (Kolb, 2019; Mathôt, 2018). Ces mesures permettent d'évaluer objectivement l'impact émotionnel de l'interaction avec une technologie. En **sciences économiques et/ou en information-communication**, une méthode d'analyse des réseaux sociaux consiste à observer les interactions entre consommateurs pour anticiper leur acceptabilité d'une technologie. Par exemple, Kohl et al. (2018) ont étudié l'acceptation des technologies de conduite autonome en analysant les messages échangés sur Twitter. Leurs résultats, obtenus via cette écoute sociale, ont montré une convergence avec les conclusions d'études par questionnaires, illustrant ainsi l'intérêt d'utiliser ces méthodes complémentaires.

De nombreux domaines se sont intéressés à l'acceptabilité des technologies. Dans la suite de ce manuscrit, nous allons nous concentrer sur l'étude de l'acceptabilité spécifiquement dans le contexte des véhicules autonomes de niveau 5.

Acceptabilité du comportement des véhicules autonomes

3.1 Introduction

L'automatisation du véhicule autonome est étudiée depuis les premières apparitions des systèmes d'aide à la conduite. L'automatisation complète et l'autonomisation vont probablement induire des changements profonds des méthodes de déplacement dans nos sociétés. C'est pourquoi l'acceptabilité des véhicules autonomes est l'un des enjeux majeurs dans la conception des algorithmes qui régiront le comportement de cette technologie. En s'intéressant à l'acceptabilité des véhicules autonomes, on s'intéresse plus précisément aux leviers qui vont influencer sur la réussite ou l'échec de l'introduction d'un nouveau système automatisé sur les routes. Adell (2010) définit l'acceptabilité d'un conducteur comme le *“degré avec lequel un individu a l'intention d'utiliser un système et, quand c'est possible, intègre le système dans sa conduite.”*

L'acceptabilité est à étudier différemment en fonction du niveau d'autonomie et des différences d'interaction entre l'Humain et la Machine. La transition du véhicule “classique” (niveau 0) vers le véhicule complètement autonome (niveaux 4 et 5) va engendrer une transformation des occupants de conducteur à superviseur puis passager. L'utilisateur du véhicule devient un usager. Dans ce contexte automobile, l'acceptabilité peut-être modulée par des déterminants propres à l'utilisateur, propres au véhicule ou bien contextuels (Mara & Meyer, 2022).

La question de l'intégration du véhicule autonome dans la société se pose déjà. Plusieurs études statistiques ont été réalisées, en France, sur la perception des véhicules autonomes. Ces études montrent notamment l'importance de l'indépendance, la sécurité et le temps de trajet dans les déplacements quotidiens. 38% des Français déclarent être réticents à déléguer la responsabilité à une voiture autonome, ce chiffre évoluant à la hausse entre les deux études (Gomant & Moizo, 2018; Lévy, 2019).

Nous allons d'abord nous intéresser à l'acceptabilité étudiée *a priori*, c'est-à-dire avant

toute première confrontation aux véhicules autonomes de niveau 5. Nous examinerons comment les modèles d'acceptabilité ont été adaptés pour étudier cette technologie spécifique. Ensuite, nous nous pencherons sur l'acceptabilité *in situ*, malgré le fait que les véhicules totalement autonomes ne soient pas encore entièrement matures ni commercialisés. Nous explorerons les méthodes et les résultats préliminaires de ces études.

3.2 Acceptabilité *a priori* des véhicules autonomes

Lorsqu'on s'intéresse à l'acceptabilité *a priori*, c'est-à-dire, en amont de la confrontation à la technologie, de nombreuses études ont adapté les modèles théoriques d'acceptabilité pour étudier l'acceptabilité des véhicules autonomes. Dans ces études, différents facteurs, pouvant éventuellement influencer sur l'acceptabilité des véhicules autonomes, sont mis en évidence.

De très nombreuses études ont été effectuées sur les premiers niveaux d'autonomie de la conduite. Les modèles de Stanton et Young (2000) et de Heikoop et al. (2016), s'intéressent notamment au niveau 3 et proposent des construits psychologiques influençant le comportement des conducteurs dans le cadre de la conduite autonome. Le modèle de Stanton et Young se concentre sur des effets à court terme, en identifiant huit facteurs tels que la conscience de la situation, la charge mentale, le modèle mental, le feedback, le locus of control, le stress, les exigences de la tâche et la confiance. Ces éléments décrivent principalement la manière dont un conducteur interagit avec le véhicule autonome et gère l'effort cognitif ainsi que son niveau de contrôle perçu. Heikoop (2016) complète ce modèle en ajoutant des facteurs à long terme comme l'attention, la vigilance, la satisfaction, l'acceptation, l'éveil (arousal), la complaisance et la fatigue. Ces éléments permettent d'analyser les effets prolongés de l'usage des véhicules autonomes, en intégrant la satisfaction et la tendance à accepter ou à trop faire confiance à la technologie. Ensemble, ces modèles montrent l'importance de comprendre les effets psychologiques immédiats et à long terme dans l'acceptabilité et l'adoption des véhicules autonomes. Dans ce contexte, ils se relient au modèle UTAUT en soulignant la façon dont certains facteurs influencent l'intention d'utilisation et l'usage effectif, notamment par le biais de la confiance, de l'acceptation et des attentes de performance.

Actuellement, il existe de très nombreuses études sur l'acceptabilité du véhicule autonome (Bel et al., 2019 ; Kaye et al., 2022 ; Lemonnier et al., 2020). Un grand nombre d'études concernent les niveaux 0 à 3. Sans en faire une liste exhaustive, ces études s'intéressent à l'acceptabilité *a priori* dans un contexte où le conducteur doit superviser la conduite et doit pouvoir la reprendre en main à tout moment dans le niveau 3. Le tableau 1.3 synthétise une partie des paramètres étudiés et des principaux résultats observés.

Concept	Description	Références
Attentes de performances	Si les attentes ne correspondent pas à la réalité, l'acceptabilité diminue.	(Nees, 2016 ; Osswald et al., 2012)
Confiance en la technologie	La confiance en la technologie influe positivement sur l'acceptabilité.	(Bel & Kraiem, 2018 ; Cegarra et al., 2023 ; Dolins et al., 2021 ; Kaur & Rampersad, 2018 ; Nordhoff et al., 2018a ; Payre, 2015 ; Rödel et al., 2014 ; Souche et al., 2023 ; Souders & Charness, 2016 ; Stanton & Young, 2000 ; Verberne et al., 2015 ; Waytz et al., 2014)
Risque perçu et tolérance au risque	L'absence de conducteur rend le comportement moins prévisible et augmente le sentiment de danger, notamment dans des situations d'urgence.	(Dolins et al., 2021 ; Gentiletti & Cahour, 2024 ; Hengstler et al., 2016 ; König & Neumayr, 2017 ; Rödel et al., 2014 ; Souche et al., 2023)
Sécurité perçue	La sécurité perçue est un frein majeur, les passagers doutent que le véhicule puisse les garder en sécurité, quelles que soient les circonstances.	(Gentiletti & Cahour, 2024 ; Luger-Bazinger et al., 2021 ; Nordhoff et al., 2018a)
Bénéfices potentiels	La possibilité de faire autre chose, les commodités offertes, l'efficacité, l'économie de temps.	(König & Neumayr, 2017 ; Kyriakidis et al., 2015)
Possibilité de reprise en main	Corrélation positive entre le niveau de délégation et la confiance, mais volonté de garder un certain niveau de contrôle, d'autant plus en milieu urbain.	(Bel & Kraiem, 2018 ; König & Neumayr, 2017)
Influence sociale	L'influence sociale peut jouer un rôle dans l'acceptabilité des véhicules autonomes.	(Osswald et al., 2012)
Conditions facilitantes	Parmi les conditions facilitantes on retrouve la technophilie, l'adaptation des réglementations et des infrastructures.	(Bansal & Kockelman, 2017 ; Bel & Kraiem, 2018 ; Osswald et al., 2012)
Déterminants démographiques	Les personnes plus âgées, les femmes et les personnes vivant en milieu rural sont plus réticentes à l'utilisation des véhicules autonomes.	(König & Neumayr, 2017)
Éthique et responsabilité	Il y a une approbation générale dans l'idée de véhicules utilitaires qui minimisent les dommages, même au détriment de leurs passagers, mais peu de personnes sont enclines à monter dans de tels véhicules ou à soutenir des réglementations imposant ces décisions éthiques.	(Bonneton et al., 2016 ; Greene, 2016)
Confort	Le style de conduite d'un véhicule autonome doit être perçu comme confortable.	(Bellem et al., 2018 ; Dettmann et al., 2021)

Concept	Description	Références
Coût	Le coût variera en fonction d'une intégration sous la forme d'un véhicule partagé (transport en commun) ou d'un véhicule personnel et représente un frein à l'introduction de la technologie.	(Fagnant & Kockelman, 2015)

Tableau I.3 – Principaux déterminants de l'acceptabilité des véhicules autonomes.

Parmi les leviers, la confiance en la technologie, les bénéfices perçus (comme la possibilité de faire autre chose pendant le trajet et l'efficacité), l'influence sociale, les conditions facilitantes (telles que la technophilie et les infrastructures adaptées), ainsi qu'une expérience utilisateur positive et un confort élevé jouent un rôle crucial. En revanche, des freins subsistent, notamment lorsque les attentes de performance ne sont pas satisfaites, les préoccupations liées aux risques perçus (sécurité, vie privée, éthique), les réticences démographiques (particulièrement parmi les personnes plus âgées, les femmes et les habitants des zones rurales), les questions d'éthique et de responsabilité, et le coût élevé des véhicules autonomes.

On trouve un petit nombre d'études qui se sont intéressées aux niveaux d'autonomie les plus élevés (niveau 4 et 5). Ces études s'intéressent aux problématiques sociales et éthiques que pourront apporter ces systèmes (Bonnefon et al., 2016). La plupart étudient le véhicule autonome à travers le prisme d'un modèle d'acceptabilité *a priori* et étudient les intentions d'usages des futurs consommateurs (König & Neumayr, 2017; Kyriakidis et al., 2015; Nordhoff et al., 2018a; Payre, 2015).

Dans une revue de la littérature, Lemonnier et al. (2020) recensent les études qui se sont intéressées aux déterminants de l'acceptabilité et/ou de l'intention d'usage des véhicules autonomes. Cette étude prend en compte les niveaux d'automatisation ainsi que la méthode d'analyse utilisée. Sur les 113 références étudiées, seulement 26 s'intéressent au niveau 5 d'autonomie et au regard de notre problématique, nous allons nous intéresser sur celles-ci. Parmi ces 26 études :

- 25 mesurent l'acceptabilité et/ou de l'intention d'usage via un questionnaire, 2 via un entretien, 1 via un focus group, 2 via une expérimentation (le total est supérieur à 26, car certaines études combinent plusieurs méthodes);
- 22 concernent les véhicules individuels et 6 concernent une navette;
- 12 études présentent le véhicule automatisé via une description, 2 via la simulation, 4 avec une expérience réelle (pour 3 cas il s'agit de navettes et pour 1 cas d'une voiture) et 8 sans présentation de ce qu'est un véhicule automatisé.

Ainsi, dans une majorité des études, le véhicule autonome de niveau 5 est présenté aux participants à travers une description textuelle et/ou imagée de ce qu'est un véhicule autonome de niveau 5 (Acheampong & Cugurullo, 2019; Bazilinskyy & de Winter, 2015; Koul & Eydgahi, 2019; Lavieri et al., 2017; Ledger et al., 2018; Leicht et al., 2018; Liu et al., 2019d, 2019a, 2019c, 2019b; Sanbonmatsu et al., 2018; Wicki & Bernauer, 2018).

Dans certaines études, seul le terme véhicule automatisé (sans explication) est utilisé pour permettre aux participants de savoir ce dont on parle (Brell et al., 2019 ; Deb et al., 2017 ; Fortunati et al., 2019 ; Hulse et al., 2018 ; Hyde et al., 2017 ; Kaur & Rampersad, 2018 ; Lee & Kolodge, 2019 ; Shin et al., 2019).

L'ensemble de ces études se focalise sur l'acceptabilité *a priori* ainsi que sur l'intention d'usage et/ou d'achat et n'aborde que rarement l'acceptabilité *in situ* et/ou l'expérience utilisateur.

Le tableau I.4 synthétise les résultats obtenus sur les effets des facteurs personnels (genre, âge et éducation) sur l'acceptabilité du véhicule selon le mode de présentation faite au sujet de ce qu'est un véhicule autonome de niveau 5 (description, réel, pas de présentation).

		Description	Réel	Pas de présentation
Genre	un effet	(Acheampong & Cugurullo, 2019 ; Lavieri et al., 2017 ; Ledger et al., 2018 ; Liu et al., 2019c ; Wicki & Bernauer, 2018)	(Piao et al., 2016)	(Deb et al., 2017 ; Fortunati et al., 2019 ; Hulse et al., 2018 ; Hyde et al., 2017)
	pas d'effet	(Bazilinskyy & de Winter, 2015 ; Koul & Eydgahi, 2019)		
Âge	un effet	(Acheampong & Cugurullo, 2019 ; Koul & Eydgahi, 2018 ; Ledger et al., 2018 ; Liu et al., 2019d ; Wicki & Bernauer, 2018)	(Piao et al., 2016)	(Deb et al., 2017 ; Fortunati et al., 2019 ; Hulse et al., 2018)
	pas d'effet	(Lavieri et al., 2017)		(Shin et al., 2019)
Éducation	un effet	(Acheampong & Cugurullo, 2019 ; Lavieri et al., 2017 ; Wicki & Bernauer, 2018)	(Piao et al., 2016)	(Fortunati et al., 2019)
	pas d'effet	(Koul & Eydgahi, 2018)		(Shin et al., 2019)

Tableau I.4 – Synthèse des résultats obtenus sur les effets des facteurs personnels (genre, âge et éducation) sur l'acceptabilité du véhicule selon le mode de présentation faite au sujet de ce qu'est un véhicule autonome de niveau 5 (description, simulation, réel, pas de présentation).

Les 3 facteurs personnels les plus étudiés dans ce contexte du véhicule autonome de niveau 5 sont le genre, l'âge et l'éducation.

Concernant le genre, la majorité des études (voir tableau I.4) montre que les hommes sont plus enclins à accepter un véhicule de niveau 5 pour un usage futur. Néanmoins, deux études (Bazilinskyy & de Winter, 2015 ; Koul & Eydgahi, 2018) ne mettent pas en évidence d'effet du genre sur le niveau d'acceptabilité.

Concernant l'âge, les résultats de la littérature sont beaucoup plus contradictoires, comme l'illustre le tableau I.4, puisque 3 profils de résultats ont été obtenus :

- Résultat 1 – les personnes les plus âgées ont une acceptabilité la plus faible ;
- Résultat 2 – les personnes les plus âgées ont une acceptabilité la plus élevée ;
- Résultat 3 – pas d'effet de l'âge sur le niveau d'acceptabilité.

Enfin, le niveau d'éducation, bien que moins étudié, il semble au regard de la littérature qu'une acceptabilité élevée est surtout observée chez les personnes ayant un niveau d'éducation élevé.

3.3 Acceptabilité *in situ* des véhicules autonomes

Étant donné la jeunesse de la technologie des véhicules autonome de niveau 5, les études se concentrent essentiellement sur les dimensions sociales et psychologiques de l'acceptabilité, telles que la confiance, les craintes et les attentes des futurs passagers vis-à-vis des véhicules entièrement autonomes. L'acceptabilité des véhicules autonomes, analysée à travers des modèles comme l'UTAUT, repose sur plusieurs notions clés : les performances attendues, l'effort attendu pour utiliser la technologie, les conditions facilitantes, l'habitude, l'influence sociale, le plaisir et la valeur (Venkatesh et al., [2012](#)).

Comme nous l'avons montré, les notions d'effort attendu et de conditions facilitantes sont étroitement liées à la manière dont le véhicule interagit avec le passager. De même, les notions d'habitude, de performances attendues et de motivation hédonique sont directement corrélées au comportement et à la façon dont le véhicule se déplace. Dans notre contexte, nous souhaitons nous intéresser plus spécifiquement au comportement du véhicule et à la manière dont il est perçu par les futurs passagers. C'est dans ce contexte que les études en simulation prennent tout leur sens. Ces outils permettent de créer une confrontation simulée entre l'utilisateur et la technologie, fournissant ainsi un premier aperçu du ressenti des futurs passagers face à des véhicules de niveau 5 dans des situations proches de la réalité. Ainsi, notre approche se situe à la croisée de l'acceptabilité *a priori* et de l'acceptabilité *in situ*. Bien qu'il s'agisse d'une expérience simulée, elle offre des perspectives précieuses sur la façon dont la technologie pourrait être perçue dans des scénarios réels, facilitant ainsi une meilleure compréhension de l'acceptation et de l'appropriation futures des véhicules autonomes. Ainsi, si l'on souhaite étudier l'acceptabilité *in situ* et donc l'acceptabilité vis-à-vis du comportement du véhicule autonome de niveau 5, les usagers du véhicule doivent pouvoir vivre une expérience en interaction avec ce type de véhicule. Pour ce faire, nous pouvons utiliser soit la simulation, soit la situation réelle (navettes autonomes connectées ou véhicules personnels). Les études en situation réelle concernent actuellement essentiellement le transport collectif, car ces navettes

connectées autonomes sont en expérimentation dans de nombreuses villes (Pigeon et al., 2021).

Dans la revue de littérature présentée par Lemonnier et al. (2020), 2 études, en niveau 5 d'autonomie, utilisent la simulation (Walker et al., 2019 ; Wintersberger et al., 2019) et 4 utilisent l'expérience réelle (Monéger et al., 2018 ; Moták et al., 2017 ; Mühl et al., 2020 ; Piao et al., 2016).

Concernant les 2 études en simulation, les protocoles sont extrêmement différents :

- Walker et al. (2019) ont placé les participants dans un simulateur de conduite et leur ont fait visionner des vidéos de véhicules autonomes. L'activité oculomotrice et la réponse électrodermale étaient mesurées durant la simulation. Il y avait 2 conditions : une condition où le véhicule conduit de façon parfaite et une condition où le véhicule conduit mal. Les résultats mettent en évidence que les mesures physiologiques peuvent être des critères intéressants pour mesurer la confiance en temps réel.
- Wintersberger et al. (2019) examinent l'impact de la réalité augmentée pour améliorer l'acceptation et la confiance des utilisateurs dans les véhicules entièrement automatisés. L'étude explore comment la réalité augmentée peut rendre les interactions avec ces véhicules plus transparentes et compréhensibles, ce qui pourrait renforcer la confiance des utilisateurs. Les auteurs concluent que la réalité augmentée a un fort potentiel pour améliorer l'expérience utilisateur en fournissant des informations en temps réel sur les actions du véhicule.

D'autres études s'intéressent à l'acceptabilité *in situ* du véhicule autonome à l'aide de simulateurs. Waytz et al. (2014) utilise la simulation sur écrans pour étudier la confiance en un véhicule autonome, montrant que le fait d'anthropomorphiser un véhicule (en lui attribuant des caractéristiques humaines : une voix, un genre, etc.) pouvait augmenter la confiance en ce véhicule. Löcken et al. (2019) ont analysé les interactions entre piétons et véhicules autonomes. Les participants de l'expérience, placés dans la peau d'un piéton en réalité virtuelle, devaient traverser devant un véhicule autonome quand ils sentaient que c'était sans danger. Ils ont pu ainsi identifier les caractéristiques permettant une expérience utilisateur de confiance et sûre, mettant en avant le fait que les interactions les plus efficaces sont celles avec lesquelles les participants sont déjà familiers (e.g. passages piétons). Zou et al. (2021) ont proposé une approche innovante combinant une méthode type "magicien d'Oz" avec la réalité virtuelle. Dans cette expérience, les participants se trouvaient à bord d'une véritable voiture conduite par un expérimentateur, tout en étant plongés dans une simulation en réalité virtuelle, leur donnant ainsi l'illusion d'être dans un véhicule autonome (magicien d'Oz). Cette configuration a permis d'obtenir une immersion plus profonde et un sentiment de réalisme accru par rapport à un simulateur statique sur écran. Cependant, les résultats obtenus sont restés globalement similaires à ceux observés dans des simulations classiques en réalité virtuelle.

Concernant les études mettant les participants en situation réelle, la majorité utilise des navettes et/ou bus autonomes (Monéger et al., 2018; Moták et al., 2017; Piao et al., 2016; Rybizki et al., 2022) et peu sur des véhicules personnels (Mühl et al., 2020).

Par exemple, Rybizki et al. (2022) ont élaboré un protocole original pour confronter les participants à la conduite réelle d'un véhicule autonome. L'étude a été réalisée avec 35 participants à travers la méthode du "magicien d'Oz", où la navette semblait autonome, mais était en fait pilotée par un conducteur caché. Ils ont utilisé le modèle UTAUT2 comme cadre de référence et ont évalué l'influence sociale, les conditions facilitantes, la motivation hédonique, et le risque perçu. Ces éléments ont été analysés pour déterminer leur impact sur l'intention d'adopter cette technologie. Les résultats ont montré une forte intention d'accepter les navettes autonomes dès le départ, et cette acceptation restait élevée même après des incidents simulés. Le facteur le plus influent sur cette acceptation était l'attente de performance, dans ce contexte, la perception que la technologie améliorerait leurs déplacements.

Mühl et al. (2020) ont mis au point une étude intéressante pour étudier l'acceptabilité du véhicule personnel. Ils ont élaboré un protocole dans un véhicule en situation réelle. Les participants ont ici le statut de passager et sont à l'arrière du véhicule. Le véhicule était utilisé une fois en mode manuel et une fois en mode autonome (décrit comme cherchant à atteindre le niveau 5 d'autonomie) sur une route publique. En raison des restrictions légales, deux ingénieurs étaient placés aux sièges du conducteur et du passager pour surveiller le véhicule et prendre le contrôle si nécessaire. Ainsi, les participants étaient assis à l'arrière, au centre, pour bénéficier de la meilleure vue possible. Le mode de conduite manuel et autonome était clairement différencié pour les passagers : ils recevaient des instructions claires au début de chaque trajet, et les mains du conducteur n'étaient pas sur le volant en mode autonome. La confiance subjective des participants et leur conductance cutanée ont été enregistrées. Puis, un second protocole en simulation a été proposé afin d'étudier le style de conduite du véhicule autonome : conduite défensive et sportive. Les résultats ont montré une tendance à une plus grande relaxation et confiance lorsque les passagers étaient conduits par un humain comparativement à un système automatisé, mais cette perception était fortement dépendante du style de conduite. Le simulateur a révélé l'impact du mode de conduite (humain vs. automatisation) et du style de conduite (défensif vs. sportif) sur l'activation physiologique, les évaluations subjectives de confiance et l'acceptation.

Conclusion

Cette partie a présenté le cadre théorique dans lequel s'inscrit cette thèse. Nous avons d'abord décrit le concept de véhicule autonome, en explorant son évolution historique et les différents niveaux d'automatisation. Ensuite, nous avons abordé la notion d'acceptabilité des technologies, en mettant en lumière les modèles théoriques et les facteurs influençant l'acceptation des nouvelles technologies. Enfin, nous nous sommes intéressés aux véhicules autonomes à travers le prisme de l'acceptabilité, en discutant des études réalisées et des méthodes utilisées pour évaluer cette acceptabilité.

Ce qu'il faut retenir

- Les fonctionnalités d'automatisation de niveau 5 d'un véhicule lui permettent de se déplacer sans intervention humaine, sans condition ;
- L'acceptabilité des technologies est un processus dynamique incluant l'acceptabilité *a priori*, l'acceptabilité *in situ* et l'acceptabilité *a posteriori* (appropriation) ;
- Le modèle UTAUT2 décrit l'acceptabilité *a priori* en étudiant l'influence des performances attendues, de l'effort attendu, de l'influence sociale, des conditions facilitantes, d'habitude, de motivation hédonique et de prix pour estimer l'intention d'utilisation de la technologie ;
- Les études en simulation jouent un rôle crucial dans l'évaluation de l'acceptabilité des véhicules autonomes, en raison de la jeunesse de cette technologie ;
- Les fonctionnalités d'autonomie de niveau 5 changent le statut du conducteur qui devient passager. Il passe d'utilisateur du véhicule à usager du véhicule par rapport à la tâche de conduite ;
- Les études qui s'intéressent à l'acceptabilité des véhicules autonomes de niveau 5 s'intéressent surtout à l'acceptabilité *a priori*. Il existe peu d'études qui s'intéressent au comportement *in situ* du véhicule autonome.

Identification des problématiques et des objectifs de travail

4.1 Contexte

L'émergence des technologies d'automatisation de la conduite va entraîner des modifications majeures du rôle des usagers de la route. Les passagers des véhicules autonomes de niveau 5, n'étant plus conducteurs, deviendront de simples usagers. Cette transition soulève de nombreuses questions, notamment en ce qui concerne l'acceptabilité de ces nouvelles technologies. Nous nous intéressons aux véhicules disposant de capacités d'autonomie de niveau 5, conçus pour fonctionner sans intervention humaine. Et bien qu'ils ne soient pas encore une réalité, l'acceptation de ces technologies par la société est cruciale pour leur intégration réussie. Pour ce faire, une étude approfondie de l'acceptabilité du comportement du véhicule autonome de niveau 5 est nécessaire et doit inclure les perceptions et attentes des utilisateurs avant l'exposition à la technologie (*a priori*), leurs réactions et comportements pendant l'utilisation (*in situ*), et leur évaluation après l'expérience (*a posteriori*). L'objectif est de favoriser l'intégration des véhicules autonomes dans la société. En comprenant et en répondant aux préoccupations des usagers, il est possible de développer des solutions qui sont non seulement technologiquement avancées, mais aussi socialement acceptables.

4.2 Problématique et objectifs

Au regard de la littérature, nous avons identifié plusieurs problématiques auxquelles nous tenterons dans ce travail de thèse d'apporter des réponses :

- Dans le cadre d'un véhicule autonome de niveau 5, quel lien y a-t-il entre l'acceptabilité évaluée en simulation (*in situ*), et l'acceptabilité évaluée avant la confrontation (*a priori*) ?

- Quels sont les paramètres qui influencent l’acceptabilité du comportement du véhicule autonome du point de vue du passager et du véhicule ?
 - Quels sont les leviers permettant d’influer sur l’acceptabilité du comportement du véhicule autonome ?
 - Quels sont les freins à l’amélioration de l’acceptabilité du comportement du véhicule autonome ?
- Comment les constructeurs de véhicules autonomes peuvent-ils améliorer ou maintenir l’acceptabilité de leurs véhicules à travers des ajustements d’algorithmes et d’interfaces utilisateurs ?

De ces problématiques découlent les objectifs suivants :

- Identifier les paramètres influençant l’acceptabilité du comportement d’un véhicule autonome en milieu urbain, notamment dans des situations potentiellement conflictuelles ;
- Évaluer l’impact de ces paramètres sur l’acceptabilité du comportement du véhicule autonome ;
- Établir des règles d’acceptabilité définissant un cadre dans lequel le comportement du véhicule autonome peut être considéré comme sûr, acceptable et efficace ;
- Faire des préconisations pour les constructeurs en termes d’algorithmes et d’interface pour améliorer ou maintenir l’acceptabilité du comportement du véhicule autonome.

Pour atteindre ces objectifs, nous proposons d’utiliser une approche combinant des méthodes quantitatives et qualitatives. Nous étudierons le comportement du véhicule autonome de niveau 5 dans des situations potentiellement conflictuelles en milieu urbain à l’aide d’études en simulations.

4.3 Organisation de la thèse

Cette thèse s’organise en 3 parties décrites ci-dessous et schématisées sur la figure I.14 :

1. **La partie théorique** (partie I), dans laquelle nous décrivons le cadre dans lequel s’inscrit la thèse. Y sont présentés les concepts de la conduite autonome (chapitre 1) et de l’acceptabilité (chapitre 2) nécessaire à l’étude de l’acceptabilité du comportement d’un véhicule autonome (chapitre 3) ;
2. **La partie empirique** (partie II) est divisée en trois chapitres :
 - Chapitre 1 : **Méthodologie**, dans lequel nous présentons la méthodologie expérimentale mise en place pour étudier l’acceptabilité ;
 - Chapitre 2 : **Caractérisation de l’acceptabilité *in situ***, dans lequel nous présentons les résultats des expérimentations que nous avons menées :

- Section 2.1 : **Étude des effets du mode de conduite sur l'acceptabilité *in situ***. Cette section présente les résultats d'une première expérimentation conçue pour étudier l'effet de modes de conduite plus ou moins transgressif sur l'acceptabilité *in situ* des passagers en simulateur ;
 - Section 2.2 : **Étude de certains paramètres liés au comportement du véhicule**. Cette section présente les résultats d'une deuxième expérimentation visant à étudier l'impact *a priori* d'un effet d'amorçage sur l'acceptabilité, ainsi que l'effet des variations *in situ* de paramètres de conduite du véhicule (temps d'attente, vitesse) ;
 - Chapitre 3 : **Ingénierie de l'acceptabilité *in situ***
 - Section 3.1 : **Interfaces Humain-Machine**. Cette section présente les résultats de 2 protocoles expérimentaux créés dans l'objectif d'étudier la façon dont on pourrait influencer sur l'acceptabilité d'un comportement non acceptable à l'aide d'une interface dans le véhicule ;
 - Section 3.2 : **Transfert technologique**. Sur la base des résultats présentés dans les chapitres expérimentaux, cette section propose des modèles mathématiques reliant l'acceptabilité aux paramètres de réglage des algorithmes afin de sélectionner les valeurs optimales des paramètres pour maximiser l'acceptabilité.
3. La **discussion générale** (partie III), nous permettra de discuter les résultats de cette thèse et leur implication pour la conception de véhicules autonomes acceptables.

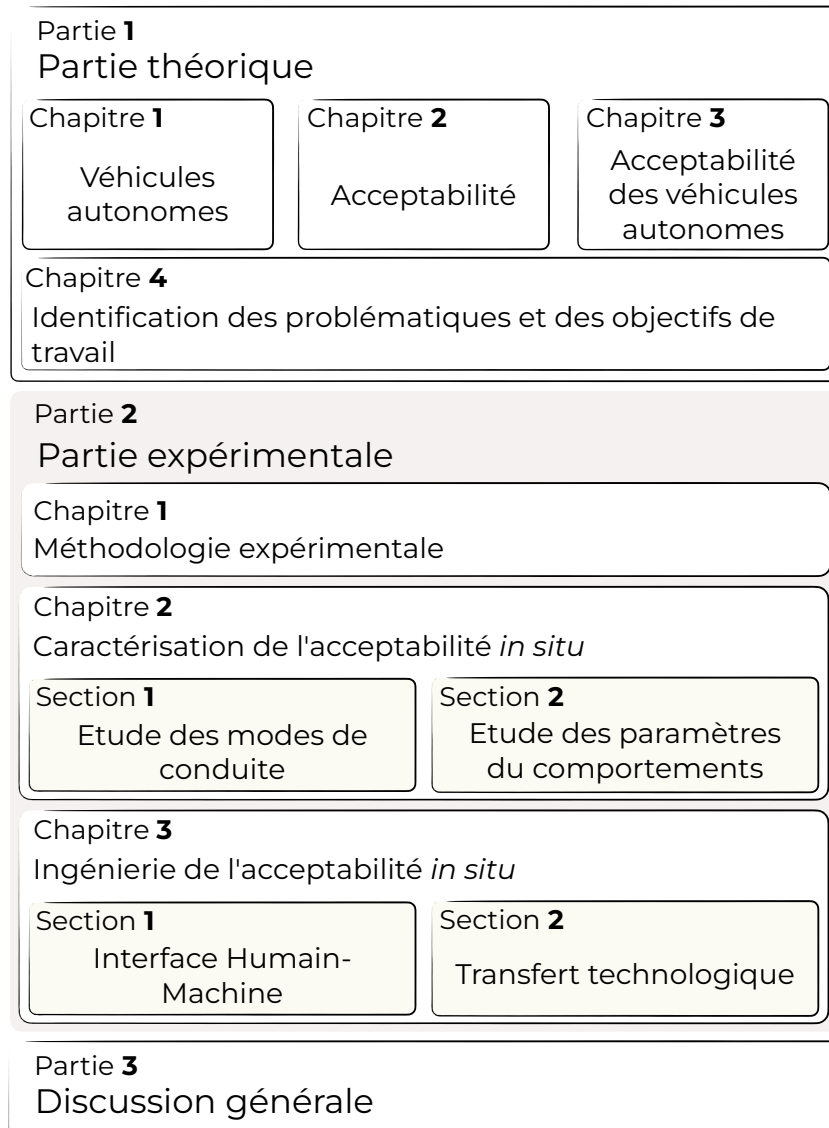


Figure I.14 – Organisation de la thèse.

Deuxième partie

Partie empirique

Méthodologie

1.1 Méthodologie

1.1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la méthodologie utilisée tout au long de la thèse pour étudier l'acceptabilité *in situ* du comportement d'un véhicule autonome du point de vue des passagers. Les expérimentations et analyses mises en place suivent une trame commune, que nous présentons ici.

1.1.2 Protocole expérimental

Nos études expérimentales de l'acceptabilité *in situ* du comportement d'un véhicule autonome ont une base commune présentée dans la figure II.15.

1.1.2.1 Formulaire de consentement libre et éclairé

Notre sujet d'étude étant l'humain, nos expérimentations consistent à récolter des informations sur les participants qui acceptent d'y prendre part. Dans ce contexte, la Déclaration universelle sur la bioéthique et les droits de l'homme (Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO), 2005) offre des préconisations qu'il nous semble fondamental de respecter. Cette déclaration traite des *“questions d'éthique posées par la médecine, les sciences de la vie et les technologies qui leur sont associées, appliquées aux êtres humains, en tenant compte de leurs dimensions sociale, juridique et environnementale. La dignité humaine, les droits de l'homme et les libertés fondamentales doivent être pleinement respectés”*.

Ainsi, la participation d'un individu à un protocole expérimental nécessite l'obtention d'un consentement :

- libre : le consentement est donné sans pression ou contrainte ;
- exprès : sa volonté est exprimée formellement ;
- éclairé : formulé de manière claire, intelligible et non ambiguë.

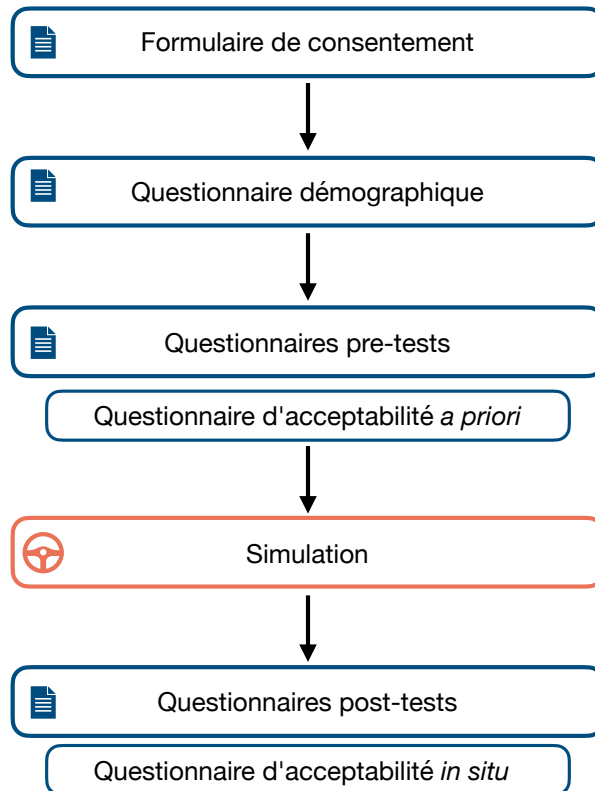


Figure II.15 – Schéma représentant la base commune de nos protocoles expérimentaux.

Le consentement peut être retiré à tout moment, avant ou pendant le protocole, sans justification et sans que cela entraîne de préjudice ou conséquence négative pour le participant. Le consentement porte sur la participation de l'individu à l'expérimentation et doit expliciter :

- les objectifs ;
- ce qui est attendu du participant ;
- les données récoltées ;
- le traitement appliqué aux données.

Au sujet des données à caractère personnel, la France a transposé le Règlement (UE) 2016/679 du Parlement européen et du Conseil du 27 avril 2016 relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données (Journal Officiel de l'Union Européenne, 2016).

La loi propose que les données récoltées doivent être :

- traitées de manière licite, loyale et transparente au regard de la personne concernée (licéité, loyauté, transparence) ;
- collectées pour des finalités déterminées, explicites et légitimes, et ne pas être traitées ultérieurement d'une manière différente.

Pour respecter ces éléments, toute participation à nos protocoles expérimentaux est soumise à :

- la présentation de l'expérimentation et des objectifs au participant ;
- la présentation des données récoltées et la façon dont elles seront utilisées ;
- la possibilité pour le participant d'interroger l'expérimentateur ;
- la lecture et la signature d'un formulaire de consentement en deux exemplaires.

Toutes les données que nous allons collecter sont donc anonymisées dès leur enregistrement. Un identifiant anonymisé est généré automatiquement et n'est associé à l'identité du participant que dans le formulaire de consentement conservé par celui-ci. Ainsi, il est impossible de relier les données à l'individu sans la participation volontaire de ce dernier.

1.1.2.2 Questionnaire démographique

Le facteur humain implique la prise en compte des variabilités interindividuelles. Il est important de sélectionner un échantillon d'individus dans une population donnée. Cet échantillon doit être le plus représentatif possible de la population étudiée pour permettre de généraliser le résultat à la population totale. C'est pourquoi, un questionnaire démographique est proposé aux participants, on les questionne sur des informations personnelles telles que l'âge et le genre (ou le sexe lorsqu'on s'intéresse aux données physiologiques). Au regard de la littérature, on peut ajouter des questions concernant des habitudes ou des caractéristiques qui pourraient influencer sur le résultat (permis de conduire, familiarité avec les véhicules autonomes, etc.).

1.1.2.3 Questionnaires prétest

Dans le contexte expérimental en psychologie cognitive, il est commun d'effectuer des mesures à l'aide de questionnaires. Ces derniers peuvent être analysés soit qualitativement, soit quantitativement lorsqu'ils fournissent un ou des scores concernant les variables étudiées.

En fonction de la question étudiée, les questionnaires peuvent être posés en prétest, avec le questionnaire démographique, ou bien après. Ils seront décrits en détail dans les parties expérimentales correspondantes.

Notre sujet d'étude portant sur l'acceptabilité, dans tous nos protocoles, nous étudions, avant la confrontation à la technologie, l'acceptabilité *a priori* des participants, avec pour cadre théorique, le modèle d'acceptabilité UTAUT2 (Venkatesh et al., 2012). À l'aide d'un questionnaire comprenant 27 questions détaillées dans la partie I, nous questionnons le participant selon 8 modalités :

- attentes de performances ;
- attentes d'efforts ;
- influence sociale ;
- conditions facilitantes ;
- motivation hédonique ;

- valeur marchande ;
- intention comportementale ;
- usage réel.

Pour l'étude du véhicule autonome de niveau 5, la technologie n'existant pas encore, nous ne mesurons pas la valeur (*Par exemple* : Les véhicules automatisés sont à un prix raisonnable.) et l'usage réel (*Par exemple* : L'utilisation d'un véhicule automatisé est devenue une habitude pour moi).

Au final, nous utilisons 23 questions traduites en français issues de Pottier (2020). Les questions sont présentées dans le tableau II.5.

Question	Effet mesuré
Un véhicule automatisé simplifiera mes déplacements quotidiens.	Attentes de performances
Un véhicule automatisé me permettra de me déplacer en toute sécurité.	Attentes de performances
Un véhicule automatisé me fera gagner du temps.	Attentes de performances
Un véhicule automatisé optimisera mes déplacements.	Attentes de performances
Il me sera facile de prendre en main un véhicule automatisé.	Attentes d'efforts
Apprendre à utiliser un véhicule automatisé sera facile pour moi.	Attentes d'efforts
J'apprendrai rapidement à utiliser un véhicule automatisé.	Attentes d'efforts
Je serai capable de maîtriser les fonctionnalités d'un véhicule automatisé.	Attentes d'efforts
Je serai capable de prendre en main un véhicule automatisé.	Auto-efficacité
J'aurai les compétences pour utiliser un véhicule automatisé.	Auto-efficacité
Je serai capable de maîtriser un véhicule automatisé.	Auto-efficacité
Utiliser un véhicule automatisé sera une bonne idée.	Attitude
Un véhicule automatisé rendra mes déplacements agréables.	Motivation hédonique
Le déplacement à bord d'un véhicule automatisé sera plaisant.	Motivation hédonique
J'aimerais utiliser un véhicule automatisé.	Motivation hédonique
Mon entourage va me pousser à utiliser un véhicule automatisé.	Influence sociale
Mes proches utiliseront un véhicule automatisé.	Influence sociale
Les politiques inciteront les gens à utiliser un véhicule automatisé.	Influence sociale
J'ai l'intention d'utiliser un véhicule automatisé dans les années à venir.	Intention comportementale
Je pense me servir d'un véhicule automatisé dans les années à venir.	Intention comportementale
Je projette d'utiliser un véhicule automatisé dans les années à venir.	Intention comportementale
Je peux être aidé si j'ai des difficultés dans mon utilisation des véhicules automatisés.	Conditions facilitantes
Les véhicules automatisés sont compatibles avec les autres technologies que j'utilise.	Conditions facilitantes

Tableau II.5 – Tableau reprenant la liste des questions utilisées dans le cadre de l'évaluation de l'acceptabilité des technologies.

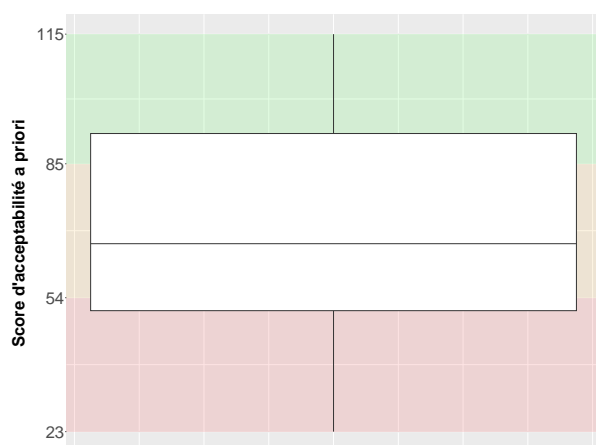
Pour chaque question, le participant répond sur une échelle de Likert allant de 1 à 5. En général, ce questionnaire est analysé selon les différentes modalités. Dans notre contexte, nous souhaitons confirmer l'effet global de l'acceptabilité *a priori* sur l'acceptabilité *in situ*. Nous avons donc choisi d'analyser le résultat du questionnaire dans son ensemble. Ce qui donne un score allant de 23 à 115. Le minimum, 23, indique que la technologie *a priori* n'est pas du tout acceptable. Le maximum, 115, indique que la technologie, *a priori* est totalement acceptable.

Pour afficher les résultats, nous avons divisé l'espace des scores en 3 parties égales (voir figures II.16a et II.16b) :

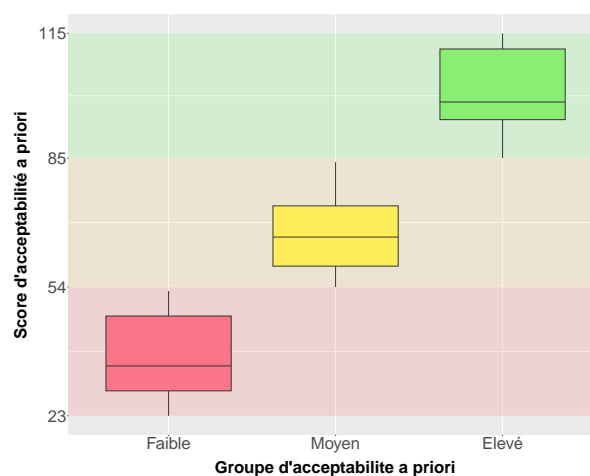
- entre 23 et 54 : on parle d'acceptabilité *a priori* faible ;
- entre 54 et 85 : on parle d'acceptabilité *a priori* moyenne ;
- entre 85 et 115 : on parle d'acceptabilité *a priori* élevée.

Dans nos analyses, cette donnée est utilisée de deux manières :

- on peut utiliser le score comme une variable quantitative (voir figure II.16a) ;
- on peut former une variable qualitative, qui qualifie le niveau d'acceptabilité dans plusieurs groupes (processus de quantification) (voir figure II.16b).



(a) Exemple de distribution du score d'acceptabilité *a priori* mesuré à l'aide du questionnaire UTAUT2.



(b) Exemple de distributions du score d'acceptabilité *a priori* mesuré à l'aide du questionnaire UTAUT2. Les réponses au questionnaire sont divisées en trois groupes (élevé, moyen, faible) en fonction du score élevé, moyen ou faible.

Figure II.16 – Exemples de distributions du score d'acceptabilité *a priori*.

1.1.2.4 Simulation

La faible maturité de la technologie impose l'utilisation de simulateurs pour analyser le point de vue de passagers de véhicules totalement autonomes. Deux options sont à notre disposition :

- simulation statique avec des écrans qui affichent un point de vue de l'intérieur du véhicule (utilisé dans l'expérimentation présentée dans la section 2.1 et les expérimentations lié aux IHM présentées dans la section 3.1);
- simulation statique à l'aide d'un casque de réalité virtuelle permettant d'immerger une personne dans un véhicule virtuel (utilisé dans l'expérimentation présentée dans la section 2.2).

1.1.2.5 Questionnaires post-test

Dans nos protocoles, nous mesurons l'acceptabilité *in situ*, pendant la confrontation à la technologie. Pour ce faire, après présentation d'une ou plusieurs situations en simulateur, on demande aux participants de remplir un questionnaire.

Deux formes de questionnaires ont été utilisées :

- une échelle de Likert unique, mesurant l'acceptabilité globale de la personne sur une échelle de 1 à 6;
- un questionnaire mesurant différentes composantes de l'acceptabilité. Les questions sont présentées dans le tableau II.6.

Questionnaire d'acceptabilité *in situ*

Question	Effet mesuré	Auteurs
Le déplacement à bord du véhicule automatisé était plaisant dans cette situation.	Attitude envers le véhicule autonome	(Venkatesh et al., 2003)
J'aimerais utiliser un véhicule automatisé dans cette situation.	Intention comportementale	(Venkatesh et al., 2003)
Je me suis senti en sécurité dans le véhicule automatisé dans cette situation.	Confiance	(O'Cass & Carlson, 2012)
Le véhicule automatisé me permettra de me déplacer en toute sécurité dans cette situation.	Confiance	(Choi & Ji, 2015)
J'ai eu confiance dans les décisions prises par le véhicule automatisé dans cette situation.	Confiance	(O'Cass & Carlson, 2012)
Plutôt que de superviser la conduite, je pourrais faire autre chose en toute confiance dans un véhicule automatisé dans cette situation.	Confiance	(O'Cass & Carlson, 2012)
J'ai confiance dans la capacité du véhicule automatisé pour gérer cette situation.	Attente d'effort	(Venkatesh et al., 2003)
Je me sentirai en mesure de monter à bord d'un véhicule automatisé avec mes proches dans cette situation.	Confiance	(Choi & Ji, 2015)
Le véhicule automatisé me fait gagner du temps dans cette situation.	Attente de performances	(Venkatesh et al., 2003)
Le déplacement du véhicule automatisé est optimisé dans cette situation.	Attente de performances	(Venkatesh et al., 2003)

Question	Effet mesuré	Auteurs
J'ai trouvé cette situation acceptable au regard de la norme sociale.	Norme sociale	(Madigan et al., 2016; Venkatesh et al., 2003)
J'ai trouvé cette situation acceptable au regard du code de la route.	Norme légale	(Kaur & Rampersad, 2018)
J'ai trouvé cette situation acceptable au regard de ce que j'aurais fait.	Attente de performances	(Venkatesh et al., 2003)

Tableau II.6 – Tableau reprenant la liste des questions utilisées dans le cadre de l'évaluation de l'acceptabilité *in situ* du comportement d'un véhicule autonome.

Pour chaque question, le participant répond sur une échelle de Likert allant de 1 à 5. La somme nous donne un score allant de 13 à 65. Le minimum, 13, indique que le comportement *in situ* n'est pas du tout acceptable. Le maximum, 65, indique que le comportement *in situ* est totalement acceptable.

Pour afficher les résultats, nous avons divisé l'espace des scores en 3 parties égales (voir figure II.17) :

- entre 13 et 30 : on parle d'acceptabilité *in situ* faible ;
- entre 30 et 47 : on parle d'acceptabilité *in situ* moyenne ;
- entre 47 et 65 : on parle d'acceptabilité *in situ* élevée.

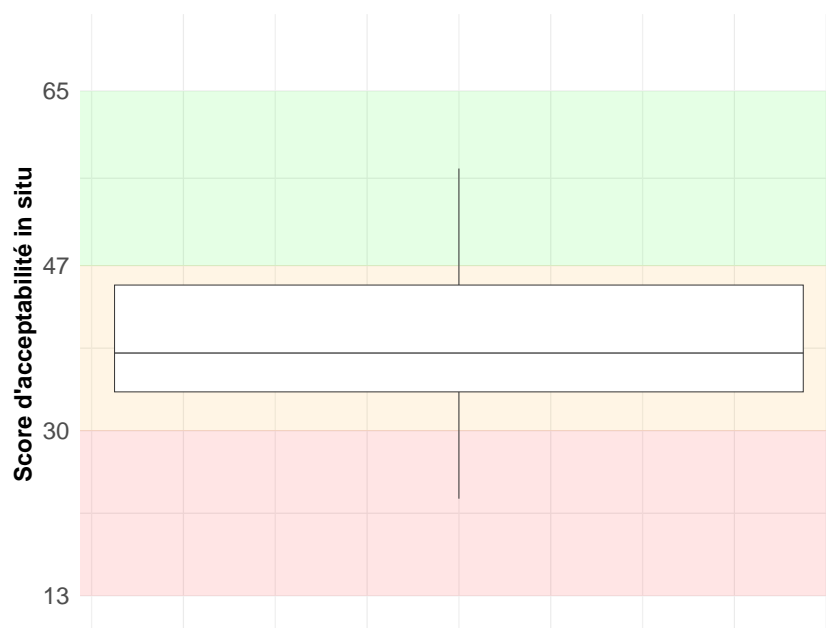


Figure II.17 – Exemple de distribution du score d'acceptabilité *in situ*.

Les émotions

Les émotions peuvent être décrites comme la résultante affective automatique et intense (Rimé, 2009) en réponse à un stimulus (Piolat & Bannour, 2008). Dès 1992,

Ekman (1992) décrivait 6 émotions principales : quatre émotions négatives (peur, colère, dégoût et tristesse) et deux émotions positives (joie et surprise). On parle généralement de valence pour décrire le caractère positif ou négatif d'une émotion. D'après Scherer (2005), on peut mesurer les émotions de trois manières :

- Physiologique : la réponse affective étant automatique, elle pourrait se refléter à travers les modifications physiologiques du système nerveux autonome ;
- Comportementale : certains éléments comportementaux, de l'ordre du réflexe automatique peuvent être le reflet d'une réponse émotionnelle (sursauts musculaires, recul...);
- Subjective : à travers une autoévaluation de ses propres ressentis, notamment à travers des questionnaires comme, par exemple, l'échelle SAM (Bradley & Lang, 1994) ou l'échelle GEW (Shuman et al., 2015).

L'étude des émotions est utilisée notamment pour qualifier l'expérience utilisateur (Kim & Fesenmaier, 2008 ; Partala & Kallinen, 2012). Les émotions à valence positive peuvent intervenir dans le processus d'acceptabilité (An et al., 2022). La composante émotionnelle revient dans plusieurs modèles. Le modèle UTAUT2 l'intègre notamment à travers sa composante hédonique (Venkatesh et al., 2012).

Le questionnaire SAM (Self-Assessment manikin)

L'échelle de Bradley et Lang (1994) est une technique d'évaluation non verbale par l'image permettant de mesurer trois composantes émotionnelles :

- le plaisir donne la valence, c'est-à-dire le caractère positif ou négatif de l'émotion ;
- l'excitation (arousal) exprime le niveau d'éveil ;
- la dominance exprime le contrôle ressenti sur l'émotion.

L'évaluation à l'aide de cette échelle se fait en demandant aux participants de dessiner une croix sur ou entre une des 5 images de chaque ligne de la figure II.18. On obtient ainsi un score entre 1 et 9 pour chacune des dimensions.

L'échelle GEW (Geneva Emotion Wheel)

L'échelle proposée par Shuman et al. (2015) se base sur l'évaluation de deux dimensions :

- la valence émotionnelle ;
- le contrôle.

L'évaluation se fait à l'aide de la roue présentée en figure II.19. On demande aux participants de choisir l'intensité d'une ou plusieurs émotions parmi les 20 présentées sur la roue. Les émotions y sont ordonnées horizontalement par valence (négative à gauche et positive à droite) et horizontalement par ordre de contrôle (contrôle élevé en haut et bas en bas).

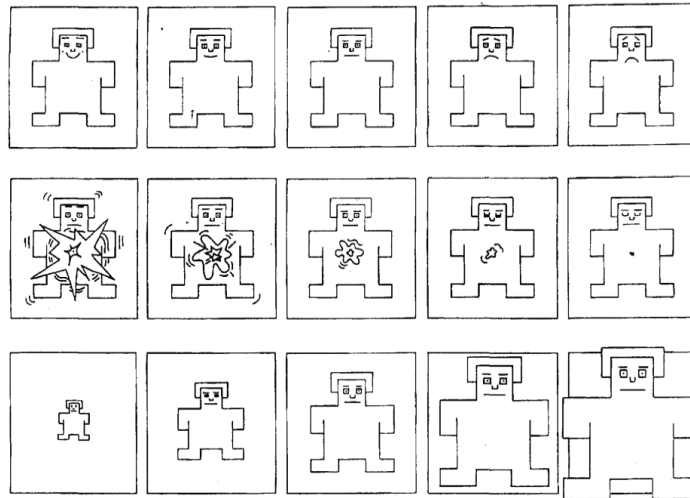


Figure II.18 – Schéma représentant l'Échelle SAM issue de Bradley et Lang (1994). La première ligne mesure la valence, la deuxième ligne mesure l'éveil et la dernière ligne mesure la dominance.

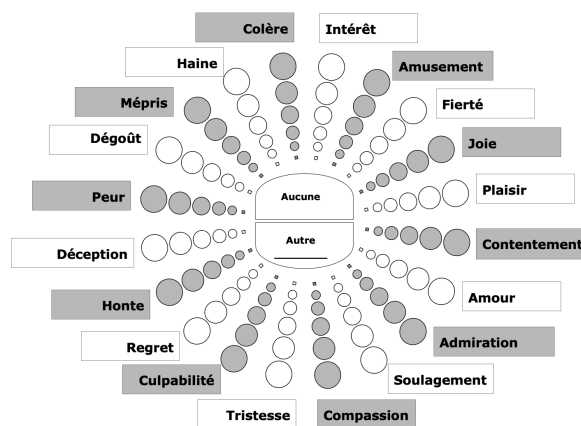


Figure II.19 – Schéma représentant l'échelle GEW.

1.2 Analyse de données

L'application du protocole présenté dans le chapitre précédent conduit à l'utilisation de différentes méthodes d'analyse de données. Pour faciliter la lecture de ce manuscrit, la partie suivante présente et explicite les méthodes utilisées. Ainsi, le lecteur n'ayant pas l'habitude de les utiliser couramment pourra s'y référer s'il en ressent le besoin.

1.2.1 Analyses statistiques

1.2.1.1 Boîte à moustache (boxplot)

La boîte à moustache (également appelé diagramme en boîte ou boxplot) permet de représenter et comparer des distributions statistiques (Tukey, 1977).

La figure II.20 illustre l'explication ci-dessous.

Les extrémités de la boîte représentent les positions des quartiles. La distribution est divisée en quatre parties d'effectifs égaux (quartiles) :

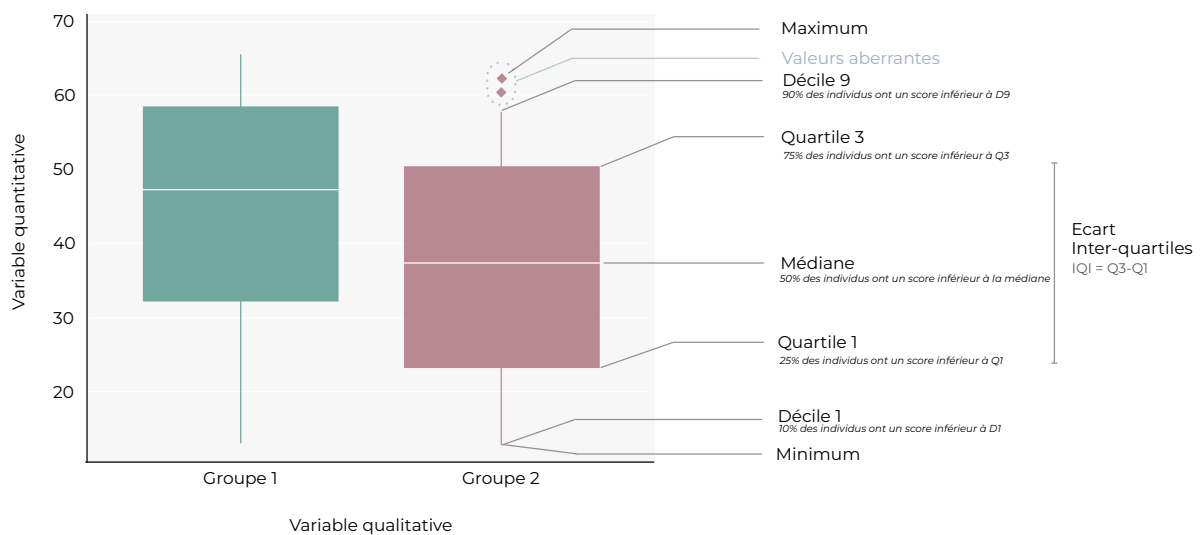


Figure II.20 – Exemple de représentation de deux distributions statistiques à l'aide d'une boîte à moustaches.

- Quartile 1 (Q1) : représente la position en dessous de laquelle se situent 25% des individus dans la distribution ;
- Médiane (Q2) : représente la position en dessous de laquelle se situent 50% des individus dans la distribution ;
- Quartile 3 (Q3) : représente la position en dessous de laquelle se situent 75% des individus dans la distribution.

La boîte est étendue par des barres de chaque côté entre le décile 1 (D1) et le quartile 1 (Q1) et entre le quartile 3 (Q3) et le décile 9 (D9).

- Décile 1 (D1) : représente la position en dessous de laquelle se situent 10% des individus dans la distribution ;
- Décile 9 (D9) : représente la position en dessous de laquelle se situent 90% des individus dans la distribution.

Les minima et maxima peuvent parfois être confondus avec les déciles D1 et D9.

Lorsque des points de la distribution sont situés aux extrémités (dans les premiers ou derniers 10%), ils sont représentés comme des points isolés. Ces points sont appelés valeurs aberrantes (ou *outliers*).

L'écart entre les quartiles 1 et 3 est une mesure de dispersion appelée écart interquartile.

1.2.1.2 Tableaux et présentation des données numériques

Dans la plupart des résultats présentés, nous accompagnons les figures de données numériques sous forme de tableaux. Ces tableaux incluent plusieurs mesures

statistiques clés :

- μ , la moyenne, qui représente la valeur moyenne des données, calculée en additionnant toutes les valeurs puis en les divisant par le nombre total d'observations ;
- m , la médiane, qui correspond à la valeur centrale d'un ensemble de données ordonnées, c'est-à-dire celle qui sépare les données en deux groupes de taille égale ;
- σ , l'écart-type, qui mesure la dispersion des données autour de la moyenne. Plus l'écart-type est élevé, plus les données sont dispersées.

1.2.2 Tests statistiques

Les tests statistiques jouent un rôle crucial dans l'analyse des données en permettant de tirer des conclusions à partir des échantillons et de faire des inférences sur la population entière. Ils se classifient en deux catégories : paramétriques et non paramétriques.

Tests paramétriques

Ces tests reposent sur des hypothèses concernant la distribution des données. Ils supposent généralement que les données suivent une distribution normale et nécessitent des paramètres comme la moyenne et l'écart-type. Les tests paramétriques sont plus puissants lorsque ces conditions sont satisfaites, car ils exploitent les propriétés spécifiques de la distribution des données pour effectuer des comparaisons plus précises. Les exemples incluent le test t de Student pour comparer les moyennes de deux groupes indépendants (test t de Student) ou appariés (test t pour échantillons appariés), et l'ANOVA (Analyse de la Variance) pour comparer les moyennes de trois groupes ou plus.

Tests non paramétriques

Contrairement aux tests paramétriques, les tests non paramétriques ne supposent pas de distribution particulière des données. Ils sont utilisés lorsque les données ne répondent pas aux critères de normalité ou lorsque les échelles de mesure sont ordinales plutôt que continues. Ces tests sont basés sur les rangs ou les ordres des données plutôt que sur les valeurs absolues. Les exemples incluent le test de Mann-Whitney pour comparer deux groupes indépendants, le test de Wilcoxon pour les données appariées, et le test de Kruskal-Wallis pour comparer plusieurs groupes.

Tests et tests posthoc

Après avoir déterminé qu'il existe des différences significatives entre les groupes (par exemple, via une ANOVA), des tests posthoc sont souvent nécessaires pour identifier

les groupes spécifiques qui diffèrent les un des autres. Ces tests permettent de réaliser des comparaisons multiples. Des exemples de tests posthoc incluent le test de Tukey pour les comparaisons multiples avec des variances égales et le test de Bonferroni pour les comparaisons multiples ajustées pour le nombre total de tests effectués.

1.2.2.1 Comparaison des médianes : Test de Friedman

Le test de Friedman est un test statistique non paramétrique utilisé pour comparer les différences entre plusieurs groupes ou conditions lorsque les données sont appariées ou répétées (Friedman, 1937). Contrairement aux tests paramétriques comme l'ANOVA à mesures répétées, le test de Friedman ne nécessite pas que les données suivent une distribution normale. Ce test est adapté pour des situations où les mêmes sujets sont mesurés à plusieurs reprises sous différentes conditions, ou lorsque les données sont regroupées en blocs.

Conditions d'utilisation :

- les données doivent être appariées, ce qui signifie que chaque sujet est mesuré plusieurs fois sous différentes conditions ;
- les observations doivent être indépendantes entre les groupes, mais pas nécessairement entre les conditions (les mesures répétées peuvent être corrélées) ;
- les données doivent être ordinales ou continues.

Hypothèse nulle (H0)

Les distributions des différentes conditions ou groupes sont identiques. En d'autres termes, il n'y a pas de différence significative entre les médianes des différentes conditions ou groupes.

Hypothèse alternative (H1)

Au moins une des distributions est différente des autres. Cela signifie qu'il existe une différence significative entre au moins deux des médianes des groupes ou conditions.

1.2.2.2 Test de Shapiro-Wilk

Le test de Shapiro-Wilk est un test statistique utilisé pour évaluer si un ensemble de données suit une distribution normale (Shapiro & Wilk, 1965). Il est particulièrement utile pour des échantillons de petite à moyenne taille et constitue une alternative puissante aux autres tests de normalité comme le test de Kolmogorov-Smirnov.

Hypothèse nulle (H0)

Les données suivent une distribution normale.

Hypothèse alternative (H1)

Les données ne suivent pas une distribution normale.

1.2.2.3 Test de Kruskal-Wallis

Le test de Kruskal-Wallis est un test non paramétrique utilisé pour comparer les distributions de plus de deux groupes indépendants (Kruskal & Wallis, 1952). Il est une alternative à l'ANOVA à un facteur, lorsqu'on ne peut pas présumer de la normalité des données. Ce test se base sur les rangs des données et ne fait pas d'hypothèses sur la forme des distributions des groupes.

Les données doivent être indépendantes et peuvent être ordinales ou continues

Hypothèse nulle (H0)

Les distributions des différentes conditions ou groupes sont identiques. En d'autres termes, il n'y a pas de différence significative entre les médianes des différentes conditions ou groupes.

Hypothèse alternative (H1)

Au moins une des distributions est différente des autres. Cela signifie qu'il existe une différence significative entre au moins deux des médianes des groupes ou conditions.

1.2.2.4 Test post-hoc de Dunn

Le test post-hoc de Dunn est un test utilisé après un test de Kruskal-Wallis lorsque celui-ci indique des différences significatives entre les groupes (Dunn, 1964). Il sert à effectuer des comparaisons multiples entre les différents groupes tout en contrôlant le risque d'erreur de type I (faux positifs). Ce test applique une correction (comme la correction de Bonferroni) pour tenir compte des comparaisons multiples.

Les données doivent être indépendantes et ordinales ou continues.

Hypothèse nulle (H0)

Les distributions de chaque paire de groupes comparés sont identiques. Il n'y a pas de différence significative entre les médianes de chaque paire de groupes.

Hypothèse alternative (H1)

Les distributions de chaque paire de groupes comparés sont différentes. Cela signifie qu'il existe une différence significative entre les médianes d'au moins une paire de groupes comparés.

1.2.2.5 Test de Wilcoxon

Le test de Wilcoxon est un test non paramétrique utilisé pour comparer deux groupes appariés ou dépendants afin de déterminer si leurs distributions diffèrent de manière significative (Wilcoxon, 1945). Il existe deux principales variantes de ce test : le test de Wilcoxon pour les rangs signés (pour les données continues) et le test de Wilcoxon-Mann-Whitney (ou test de Mann-Whitney U) pour les données indépendantes. Ici, nous nous concentrerons sur le test de Wilcoxon pour les rangs signés.

Conditions d'utilisation :

- les données doivent être appariées ou dépendantes. Ce test est approprié lorsqu'on dispose de deux mesures sur les mêmes sujets (par exemple, avant et après traitement);
- les données doivent être ordinales ou continues, mais ne nécessitent pas une distribution normale.

Hypothèse nulle (H0)

La médiane des différences entre les paires de mesures est égale à zéro. Autrement dit, il n'y a pas de différence significative entre les deux groupes appariés.

Hypothèse alternative (H1)

La médiane des différences entre les paires de mesures n'est pas égale à zéro. Cela signifie qu'il existe une différence significative entre les deux groupes appariés.

1.2.3 Classification ascendante hiérarchique

La classification ascendante hiérarchique est une méthode de regroupement (ou clustering) qui consiste à classer les individus en groupes en fonction de leur similarité. Lorsqu'on a N individus, on commence par former N groupes (ou classes), chacun composé d'un seul individu. Ensuite, on mesure la dissimilarité entre les classes et on fusionne les deux classes présentant la dissimilarité la plus faible. Cette opération est répétée jusqu'à obtenir une seule classe comprenant tous les individus (Sokal & Michener, 1958).

Le résultat de cette procédure est une hiérarchie, généralement représentée sous la forme d'un dendrogramme (voir figure II.21).

Le calcul de la dissimilarité est crucial pour les algorithmes de classification. Dans le cas d'individus représentés dans un espace à deux dimensions (x, y) , on utilise généralement la distance euclidienne. Par exemple, la distance euclidienne entre les points $A(x_A, y_A)$ et $B(x_B, y_B)$ est définie par la formule suivante :

$$d(A, B) = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}$$

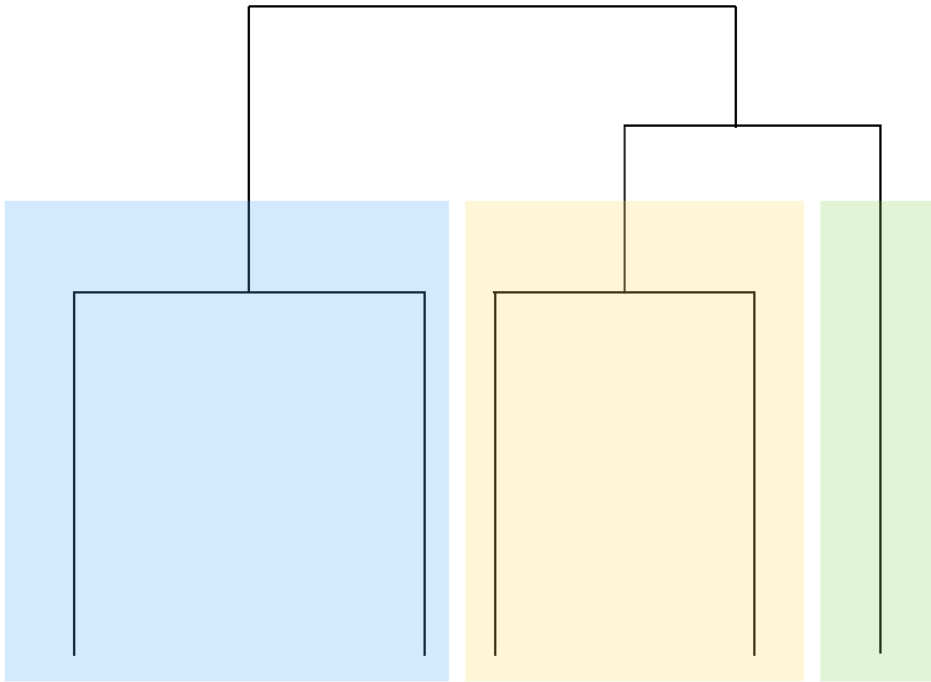


Figure II.21 – Exemple d'un dendrogramme illustrant la sélection de 3 classes.

Cette distance mesure la similarité entre les individus en prenant en compte leurs coordonnées dans l'espace.

Il existe plusieurs méthodes pour choisir le nombre de classes optimal dont voici les plus utilisées :

- Critère du coude : on trace la somme des carrés des distances intraclasse en fonction du nombre de classes. Le tracé forme un coude lorsque l'ajout d'une classe n'entraîne plus de diminution significative de la somme des carrés. Plus la somme est faible, plus les classes sont compactes (les points sont proches du centre de masse). Après le coude, la diminution n'est plus intéressante. Le point où la courbe commence à devenir plus plate indique le nombre optimal de classes.
- Critère d'Information d'Akaike (AIC) : on évalue la qualité du modèle en pénalisant sa complexité (principe du rasoir d'Ockham). L'AIC est calculé à l'aide de la formule $AIC = 2k - 2 \ln(L)$ où k est le nombre de paramètres du modèle et L est la vraisemblance du modèle. Le nombre optimal de classes est celui qui minimise l'AIC. Un AIC plus faible indique un modèle qui équilibre bien la fidélité aux données et la complexité.
- Indice de silhouette : on mesure l'indice de silhouette pour évaluer la qualité de la classification, en prenant en compte à la fois la cohésion interne des classes et la séparation entre les classes. L'indice de silhouette pour un point i est défini par $s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max(a(i), b(i))}$ où $a(i)$ est la distance moyenne entre le point i et les autres

points de sa classe et $b(i)$ est la distance moyenne entre le point i et les points de la classe la plus proche à laquelle i n'appartient pas. La valeur de l'indice de silhouette varie de -1 à 1 :

- Une valeur proche de 1 indique que le point est bien regroupé dans sa classe.
- Une valeur proche de 0 indique que le point est à la frontière entre deux classes.
- Une valeur négative indique que le point pourrait être mal classé.

Le nombre optimal de classes est celui qui maximise la moyenne des indices de silhouette pour tous les points.

Chapitre 2

Caractérisation de l'acceptabilité *in situ*

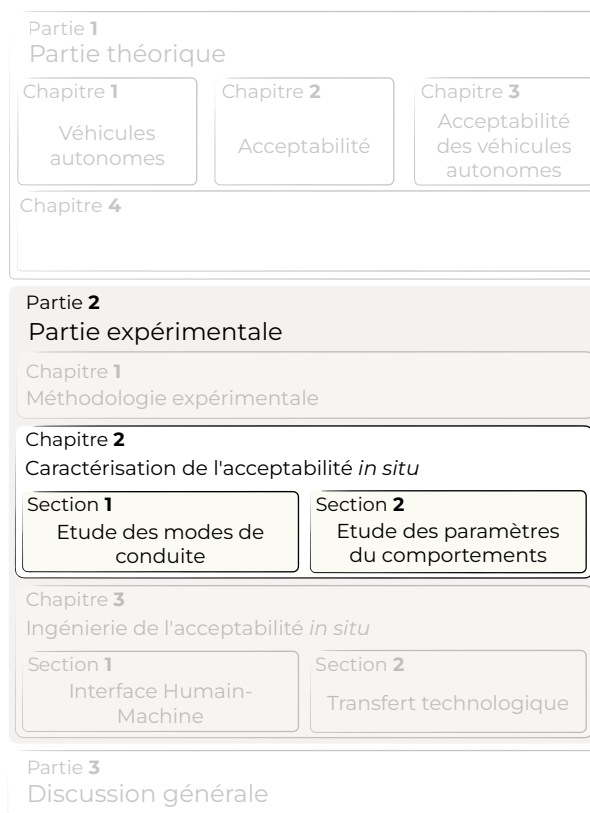


Figure II.22 – Schéma représentant le plan de la thèse

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de deux expérimentations mises en place dans l'objectif d'étudier l'acceptabilité *in situ* du comportement d'un véhicule autonome de niveau 5 du point de vue de passagers en simulateur.

- La première expérimentation : **Étude de l'effet du mode de conduite sur l'acceptabilité**, étudie l'effet de modes de conduite plus ou moins transgressif sur l'acceptabilité des passagers en simulateur.
- La deuxième expérimentation : **Étude de certains paramètres liés au comportement du véhicule**, étudie l'impact de l'acceptabilité *a priori* sur l'acceptabilité *in situ*, ainsi que l'effet des variations *in situ* de paramètres de conduite du véhicule (temps d'attente, vitesse).

2.1 Expérimentation 1 : Etude des effets du mode de conduite d'un véhicule autonome sur l'acceptabilité

2.1.1 Introduction

Nous nous intéressons à l'acceptabilité *in situ* du comportement des véhicules autonomes. C'est-à-dire à une acceptabilité "dynamique" évaluée par les passagers du véhicule et évoluant tout au long du trajet avec le comportement du véhicule.

Dans un contexte de conduite urbaine, le conducteur humain adapte sa conduite en fonction de la situation (densité du trafic, type de route, présence d'autres usagers). Les comportements à adopter sont normés à travers le Code de la route. Mais le conducteur humain présente une capacité d'adaptation qui peut engendrer des écarts à cette norme, que ce soit par nécessité pour sortir d'une situation complexe (*par exemple* : passer une intersection à un feu rouge pour laisser passer un véhicule prioritaire) ou par habitude (norme personnelle).

Pour rendre la conduite autonome efficace, il pourra être nécessaire d'implémenter ce concept de transgression du Code de la route aux algorithmes gérant le comportement des véhicules autonomes.

Dans ce chapitre, nous présentons une expérimentation qui nous a permis d'évaluer l'acceptabilité en fonction de différents modes de conduites proposés par le véhicule autonome.

En nous servant pour cadre du modèle UTAUT2 de Venkatesh, nous nous intéressons au profil du conducteur. Le modèle propose une influence indirecte des paramètres sociodémographiques (âge, sexe, etc.) sur l'acceptabilité (Venkatesh et al., 2012). Nous cherchons également à savoir si le profil du conducteur placé dans le véhicule autonome impacte son acceptabilité d'une situation.

Nous nous intéressons aux situations potentiellement conflictuelles en zones urbaines. Dans ce contexte, on peut caractériser le conflit par la rencontre entre différents usagers de la route (passagers ou conducteurs d'autres véhicules, piétons, cyclistes, etc.). On considère une zone de conflit comme une zone dans laquelle plusieurs usagers vont avoir une trajectoire qui se croise. Dans ce type de situation, l'un des usagers devra céder le passage à l'autre (Bin-Nun et al., 2022). La différence entre les prises de décision de ces usagers peut entraîner un conflit. C'est dans les intersections que l'on enregistre le plus grand nombre d'accidents (expression du conflit). En 2021, en France, 35% des accidents enregistrés impliquant au moins une voiture et engendrant des blessures ont eu lieu dans une intersection (Ministère de l'Intérieur français, 2021). Nous avons choisi quatre types d'intersections :

- les intersections avec feu de signalisation ;
- les carrefours à sens giratoire ;
- les intersections dans lesquelles s'applique la règle de la priorité à droite (l'article

R415-5 du Code de la route français prévoit que “*lorsque deux conducteurs abordent une intersection par des routes différentes, le conducteur venant par la gauche est tenu de céder le passage à l’autre conducteur*” (Journal Officiel, 2001));

- les passages piétons.

Les trois premières constituent des zones de rencontre entre les véhicules, la dernière constitue une zone de rencontre entre véhicules et piétons. La présence de piétons pouvant augmenter le risque perçu par les passagers d’un véhicule autonome (Petit, 2022).

Des groupes de travail internes au sein de Stellantis ont conduit à la proposition de trois profils de conduite (ou mode de conduite) en fonction de sa propension à respecter le Code de la route :

- un profil défensif décrivant un style de conduite patient et prudent, axé sur l’anticipation, le conducteur ralentit tôt et laisse la priorité.
Par exemple : à l’approche d’un feu de signalisation, le véhicule ralentit ou s’arrête alors que le feu est encore vert.
- un profil agressif décrivant un style de conduite nerveux, le conducteur présente une attitude hostile et colérique.
Par exemple : à l’approche d’un feu de signalisation, le véhicule ne ralentit pas alors que le feu passe à l’orange, indiquant l’imminence du feu rouge.
- un profil transgressif décrivant un style très agressif, le conducteur n’hésite pas à transgresser le Code de la route ou à prendre des risques.
Par exemple : à l’approche d’un feu de signalisation, le véhicule ne s’arrête pas ou accélère alors que le feu est rouge.

Ces trois profils de conduite constituent des formes exagérées des profils décrits dans la littérature (Taubman-Ben-Ari & Skvirsky, 2016; Taubman-Ben-Ari et al., 2004) et vont nous permettre de tester l’évolution de l’acceptabilité ressentie par les passagers d’un véhicule autonome en fonction de différents modes de conduite.

Nous avons formulé les hypothèses suivantes :

- L’acceptabilité du comportement d’un véhicule autonome est influencée par la façon dont le véhicule conduit dans différents styles de conduite inspirés de la littérature : mode défensif, mode agressif et mode transgressif.
- L’acceptabilité du comportement d’un véhicule autonome est influencée par le contexte, c’est-à-dire la situation dans laquelle se trouve le véhicule. Dans cette expérience, les situations sont l’une des intersections sélectionnées : priorité à droite, passages piétons, feux de signalisation ou carrefours à sens giratoire.
- L’acceptabilité du comportement d’un véhicule autonome est influencée par le profil du conducteur.
- L’acceptabilité du comportement d’un véhicule autonome est influencée par différents paramètres sociologiques comme l’âge, le sexe, ou l’anxiété.

2.1.2 Matériel & Méthodes

2.1.2.1 Matériels

Simulateur de véhicule autonome

Pour simuler un véhicule autonome, nous avons utilisé un simulateur statique composé d'un fauteuil de conduite, de pédales et d'un volant. 3 écrans nous ont permis d'afficher une vision à environ 80° d'angle depuis l'intérieur du véhicule (voir figure II.23).



Figure II.23 – Simulateur de conduite utilisé pour l'expérimentation. 3 écrans offrent une vision à 80° de la situation. Le volant et les pédales permettent une meilleure immersion.

Questionnaires

Questionnaires pre-test

Nous avons mesuré les habitudes de conduite à travers le "Driving Behavior Survey" (DBS) (Clapp et al., 2011) dans une version du questionnaire que nous avons traduit de l'anglais vers le français et dont nous avons fait vérifier la traduction par un anglophone natif (voir annexe B.2). Ce questionnaire nous a permis de mesurer les pratiques de conduite dangereuse à caractère anxieux.

Le modèle UTAUT présente l'anxiété comme un modérateur indirect de l'acceptabilité. Nous avons donc mesuré l'anxiété des participants à l'aide de l'inventaire d'anxiété état-trait en forme Y (STAI-Y), dans sa version traduite en français (voir annexe B.3). Les résultats reflètent l'anxiété ponctuelle vécue au moment de l'évaluation.

Questionnaires post-test

Durant cette expérimentation, nous nous sommes intéressés à l'acceptabilité *in situ* de comportements spécifiques du véhicule autonome. Une échelle de Likert en 6 points nous a permis d'évaluer le niveau d'acceptabilité *in situ* du comportement observé du point de vue du passager (placé ici sur le fauteuil derrière le volant) (voir annexe B.4). Le modèle UTAUT2 (Venkatesh et al., 2012) considère la composante hédonique d'une nouvelle technologie ainsi que les habitudes du consommateur comme des facteurs influençant l'acceptabilité. Nous avons donc mesuré la composante émotionnelle ressentie par les participants à l'aide d'une échelle des émotions sur laquelle ils devaient sélectionner celles qu'ils auraient ressenties dans la situation présentée parmi : sérénité, indifférence, stress, confiance, surprise, panique, inquiétude, plaisir, ennui, peur et enthousiasme.

Vidéos

Pour cette expérimentation, nous avons utilisé 12 vidéos créées à l'aide du logiciel de simulation SCANeR Studio 1.8. Pour chacune des 4 intersections étudiées (carrefour à sens giratoire, feux de signalisation, priorité à droite et passage piéton), il y a une vidéo de chacun des trois styles de conduite (défensif, agressif et transgressif). Pour obtenir ces vidéos, 61 vidéos ont été créées initialement, il a ensuite été demandé à un panel composé de 3 experts de catégoriser ces vidéos dans l'un des trois modes de conduite. Un effet de saturation est apparu très rapidement et certaines vidéos ont été catégorisées sans aucune ambiguïté. Au final, nous avons obtenu un jeu de données composé de 12 vidéos incluant les 3 modes de conduite dans les 4 intersections (voir tableau II.7).

- exemple d'une situation en mode défensif : [lien vers la vidéo](#)
- exemple d'une situation en mode agressif : [lien vers la vidéo](#)
- exemple d'une situation en mode transgressif : [lien vers la vidéo](#)

	Défensif	Agressif	Transgressif
Priorité à droite	vidéo 1	vidéo 2	vidéo 3
Feux de signalisation	vidéo 4	vidéo5	vidéo 6
Carrefour à sens giratoire	vidéo 7	vidéo 8	vidéo 9
Passage piéton	vidéo 10	vidéo 11	vidéo 12

Tableau II.7 – Liste des vidéos en fonction de l'intersection et du mode de conduite.

2.1.2.2 Protocole

Le protocole expérimental est schématisé dans la figure II.24.

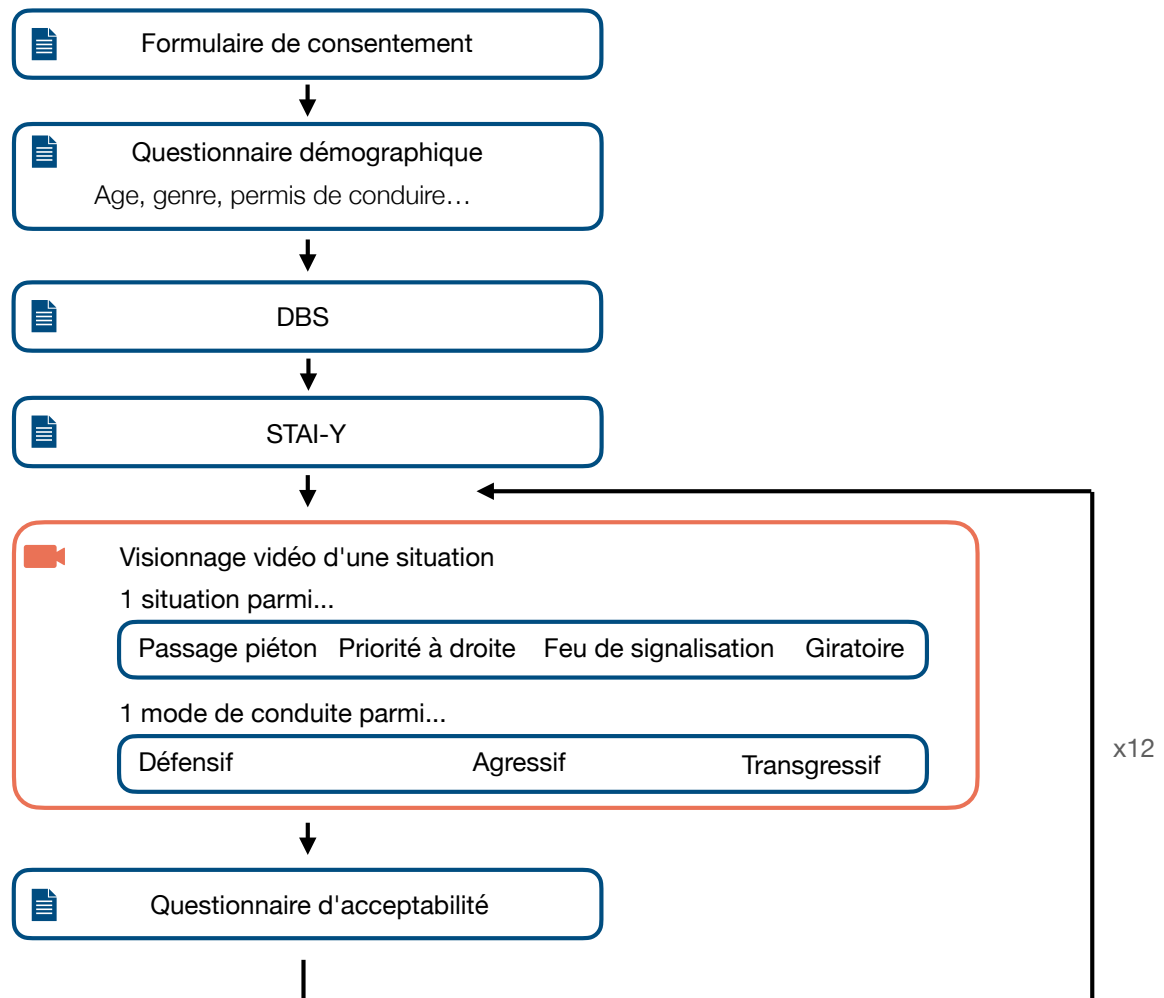


Figure II.24 – Schéma du protocole expérimental.

Après avoir rempli un formulaire de consentement libre et éclairé (voir annexe B.1), chaque participant a commencé par remplir le questionnaire DBS (Driving Behavior Survey) et le STAI-Y (State-Trait Anxiety Inventory, forme Y). Il a ensuite été demandé aux participants de s'installer dans le fauteuil de conduite comme ils le font d'habitude lorsqu'ils prennent le volant. Une fois installés, un entretien nous a permis de recueillir des données supplémentaires sur les habitudes de conduite des participants (temps de trajets hebdomadaire, distances parcourues, etc.) et sur les différents permis de conduire qu'ils possédaient.

L'expérimentation démarre par la présentation d'une vidéo témoin permettant aux participants de se familiariser avec l'interface du simulateur. Les participants sont ensuite mis en situation : ils assisteront à des situations dans lesquelles ils devront se considérer comme les passagers d'un véhicule autonome qui adoptera différents comportements. Ce véhicule dispose de capteurs, de caméras et de tous les éléments nécessaires pour détecter son environnement et réagir aux situations en adaptant sa

vitesse et sa trajectoire. Les participants sont invités à verbaliser leurs pensées et à commenter à haute voix la situation. Après chaque vidéo, les participants ont répondu à un questionnaire leur demandant d'évaluer leur niveau d'acceptabilité *in situ* du comportement du véhicule autonome sur une échelle de 1 à 6. 1 étant "pas du tout acceptable", 6 étant "tout à fait acceptable". Les participants sont également invités à imaginer les émotions qu'ils auraient ressenties dans cette situation à partir d'une liste d'émotions définies (sérénité, indifférence, stress, confiance, surprise, panique, inquiétude, plaisir, ennui, peur, enthousiasme).

Chaque participant a vu les 3 comportements dans les 4 situations, soit 12 vidéos. L'expérimentation se termine par un entretien avec les participants pour recueillir leur avis et leur ressenti au sujet du véhicule autonome et de leur acceptabilité *in situ*.

Analyses statistiques

L'expérience vise à évaluer l'effet des différentes modes de conduite sur l'acceptabilité des véhicules autonomes. Les variables démographiques prises en compte sont l'âge et le sexe. Les variables indépendantes comprennent le mode de conduite (défensif, agressif, transgressif) et la situation de conduite (passage piéton, feu de circulation, cédez-le-passage, giratoire). La variable dépendante mesurée était le score d'acceptabilité *in situ*, évalué sur une échelle de 1 à 6 en mesures répétées. Les mesures de l'acceptabilité au cours de cette expérience ont été effectuées 12 fois dans le même groupe d'individus. L'analyse d'un échantillon de données appariées dans un petit échantillon pour lequel la variable étudiée n'est pas normalement distribuée (dans le sens où elle ne suit pas une distribution normale) a conduit à l'utilisation de tests non paramétriques. La normalité a été vérifiée d'abord graphiquement, puis à l'aide d'un test de Shapiro-Wilkoxon. Les différences d'acceptabilité dans les trois modes ont été mesurées à l'aide d'un test de Wilcoxon. La différence d'acceptabilité en fonction de la situation a été mise en évidence à l'aide du test de Kruskal-Wallis, suivi du test post-hoc de Dunn. Pour plus de détail, se référer au chapitre 1.

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec à l'aide du langage R dans sa version 4.3.1.

2.1.3 Résultats

Cette expérimentation s'est déroulée entre les mois de septembre 2021 et mars 2022. Nous avons pu faire passer 31 participants dans le simulateur. Les résultats d'un participant ont été retirés, car il n'a pas pu terminer le protocole pour des raisons personnelles. Nous présentons donc les résultats obtenus sur 30 participants, 10 femmes et 20 hommes, âgés de 21 à 64 ans et ayant obtenu leurs permis de conduire en moyenne à 21 ans (voir tableau II.8).

	Hommes			Femmes			Total		
	μ	m	σ	μ	m	σ	μ	m	σ
Âge	39,05	36,00	13,88	40,20	41,00	14,59	39,43	40,00	13,88
Permis	20,95	21,00	14,40	20,00	21,50	14,70	20,62	21,00	14,25

Tableau II.8 – Résultat des questionnaires démographique. L'âge est mesuré en années au jour de passation de l'expérimentation. Permis est mesuré en années et décrit le nombre d'années écoulées depuis la passation du permis de conduire (permis B français) au jour de passation de l'expérimentation.

Paramètres sociodémographiques

Nous n'avons pas observé de différence significative dans l'acceptabilité *in situ* mesurée en fonction du genre, de l'âge ou de l'expérience des conducteurs (nombre d'années de permis) durant cette expérimentation.

2.1.3.1 Acceptabilité *in situ*

Lorsqu'on s'intéresse à l'acceptabilité *in situ* mesurée chez les participants en fonction du mode de conduite du véhicule, on observe une différence significative de l'acceptabilité *in situ* entre les différents modes de conduite. Le score mesuré est plus élevé dans le mode défensif ($\mu = 4,42$; $m = 5$) que dans le mode agressif ($\mu = 2,58$; $m = 2$). De même, le score mesuré dans le mode agressif est plus élevé que dans le mode transgressif qui est le niveau avec l'acceptabilité *in situ* mesurée la plus basse ($\mu = 1,19$; $m = 1$) (voir figure II.25).

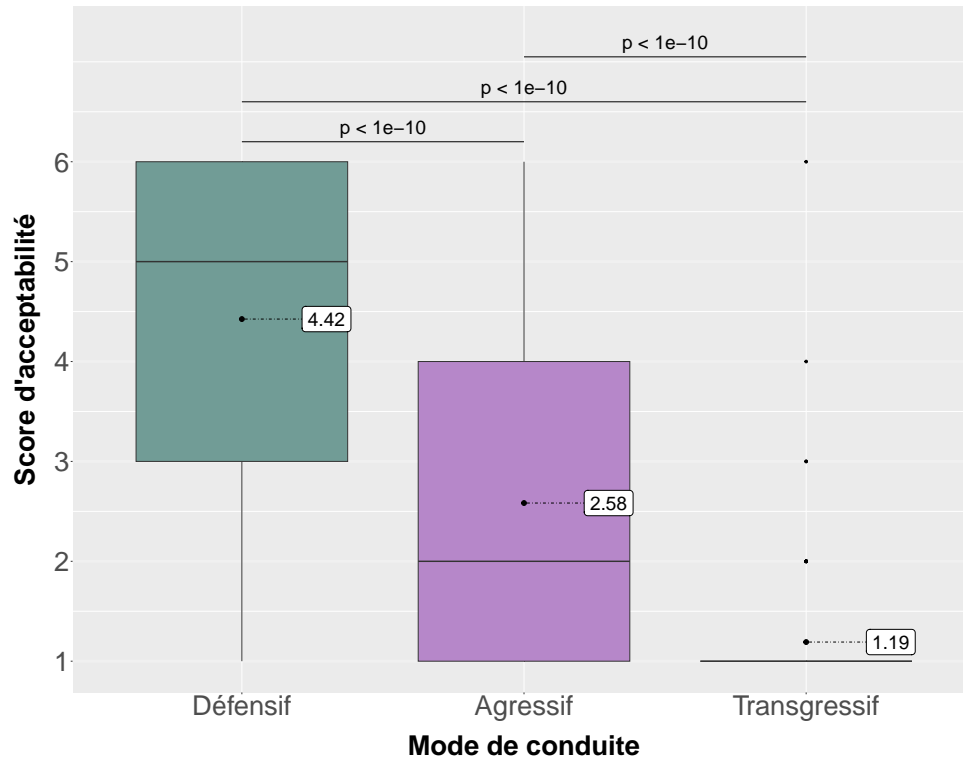


Figure II.25 – Distribution des scores d'acceptabilité *in situ* (compris entre 1 et 6) selon le mode de conduite (défensif, agressif, transgressif). Les différences significatives entre les groupes ont été évaluées à l'aide d'un test de Friedman, suivi de tests post-hoc de Wilcoxon pour les comparaisons par paires.

Lorsqu'on s'intéresse à l'acceptabilité *in situ* mesurée chez les participants en fonction de l'intersection dans laquelle se trouve le véhicule, on n'observe pas de différence significative de l'acceptabilité *in situ* mesurée (voir figure II.26). Le tableau II.9 présente le détail des résultats au questionnaire d'acceptabilité *in situ* par mode de conduite et par situation.

	Défensif		Agressif		Transgressif		Total	
	μ	m	μ	m	μ	m	μ	m
Feux de signalisation	4,83	5,00	2,30	2,00	1,00	1,00	2,71	2,00
Giratoire	4,47	5,00	2,03	2,00	1,07	1,00	2,52	2,00
Passage piéton	4,53	5,00	3,83	4,00	1,07	1,00	3,14	3,00
Priorité à droite	3,87	4,00	2,17	2,00	1,63	1,00	2,55	2,00
Total	4,42	5,00	2,58	2,00	1,19	1,00		

Tableau II.9 – Résultats détaillés de l'acceptabilité *in situ* selon le type d'intersection et le mode de conduite.

On peut affiner cette analyse en observant l'acceptabilité *in situ* mesurée en fonction de la situation dans chaque mode de conduite. On peut alors observer quelques différences.

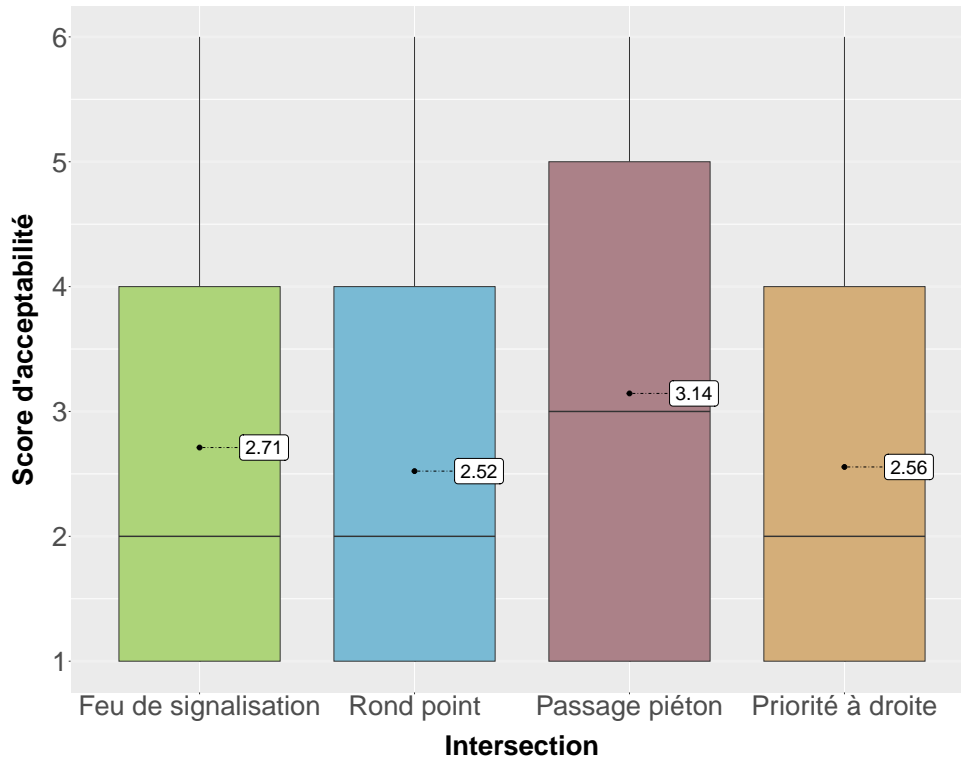


Figure II.26 – Distribution des scores d'acceptabilité *in situ* selon le type d'intersections.

Dans le mode défensif, le test de Friedman a révélé une différence statistiquement significative dans les scores entre les quatre intersections ($p = 0,01$). Cependant, les tests post-hoc de Wilcoxon par paires n'ont pas montré de différences significatives entre les paires d'intersections individuelles, suggérant que bien que des différences globales existent, elles ne sont pas suffisamment marquées pour être détectées entre les paires d'intersections spécifiques avec notre échantillon actuel (voir figure II.27).

Dans le mode agressif, l'acceptabilité *in situ* mesurée dans la situation de passage piéton a été significativement plus élevée que dans les autres situations ($\mu = 3,83$; $m = 4$) (voir figure II.28).

Dans le mode transgressif, l'acceptabilité *in situ* mesurée a été significativement plus élevée dans la situation de priorité à droite ($\mu = 1,63$; $m = 1$) (voir figure II.29).

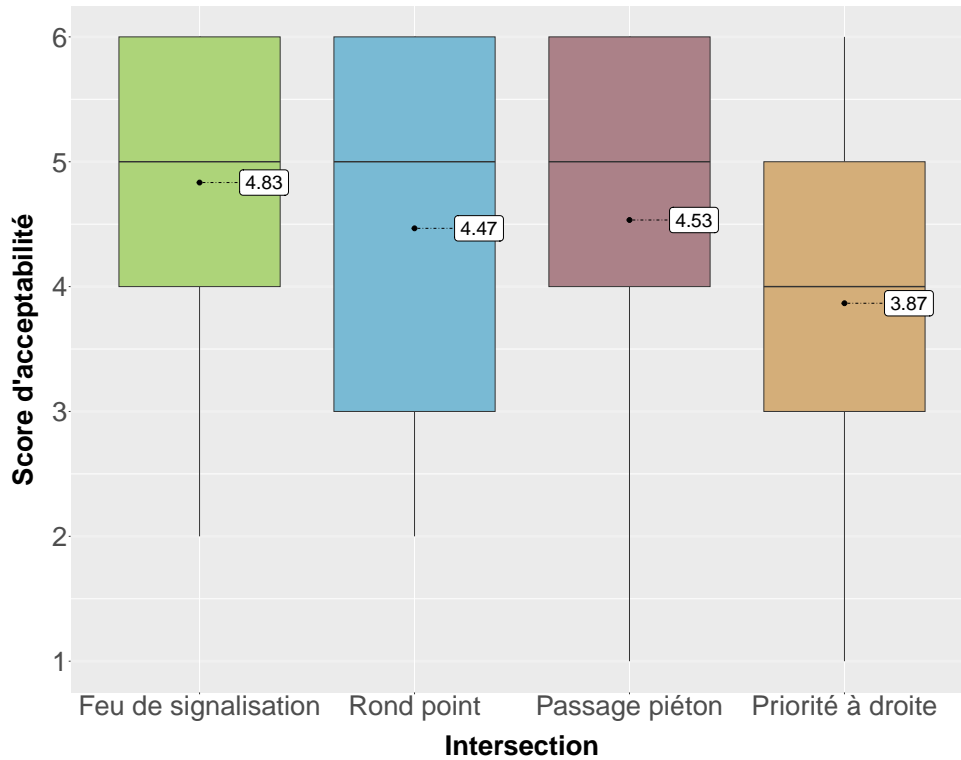


Figure II.27 – Distribution des scores d'acceptabilité *in situ* selon le type d'intersections proposées pour le mode de conduite DÉFENSIF.

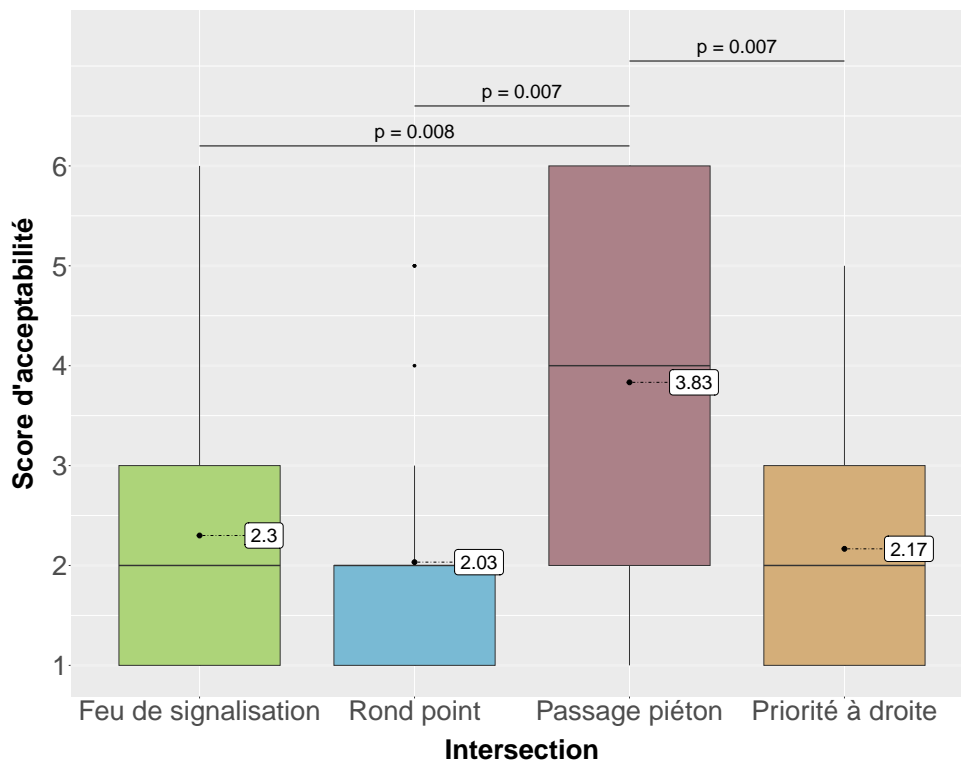


Figure II.28 – Distribution des scores d'acceptabilité *in situ* selon le type d'intersections pour le mode de conduite AGRESSIF.

2.1.3.2 Analyse des questionnaires

Le calcul du coefficient α de Cronbach, présenté dans les tableaux II.10 et II.11 nous a permis de confirmer que les questionnaires utilisés possèdent des caractéristiques

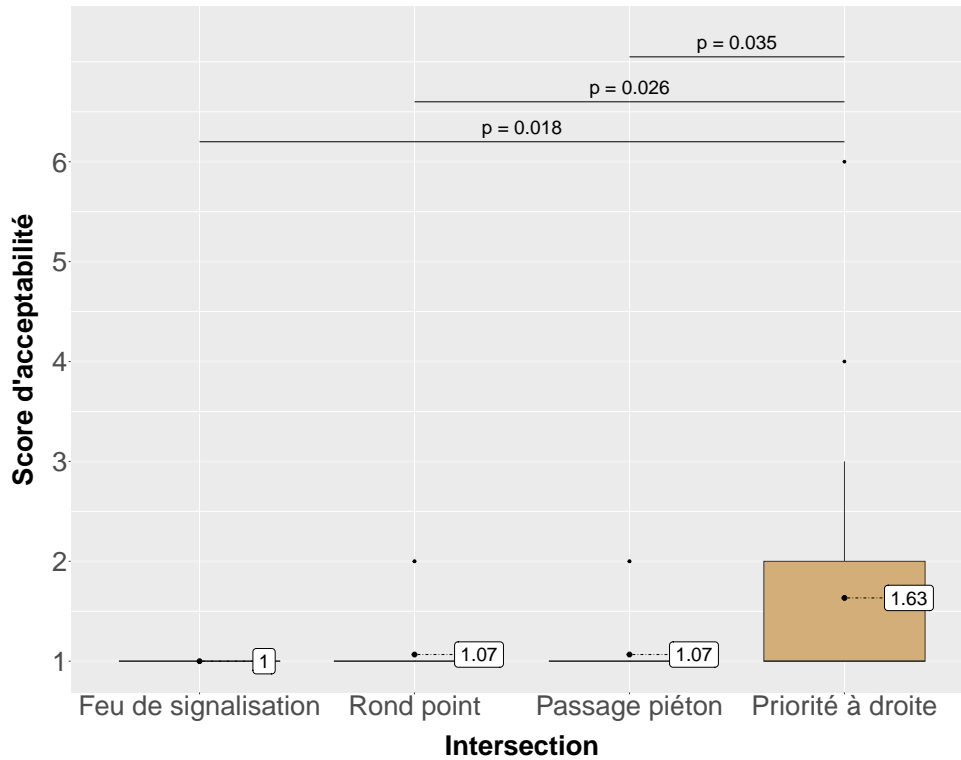


Figure II.29 – Distribution des scores d'acceptabilité *in situ* selon le type d'intersections pour le mode de **conduite TRANSGRESSIF**.

psychométriques similaires à celles des questionnaires originaux. Ces propriétés décrivent la fiabilité d'un questionnaire (les résultats sont constants et cohérents) ainsi que sa validité.

Questionnaire STAI-Y

Notre échantillon a montré une faible variabilité dans les réponses au questionnaire d'auto-évaluation de l'anxiété, qui mesure spécifiquement l'anxiété d'état. Cela suggère que, dans le contexte étudié, les fluctuations de l'anxiété liées aux situations spécifiques étaient relativement faibles. En moyenne, les participants ont obtenu un score de 38,07, plus de 80% des participants présentaient un niveau d'anxiété minimal à faible. Nous n'avons pas mis en évidence de différence significative entre les scores d'anxiété et les scores d'acceptabilité *in situ* mesurés pendant l'expérimentation (voir tableau II.10).

	Hommes		Femmes		Total		Cronbach
	μ	m	μ	m	μ	m	α
STAI-Y	36,80	35,00	40,60	39,50	38,07	36,00	0,902

Tableau II.10 – Résultats détaillés des réponses au questionnaire STAI-Y. La colonne Cronbach donne le score α calculé pour mesurer la qualité psychométrique des résultats aux questionnaires.

Questionnaire DBS

Les réponses au questionnaire DBS permettent d'établir un score dans 3 modalités :

- déficits de performance dus à l'anxiété;
- comportement exagéré en matière de sécurité et prudence;
- comportement hostile/agressif lié à l'anxiété.

Nous avons employé une méthode de classification ascendante hiérarchique afin de regrouper les participants en fonction de leurs scores dans chacune des modalités. Nous avons créé 4 groupes. Les groupes 1 et 2 (respectivement losange et cercle) sont bien représentés sur l'axe représentant la modalité comportement hostile lié à l'anxiété. Le groupe 1 (losange) contient donc des participants ayant des scores plus faibles que le groupe 2 (cercle) sur cette modalité. Le groupe 4 (carré) contient des participants qui ont un score élevé dans la modalité de mesure des comportements de sécurité exagérés (voir figure II.30a). Enfin, le groupe 3 (croix) ne contient qu'un seul individu qui semble se situer à la marge des axes X et Y avec un score plus élevé que les autres groupes dans la modalité comportement hostile lié à l'anxiété et dans la modalité déficits de performance dus à l'anxiété (voir figure II.30b). Que ce soit individuellement ou en groupe, nous n'avons pas trouvé de différences significatives dans l'acceptabilité *in situ* évaluée par les participants en fonction de leurs réponses au questionnaire DBS (voir tableau II.11).

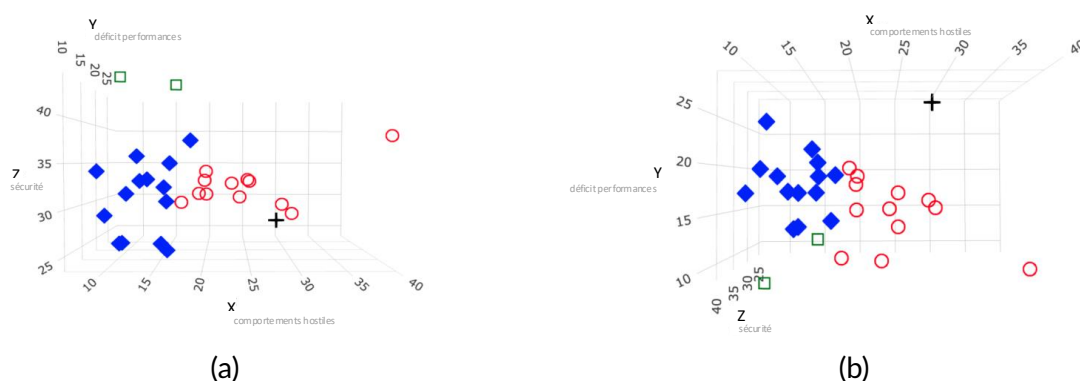


Figure II.30 – Regroupement des individus en fonction des réponses au questionnaire DBS. L'axe des X représente le score des réponses aux questions représentant la modalité de comportement hostile lié à l'anxiété. L'axe des Y représente le score des réponses aux questions représentant la modalité de mesure des déficits de performance dus à l'anxiété. L'axe Z représente le score des réponses aux questions représentant la modalité de mesure des comportements de sécurité exagérés. La figure II.30a montre le résultat du regroupement sur les dimensions X et Z et la figure II.30b montre le résultat du regroupement sur les dimensions X et Y.

	Hommes		Femmes		Total		Cronbach α
	μ	m	μ	m	μ	m	
DBS							
Sécurité	31,55	31,50	33,30	33,00	32,13	32,50	0,695
Anxiété	16,35	17,00	16,30	16,00	16,33	17,00	0,711
Agressivité	16,00	15,00	21,80	39,50	38,07	36,00	0,849

Tableau II.11 – Résultats détaillés des réponses au questionnaire DBS dans chaque composante. La colonne Cronbach donne le score α calculé pour mesurer la qualité psychométrique des résultats aux questionnaires.

Émotions

Si on observe les émotions choisies par les participants en fonction de la situation dans laquelle se trouve le véhicule autonome, on observe des schémas similaires dans chaque situation (voir figure II.31).

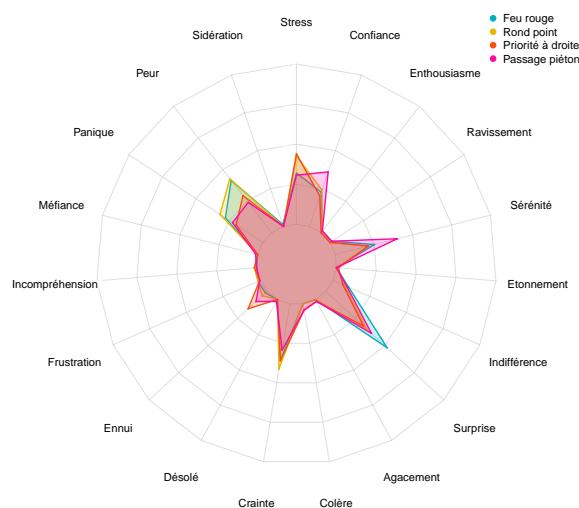
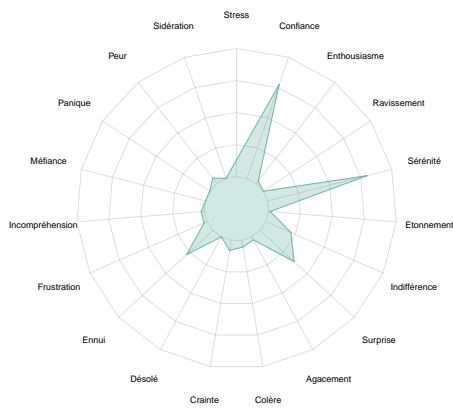
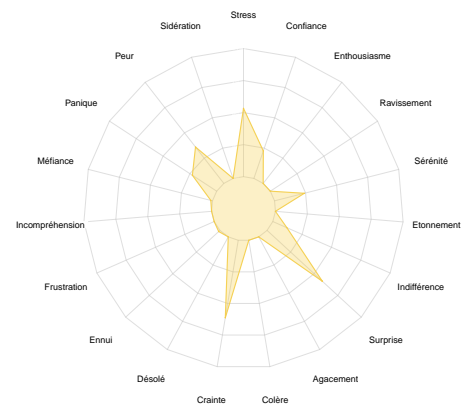


Figure II.31 – Répartition des émotions choisies par les participants dans chaque situation. Le graphique radar indique le nombre de fois où chaque émotion a été sélectionnée par les participants.

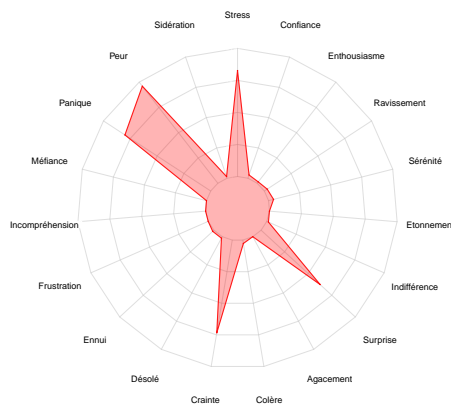
Nous nous sommes intéressés aux émotions que les participants auraient ressenties s'ils avaient été dans les situations présentées. En fonction du mode de conduite, nous avons pu observer différents schémas. En mode défensif, les participants sélectionnaient plutôt la confiance et la sérénité (voir figure II.32a). En mode agressif, les participants sélectionnaient plutôt l'inquiétude, la surprise et le stress. On peut également retrouver quelques occurrences de peur et de panique (voir figure II.32b). En mode transgressif, les participants sélectionnaient l'inquiétude, la panique, la peur, le stress et la surprise dans de plus grandes proportions qu'en mode agressif (voir figure II.32c).



(a) Mode défensif



(b) Mode agressif



(c) Mode transgressif

Figure II.32 – Répartition des émotions choisies par les participants dans chaque mode de conduite.

2.1.3.3 Analyse des verbatims

Au cours de chaque expérience, nous avons demandé au participant de verbaliser ses pensées sur la situation. Nous les avons traitées mot à mot pour les classer en différents thèmes. Par exemple, lorsqu'un participant dit *"Je suis partagé. C'est bien et sécuritaire, il a attendu, mais il s'est arrêté tôt"*. Nous avons attribué les thèmes "sécurité", "temps" et "anticipation" à ce verbatim. Nous avons ainsi étudié les thèmes qui revenaient le plus dans le discours des participants. Globalement, la "régulation du trafic" est le thème qui revient le plus. Ensuite, la "vitesse", les "autres usagers" (voitures et piétons), le "temps" et "l'expérience personnelle" sont majoritaires. Lorsqu'on étudie les thèmes les plus utilisés en fonction des différents modes de conduite, en mode transgressif, les participants utilisent plus particulièrement les thèmes du code de la route, des autres usagers, de la vitesse, des accidents et du danger. En mode agressif, le Code de la route, la vitesse, les autres usagers de la route et l'expérience personnelle sont également utilisés. En mode défensif, les thèmes les plus fréquents sont le temps, l'anticipation, l'incompréhension et l'expérience personnelle.

Pour compléter cette analyse des verbatims, nous avons demandé à un groupe de

conducteurs de participer à un exercice de tri de cartes, en leur demandant de classer les différents concepts présentés dans des catégories similaires. Une classification hiérarchique ascendante nous a permis d'observer quels mots étaient le plus souvent classés ensemble. À l'issue de cette expérience, nous avons pu proposer 6 grandes catégories basées sur la façon dont les participants ont regroupé les mots :

- Négatif ;
- Régulation ;
- Style ;
- Émotions ;
- Normes ;
- Autres.

Catégories	Négatif	Régulation	Style	Émotions	Normes	Autres
Occurrences	69	383	93	56	36	5
Défensif	3%	49%	22%	17%	9%	0%
Agressif	7%	69%	13%	4%	6%	1%
Transgressif	21%	62%	8%	6%	2%	1%

Tableau II.12 – Nombre d'occurrences et de pourcentage des catégories sémantiques selon le mode de conduite (défensif, agressif, transgressif).

L'analyse des verbatims et des catégories sémantiques permet de dégager des tendances sur la façon dont les participants perçoivent et réagissent aux différentes situations de conduite, en fonction des modes de comportement observés (défensif, agressif, transgressif). Le thème de la régulation domine largement dans toutes les situations, ce qui reflète une préoccupation commune pour le respect des règles de circulation, quelles que soient les circonstances. Cependant, des nuances apparaissent selon le mode de conduite. En mode transgressif, l'accent est mis sur le Code de la route, la vitesse, les autres usagers et le danger, ce qui traduit une certaine conscience des risques associés aux infractions, bien que les participants adoptent tout de même des comportements déviants. En mode agressif, les thèmes se rapprochent de ceux du mode transgressif, mais l'expérience personnelle émerge plus fortement, suggérant que ces comportements pourraient être justifiés par des croyances ou des situations vécues. Enfin, en mode défensif, les participants se concentrent davantage sur le temps, l'anticipation et l'incompréhension, des éléments qui traduisent une volonté de maîtrise et de prudence, marquant une opposition nette aux comportements plus risqués.

2.1.4 Discussion

Notre objectif était d'étudier l'évolution de l'acceptabilité *in situ* du comportement d'un véhicule autonome dans 3 modes de conduite et 4 types d'intersections puis de déterminer quels comportements pouvaient être considérés comme totalement inacceptables. Pour rappel, nous avons formulé les 4 hypothèses suivantes :

- (a) L'acceptabilité *in situ* du comportement d'un véhicule autonome est influencée par le mode de conduite du véhicule ;
- (b) L'acceptabilité *in situ* du comportement d'un véhicule autonome est influencée par le contexte de la situation dans laquelle se trouve le véhicule ;
- (c) L'acceptabilité *in situ* du comportement d'un véhicule autonome est influencée par le profil de conduite du passager ;
- (d) L'acceptabilité *in situ* du comportement d'un véhicule autonome est influencée par différents paramètres sociologiques comme l'âge, le sexe ou l'anxiété occasionnelle.

Sur la base de nos résultats, il semble qu'il y ait une relation significative entre le style de conduite d'un véhicule autonome, représenté dans notre expérience par les trois modes de conduite (défensif, agressif et transgressif) et l'acceptabilité *in situ* du comportement de ce même véhicule par les passagers. Ceci confirme notre hypothèse (a). Les passagers d'un véhicule autonome acceptent mieux un comportement défensif, respectueux du Code de la route et des autres usagers, même si ce comportement a un aspect plus frustrant, qu'un comportement agressif qui pourrait mettre en danger le passager ou les autres usagers. Il sera intéressant d'approfondir cette hypothèse en affinant le comportement du véhicule et en posant des limites moins claires sur les différents aspects. À ce jour, le comportement proposé n'est pas ambigu, le comportement transgressif est clairement transgressif. On pourrait envisager un comportement moins "clair" en imaginant par exemple un véhicule qui grillerait un feu rouge à très faible vitesse pour laisser passer un véhicule prioritaire ou être plus défensif parce qu'un autre usager de la route agit étrangement.

D'un mode de conduite à l'autre, la différence réside dans la propension du véhicule autonome à respecter la norme. Du point de vue du passager, cette idée se retrouve dans les notions d'attente de performance (le passager attend du véhicule qu'il agisse d'une certaine manière pour optimiser son trajet), d'influence sociale (la norme sociale peut avoir un fort impact sur la manière dont un individu conduit) et de motivation hédonique. Ces trois éléments influencent directement l'intention comportementale du modèle UTAUT2 (Venkatesh et al., 2012). Les résultats nous ont montré que le profil de conduite du passager ne semble pas influencer son acceptabilité *in situ* du comportement du véhicule autonome. Dans cette expérience, le profil de conduite est lié à l'anxiété induite par la conduite (Clapp et al., 2011). L'anxiété est l'un des prédicteurs inclus dans le modèle UTAUT 2 (Venkatesh et al., 2012), nous pensions donc qu'elle aurait une influence sur nos l'acceptabilité durant cette expérimentation. Ce résultat est à nuancer avec le manque de variabilité des réponses obtenues au DBS. Mais les quelques participants qui ont présenté un profil plus "agressif" ne semblent pas présenter de différences dans l'acceptabilité *in situ* du comportement du véhicule autonome par rapport au reste du groupe. Cela nous amène à réfuter l'hypothèse (c). Les résultats montrent peu de différences dans l'acceptabilité *in situ* du comportement

du véhicule autonome en fonction de la situation de conduite. Il y a deux exceptions dans notre expérience :

- En mode agressif, l'acceptabilité *in situ* du passage piéton, comparée aux autres situations, se distingue de manière significative, étant perçue comme plus acceptable. Cette différence peut être principalement attribuée au fait que cette situation est relativement similaire à des situations courantes de la vie quotidienne, ce qui pourrait la rendre plus familière et mieux acceptée.
- Dans le mode transgressif, il y a une différence significative dans l'acceptabilité *in situ* mesurée dans la situation de priorité à droite. Nous pensons que cette différence s'explique par un défaut de la vidéo présentée, dont certains participants n'ont pas perçu tous les détails.

Ces résultats nous amènent à rejeter l'hypothèse (b). L'acceptabilité *in situ* du comportement du véhicule autonome semble bien être liée à la manière dont le véhicule est conduit et la situation représentée par l'une des 4 intersections (carrefour à sens giratoire, feu de signalisation, passage piéton, priorité à droite) ne semble pas avoir d'effet sur le résultat. Enfin, les paramètres sociologiques mesurés sur les participants (âge, genre...) n'ont pas révélé de différence significative dans l'acceptabilité *in situ*.

Le sexe, l'âge, le nombre d'années de permis de conduire ou l'anxiété ne semblent pas être des paramètres modérateurs de l'acceptabilité *in situ* dans notre contexte. Ceci nous conduit à rejeter l'hypothèse (d). Ce résultat semble en accord avec ce que l'on peut trouver dans la littérature. En effet, l'âge et le genre ne présentent pas un effet clairement démontré sur le phénomène de l'acceptabilité des technologies puisque certaines études ont pu montrer les effets de ces variables modératrices sur l'acceptabilité (Blut et al., 2022 ; Schmitz et al., 2022) alors que d'autres n'ont pas montré d'effet significatif (Nikolopoulou et al., 2020). Au vu de la littérature, la notion d'anxiété semble être un facteur impliqué dans l'acceptation des véhicules autonomes (Tan et al., 2022), ce qui est en partie confirmé par les résultats observés sur les émotions ressenties par les participants à notre étude. L'analyse des émotions que nous avons menée a révélé une nette différence dans les panels d'émotions choisis par les participants pour décrire les situations dans chacun des modes de conduite. Nous pouvons donc supposer qu'il existe un lien entre acceptabilité et les émotions. Dans notre cas, il semble que les émotions de valence négative (peur, stress, etc.) soient liées à un faible niveau d'acceptabilité *in situ*, alors que les émotions de valence positive ou neutre (confiance, sérénité, etc.) seraient liées à un niveau d'acceptabilité *in situ* plus élevé. Il pourrait être intéressant de voir comment les niveaux émotionnels sont corrélés avec les niveaux d'acceptabilité *in situ*. Il serait possible d'étudier certains marqueurs physiologiques de l'émotion afin de prédire l'évolution de l'acceptabilité *in situ*.

L'étude des verbatims nous a également montré une différence dans la fréquence d'apparition des thèmes abordés par les participants en fonction des situations. Selon

les résultats obtenus, on peut dire que le respect du Code de la route est l'un des premiers critères influençant l'acceptabilité *in situ*. Le non-respect du Code de la route entraîne une diminution de l'acceptabilité *in situ*. Les notions de danger et de comportement des autres usagers de la route apparaissent surtout lorsque l'acceptabilité *in situ* est la plus faible. Ces notions pourraient influencer négativement l'acceptabilité *in situ* du comportement. Enfin, certaines notions semblent être représentatives de l'ambiguïté de la décision sur l'acceptabilité *in situ* d'une situation. Le thème de l'incompréhension revient particulièrement lorsque le score d'acceptabilité *in situ* est moyen (ni élevé ni faible), ce qui montre que l'incompréhension du comportement peut induire un certain malaise chez les participants qui ne savent pas trop comment évaluer les situations. Ce n'est peut-être pas dangereux, mais cela peut ne pas correspondre à leur comportement habituel. C'est l'idée qui sous-tend le thème de l'expérience personnelle, qui apparaît aussi particulièrement dans ces situations.

2.1.5 Conclusion

Nous avons étudié l'effet du comportement d'un véhicule dans des situations conflictuelles, en milieu urbain. Nous avons constaté que le mode de conduite peut avoir un impact important sur l'acceptabilité *in situ* du véhicule par les passagers. Plus le mode de conduite est transgressif, moins il est accepté. Cette première expérimentation nous a permis de mettre en évidence le fait que, quelle que soit la situation d'intersection, un comportement transgressif sera systématiquement vécu comme inacceptable et devra donc être évité par les véhicules autonomes. Il serait intéressant de tempérer ce résultat en observant l'effet d'une transgression obligatoire comme un refus de priorité pour faciliter le passage d'un véhicule d'urgence prioritaire sur l'acceptabilité. D'une certaine manière, le comportement ne deviendrait donc plus une transgression, mais le comportement correct à adapter (le comportement "normal").

Nous avons également constaté que le contexte environnemental, représenté par l'une des quatre intersections de notre expérience, n'affecte pas l'acceptabilité *in situ* de manière significative. Ce résultat est très intéressant, car il simplifie le problème et facilitera l'étude de l'acceptabilité des véhicules autonomes pour lesquels le contexte environnemental peut être choisi plus facilement. Dans notre contexte, les participants étaient des passagers ayant des compétences de conduite. Il serait intéressant d'étudier si nous obtenons des résultats similaires avec des passagers non conducteurs. Notre expérience n'étudie que le point de vue de l'intérieur du véhicule.

Enfin, cette expérience a confirmé l'importance des émotions dans le processus d'acceptabilité. Compte tenu des émotions proposées par nos participants ainsi que de leurs verbatim, la mesure de l'acceptabilité *in situ* réalisée lors de cette expérience semble refléter un rejet de la prise de risque. Risque qui ne serait pas en adéquation avec le mode de conduite "habituel" du passager du véhicule. Il semble que les

comportements agressifs et défensifs puissent être utilisés par les véhicules autonomes en prenant en compte le retour des utilisateurs à travers les interfaces ou l'adaptation des algorithmes de conduite autonome.

Ce qu'il faut retenir

- Le mode de conduite (comportement) d'un véhicule autonome influe sur l'acceptabilité *in situ* du comportement par les passagers ;
- La transgression du Code de la route est inacceptable pour les passagers d'un véhicule autonome ;
- L'intersection dans laquelle le véhicule se trouve n'a pas d'effet sur l'acceptabilité *in situ* du comportement d'un véhicule autonome ;
- La composante émotionnelle et la sécurité perçue jouent un rôle important dans l'acceptabilité *in situ* du comportement d'un véhicule autonome ;
- L'anxiété n'a pas d'effet sur l'acceptabilité *in situ* du comportement d'un véhicule autonome.

2.2 Expérimentation 2 : Etude des paramètres liés au comportement du véhicule autonome

2.2.1 Introduction

Les résultats de l'expérimentation précédente nous ont permis de conclure sur l'effet du mode de conduite sur l'acceptabilité *in situ* des passagers du véhicule autonome. Le mode de conduite a été étudié en fonction de son degré de respect du Code de la route, du plus transgressif au plus défensif (Taubman-Ben-Ari & Skvirsky, 2016; Taubman-Ben-Ari et al., 2004). Ainsi, plus le comportement du véhicule est agressif, moins il est accepté par le passager (Nativel-Fontaine & Lespinet-Najib, 2023). La plupart des études se concentrent sur le comportement global des véhicules autonomes pour expliquer la variation de l'acceptabilité en fonction du comportement du véhicule autonome (Carteni, 2020; Hilgarter & Granig, 2020). Nous souhaitons maintenant considérer le comportement à une plus petite échelle. À l'échelle macroscopique, lorsqu'on parle de comportement agressif, on décrit un véhicule qui freine tardivement, diminue sa distance aux autres usagers et accélère plus fort. Ce sont ces paramètres qui nous intéressent et nous souhaitons explorer lesquels peuvent impacter directement l'acceptabilité du comportement. Un certain nombre d'études ont montré l'influence de la vitesse d'un véhicule sur l'acceptabilité. Les vitesses faibles sont souvent associées à une plus faible acceptabilité (Nordhoff et al., 2018b). La vitesse étant une composition de la distance et du temps, ces paramètres ont également été étudiés pour leur influence sur l'acceptabilité. Dans le contexte des navettes autonomes, le temps est plus souvent étudié dans sa globalité sur un trajet, les trajets les plus courts semblant plus acceptables pour les usagers (Wien, 2019). De plus, certaines situations doivent être transgressives, pour des raisons de sécurité ou pour débloquer une situation qui ne pourrait l'être autrement. Par exemple, un véhicule peut être amené à ne pas respecter l'arrêt à un feu rouge pour laisser passer un véhicule d'urgence, ou à prendre une voie en sens opposé pour sortir d'une rue bloquée par un camion. Nous l'avons montré dans l'expérience précédente, le caractère transgressif de ces situations les rend non acceptables. Nous souhaitons donc explorer un moyen d'améliorer l'acceptabilité dans ces situations. Certaines études présentent l'influence qu'aurait la présentation d'un stimulus sur un autre stimulus survenu plus tard dans le temps. C'est ce que nous appellerons effet d'amorçage (Bargh et al., 2001; Doyen et al., 2012; Weingarten et al., 2016). L'amorçage a déjà été étudié pour avoir un effet sur les interactions entre un humain et une machine, ainsi que sur la prise de décision de l'utilisateur (Dai et al., 2020). Durant l'introduction d'un outil intelligent, sa perception peut être influencée par une simple technique d'amorçage (Pataranutaporn et al., 2023), au point de manipuler la confiance dans l'outil (Clare et al., 2015).

Toujours dans le contexte du modèle UTAUT2, nous avons émis les hypothèses

suivantes :

- (a) un amorçage sous forme d'instruction soulignant la sécurité du véhicule peut affecter l'acceptabilité *in situ* du comportement du véhicule par le passager ;
- (b) la situation (type de route) dans laquelle se trouve le véhicule autonome peut affecter l'acceptabilité *in situ* du comportement du véhicule par le passager ;
- (c) le temps d'attente d'un véhicule avant de s'engager dans une situation peut influencer l'acceptabilité *in situ* du comportement du véhicule par les passagers ;
- (d) la densité du trafic dans lequel le véhicule va s'engager peut influencer l'acceptabilité *in situ* du comportement du véhicule par les passagers ;
- (e) au regard des modèles théoriques, les variations de l'acceptabilité peuvent être modérées par des variables démographiques telles que l'âge, le sexe, le fait que le participant soit ou non titulaire d'un permis de conduire, les habitudes de conduite ou la familiarité avec les véhicules autonomes.

Pour questionner ces hypothèses, nous avons mis en place deux expérimentations préliminaires afin de :

- définir les temps d'attente à étudier durant l'expérimentation ;
- étudier l'intérêt d'une phase de familiarisation avant une simulation en réalité virtuelle.

Le temps d'attente et la densité de trafic (matérialisée par la distance entre les véhicules) sont des variables continues. Afin de cadrer le périmètre de l'étude, nous avons choisi des valeurs à tester dans notre simulation pour ces paramètres. Pour ce faire, une expérimentation préliminaire a été mise en place (voir section 2.2.2.1).

Dans notre contexte, l'utilisation d'environnements virtuels présente un grand intérêt pour étudier tout type de comportements avant leur implémentation dans les algorithmes de conduite automatisée. Pour répondre à nos questions, nous avons donc mis en place un protocole expérimental en réalité virtuelle. Le contexte d'autonomie totale représente un des points critiques des études en environnement virtuel. En effet, le véhicule est capable de se déplacer sans intervention humaine. Dans notre contexte, les participants se retrouvent simples passagers du véhicule. De fait, ils ne sont engagés dans aucune tâche de conduite. L'étude de l'acceptabilité du comportement des véhicules autonomes nécessite cependant que le participant soit impliqué dans la situation afin de pouvoir étudier son ressenti quant au comportement observé.

L'engagement est défini par Dow et al. (2007) comme "*l'implication ou l'intérêt dans un contenu, une activité ou une expérience*". En réalité virtuelle, c'est un concept lié à deux concepts :

- l'immersion : l'état psychologique d'être inclus dans un environnement (Witmer & Singer, 1998) ;
- la présence : la perception d'être transporté à l'intérieur de l'environnement (Sheridan, 1994 ; Witmer & Singer, 1998).

La communauté scientifique autour de la réalité virtuelle s'accorde sur le fait que le sentiment de présence implique un meilleur engagement (Lombard & Ditton, 2006 ; Witmer & Singer, 1998). L'environnement virtuel utilisé dans le cadre de simulations d'un véhicule autonome semble impacter l'évaluation, un environnement en réalité virtuelle induit une plus grande confiance ainsi qu'une plus grande performance perçue (Ebnali et al., 2020 ; Zou et al., 2021). Certains auteurs ont également montré l'intérêt d'ajouter au préalable une phase de familiarisation afin d'optimiser la performance et la confiance en l'automatisation lors d'une première utilisation d'un véhicule autonome en simulateur (Ebnali et al., 2020). Nous avons donc mis en place une seconde expérimentation préliminaire afin de comprendre si une phase de familiarisation en réalité virtuelle, durant laquelle le sujet est engagé dans une tâche, peut favoriser le sentiment de présence lors d'une phase de simulation d'un véhicule autonome. Nous souhaitons également observer la façon dont ce sentiment de présence évolue au regard de nos futures questions de recherche sur l'acceptabilité des véhicules autonomes (voir section 2.2.2.2).

2.2.2 Études préliminaires

2.2.2.1 Choix du temps d'attente

Afin de présélectionner les valeurs à utiliser dans le protocole expérimental, nous avons créé un questionnaire en ligne pour tester la réaction des participants sur un plus grand nombre de combinaisons distance/vitesse.

Matériel & Méthodes

Recrutement & participants

Le questionnaire a été auto-administré par les participants volontaires qui l'ont reçu via leur boîte mail ou via les réseaux sociaux.

Matériel

20 vidéos ont été créées. Chaque vidéo présente le même point de vue (voir figure II.33), d'un conducteur placé à une intersection avec un cédez-le-passage (voir figure II.34). Le véhicule est arrêté au cédez-le-passage, une file discontinue de voitures se déplace sur la voie principale.



Figure II.33 – Schéma reprenant le point de vue du conducteur présent dans chacune des vidéos du questionnaire.

Entre les différentes vidéos, nous faisons varier deux paramètres :

- la distance entre chaque véhicule qui circule sur la voie principale (10 modalités (en mètres) : 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45);
- la vitesse des véhicules sur la voie principale (4 modalités (en km/h) : 20, 30, 50, 70).

Le tableau II.13 présente le temps que met un véhicule pour parcourir une distance en mètres lorsqu'il roule à une vitesse fixée en kilomètres par heure. En France, le Code de la route préconise de laisser une distance minimale entre deux véhicules de sorte

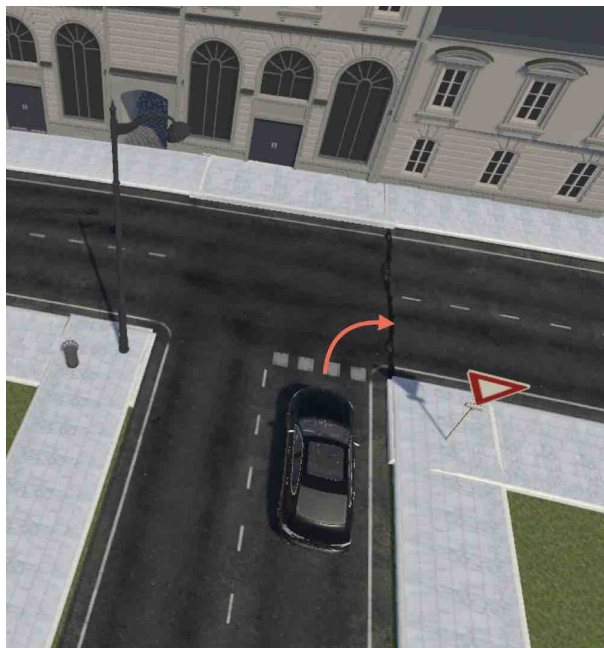


Figure II.34 – Schéma reprenant le point de vue extérieur présentant la situation dans laquelle se trouve le véhicule.

qu'il faille mettre au moins 2 secondes pour parcourir cette distance (Institut National de Sécurité Routière et de Recherches, 2003 ; Journal Officiel, 2003). Pour chaque vitesse, nous avons sélectionné une distance dans la zone de danger, une distance limite (1,8 seconde entre deux véhicules) et 3 distances au-delà de 2 secondes. Nous avons ainsi obtenu 20 vidéos.

Vitesse (km/h) \ Distance (m)	20	30	50	70
5	0,9			
10	1,8	1,2		
15		1,8		
20			1,44	
25			1,8	
30				1,54
35				1,8
40				
45				
50				
Distance minimale de sécurité (en m)	11,11	16,66	27,77	38,88

Tableau II.13 – Distances minimales à respecter en fonction du temps d'attente. Les valeurs présentées à l'intérieur du tableau sont en secondes. En rouge, on est dans la zone de danger, en jaune on est dans une zone limite proche des 2 secondes, en vert, on dépasse les 2 secondes.

Lorsque les participants se connectent à l'interface, on leur présente la consigne suivante accompagnée de la figure II.34 :

*Vous êtes conducteur de ce véhicule, vous êtes arrêté à une intersection (un cédez-le-passage), donc vous n'avez pas la priorité au niveau de l'intersection. Vous souhaitez tourner à droite. Des voitures circulent sur la file sur laquelle vous souhaitez vous engager. Ainsi, pour tourner à droite, vous allez devoir vous engager entre 2 voitures. Quand vous pensez pouvoir vous engager entre 2 véhicules, vous allez alors cliquer sur le bouton **S'engager**.*

On présente ensuite les 20 vidéos, dans un ordre aléatoire, au participant qui doit cliquer sur le bouton **S'engager** quand il estime qu'il s'engagerait dans la situation. Nous mesurons ainsi le temps que met le participant avant de s'engager en fonction de la vitesse et de la distance entre les véhicules.

Résultats

Au total, 301 personnes ont commencé le questionnaire en ligne, avec un taux d'abandon de 40%, 179 personnes ont fourni une réponse utilisable pour les 20 vidéos. Le tableau II.14 montre les temps moyens avant que les participants décident qu'ils pouvaient s'engager dans l'intersection en fonction des vitesses et des distances entre les véhicules.

Vitesse (km/h) \ Distance (m)	20		30		50		70	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
5	17,47	18,18						
10	12,83	18,09	15,98	17,78				
15	9,82	14,69	12,28	15,43				
20	6,45	9,73	9,58	16,12	11,82	16,34		
25	4,25	4,25	5,73	7,05	7,99	13,27		
30			5,18	7,27	8,76	34,80	7,34	14,15
35					4,49	4,13	5,41	7,70
40					4,19	4,24	4,67	6,70
45							4,48	3,80
50							3,86	2,77

Tableau II.14 – Moyennes et écart-type des temps de réaction (en secondes) en fonction de la distance entre les véhicules et de leur vitesse.

La figure II.35 présente le temps de réaction (le nombre de secondes au bout desquelles les participants ont appuyé sur le bouton **S'engager** à partir du début d'une vidéo) en fonction de la vitesse des véhicules sur la voie principale. On peut observer une diminution du temps d'attente des participants avec une augmentation de la vitesse des véhicules engagés sur la voie principale. Il est intéressant de noter qu'il n'y a pas de différence significative dans les temps de réaction mesurés à 20 et 30 km/h.

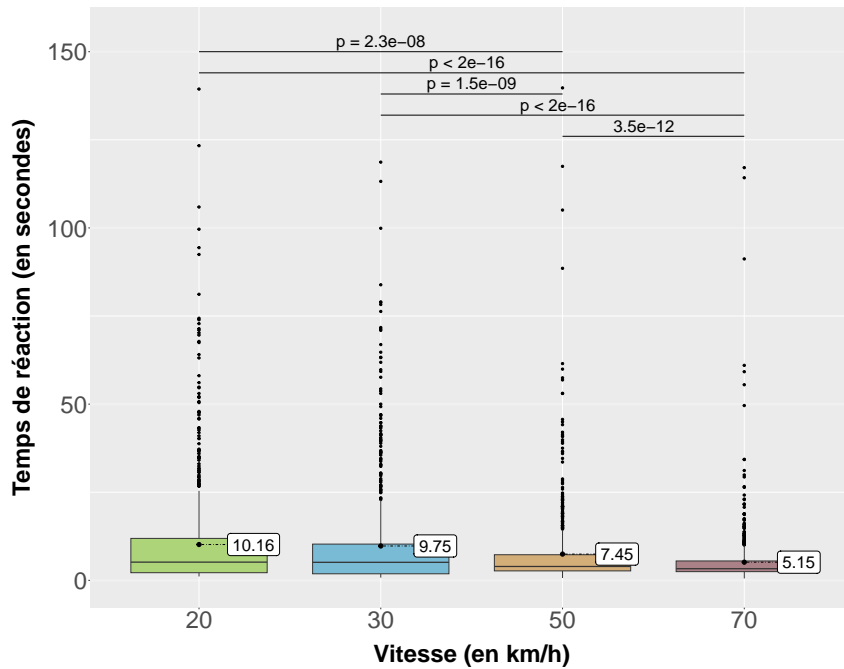


Figure II.35 – Temps de réaction en fonction de la vitesse des véhicules sur la voie principale.

Nous avons regroupé les situations en fonction de la distance entre les véhicules. Et nous avons converti cette distance en temps en fonction de la vitesse. Par exemple, si deux véhicules roulent à 20 km/h et qu'ils sont séparés par 5 mètres, le temps inter-véhiculaire (TIV) est de 0,9 seconde, c'est le temps qu'il faut au véhicule derrière pour atteindre la position de celui qui le précède. Nous avons créé trois groupes :

- TIV < 1,8 s, que nous considérons comme une situation dangereuse dans la mesure où les temps de réaction ne permettent pas à un humain d'avoir une action sur le véhicule dans ce laps de temps ;
- TIV > 2 s, qui est le temps à observer entre deux véhicules préconisé en France par les organismes de sécurité routière ;
- TIV > 1,8 s, une situation "entre-deux" qui peut constituer un certain risque.

La figure II.36 présente les temps de réaction dans chacun de ces groupes pour chaque vitesse. On observe la même dynamique que précédemment, le temps de réaction est plus bas lorsque la vitesse augmente. Cette dynamique est d'autant plus marquée dans les situations les plus dangereuses (TIV < 1,8 s). On peut également observer une plus grande variabilité des temps dans ces situations.

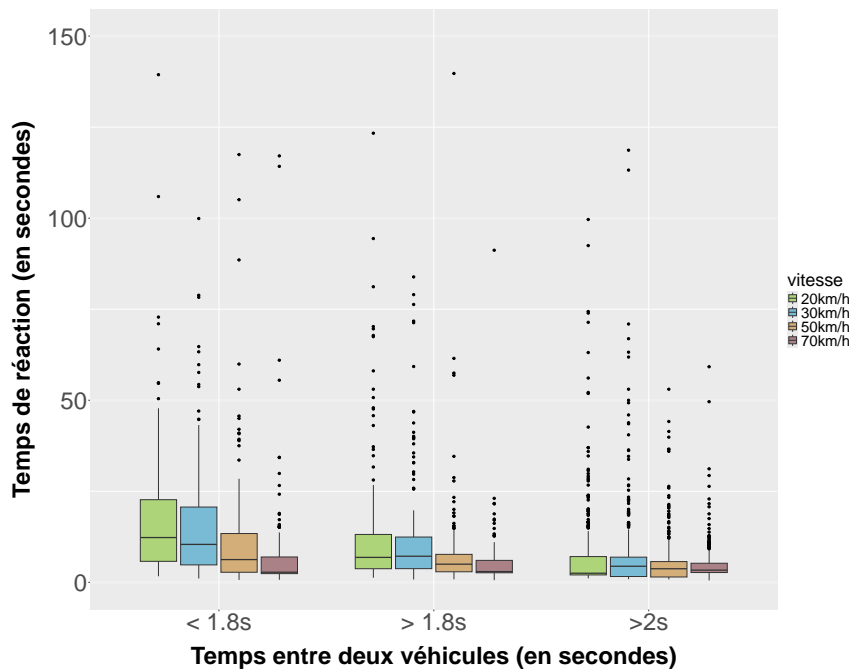


Figure II.36 – Temps de réaction en fonction du temps inter-véhiculaire et de la vitesse des véhicules sur la voie principale.

Implications

Ce questionnaire préliminaire nous a permis de faire une première sélection de valeurs. Ainsi, ne trouvant pas de différences significatives dans les temps de réaction entre les vitesses 20 et 30 km/h. Nous avons décidé d'étudier uniquement des vitesses à 30 km/h, 50 km/h et 70 km/h.

Lorsqu'il y a assez de distance entre les voitures, c'est-à-dire lorsqu'il y a plus de 2 secondes entre les véhicules, on observe peu d'ambiguïté. Plus de 75% des personnes ayant rempli notre questionnaire s'engagent sur l'intersection en moins de 6 secondes. En revanche, dans les situations à trafic dense, voire très dense, on observe une plus grande variabilité des réponses, il devient plus difficile de s'engager sur l'intersection, voire même impossible. Ce sont ces situations qu'il nous intéresse d'étudier dans un contexte de conduite autonome. Nous avons donc sélectionné deux densités de trafic d'intérêt :

- dense : TIV moyen inférieur à 2 secondes ;
- moyennement dense : TIV moyen égal à 2 secondes.

Enfin, on a pu observer des temps d'attente moyens allant de 5 secondes à 10 secondes et pour certaines situations, plus de 25% des participants attendaient plus de 10 secondes avant d'essayer de s'engager. Nous avons donc décidé d'étudier des temps d'attente avant de s'engager dans des situations entre 0 et 20 secondes.

2.2.2.2 Familiarisation avant une simulation en réalité virtuelle

Comme évoqué en introduction, nous avons mis en place un court protocole expérimental afin de tester si une phase de familiarisation de conduite en réalité virtuelle, avant la confrontation au simulateur de conduite autonome, avait un effet sur le sentiment de présence et l'acceptabilité.

Matériel & Méthodes

Recrutement & participants

Au total, 24 personnes ont participé à notre expérimentation préliminaire (voir tableau II.15). Âgés, en moyenne, de 27 ans. Ils avaient leur permis de conduire depuis 9 ans, en moyenne. Il est important de noter que sur les 24 participants, 4 ont présenté des symptômes de cybercinétose et n'ont pas pu terminer l'expérimentation. Les participants étaient soumis à une stimulation visuelle représentant un déplacement (passager d'un véhicule) qui ne correspondait pas à l'accélération réellement ressentie, le simulateur étant statique. Dans ce contexte, un conflit visuovestibulaire peut survenir, et entraîner des symptômes similaires à ceux expérimentés durant le phénomène de cinétose (mal des transports) (Académie Nationale de Médecine, 2023). Ces symptômes concerneraient entre 30 et 50% des utilisateurs de réalité virtuelle (Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail, 2021). Les réponses aux questionnaires des participants présentant ces symptômes n'ont pas été prises en compte. Tous les participants ont signé un formulaire de consentement libre et éclairé quant à la récolte et au traitement des données issues de l'expérimentation.

		Groupe "Avec" (n=10)	Groupe "Sans" (n=10)	Total (n=20)
		Moyennes (écart-type)		
Age		29,80 (13,95)	23,90 (2,42)	26,85 (10,20)
Permis		11,60 (14,39)	5,80 (2,53)	8,70 (10,48)
		Fréquences		
Sexe	Homme	7	8	15 (75%)
	Femme	3	2	5 (25%)

Tableau II.15 – Description démographique des participants de l'étude

Matériels

Nous avons fait passer une série de questionnaires aux participants de l'expérimentation.

Questionnaires pré-test

- Questionnaire démographique renseigne sur l'âge, le genre, l'année d'obtention du permis de conduire, etc. (voir annexe C.2).

- Questionnaire de susceptibilité au cybermalaise (Freiwald et al., 2020) permet d'étudier la probabilité de survenue d'un cybermalaise en amont de l'expérimentation (voir annexe C.3).
- Driving Behavior Questionnaire (ou DBQ) (Reason et al., 1990) permet d'évaluer la perception des comportements jugés "aberrants" par les conducteurs. Nous utilisons une version traduite validée en français du questionnaire (Guého et al., 2014) (voir annexe A.2).

Questionnaires post-test

- Simulator Sickness Questionnaire (ou SSQ) (Kennedy et al., 1993) permet d'évaluer la présence des symptômes connus de cinétose après une expérience en simulateur. Nous utilisons une version traduite et validée en français du questionnaire (Bouchard et al., 2007) (voir annexe A.3).
- Questionnaire mesurant 3 modalités liées à l'engagement dans notre tâche (voir annexe C.4) :
 - La confiance (O'Cass & Carlson, 2012) et l'acceptabilité ont été choisies, car le cœur de nos travaux porte sur la mesure de l'acceptabilité du comportement des véhicules autonomes mesurés à travers des questions issues du questionnaire UTAUT2 sur l'intention comportementale d'utiliser un véhicule autonome, la motivation hédonique, l'attitude envers les véhicules autonomes, et l'attente de performance (Venkatesh et al., 2003).
 - Le sentiment de présence est mesuré à l'aide de questions issues du Questionnaire de Présence (Witmer & Singer, 1998), dans une version traduite en français.
 - Le flow décrit un état d'extrême concentration, il peut renseigner sur l'implication dans une tâche (Csikszentmihalyi, 1975) et pourrait nous renseigner sur l'immersion d'un individu dans une tâche en réalité virtuelle. Nous utilisons ici des questions issues du questionnaire Flow4D-16 (Heutte & Fenouillet, 2010).

Environnement de simulation

La simulation a été développée sous Unity 2021.3.12. L'environnement est projeté dans un casque de réalité virtuelle HTC Vive Pro Eye.

Protocole expérimental

Le protocole est schématisé sur la figure II.37.

Les participants remplissent en pré-test les questionnaires démographiques, de susceptibilité au cybermalaise et le DBQ. Ils sont ensuite placés dans un fauteuil de conduite équipé d'un volant et de pédales. On les équipe ensuite du casque de réalité virtuelle dans lequel on projette un environnement de simulation (voir figure II.38). On explique aux participants que le véhicule dans lequel ils sont placés est un véhicule électrique, automatique et doté de capacités d'automatisation. En mode autonome, ce

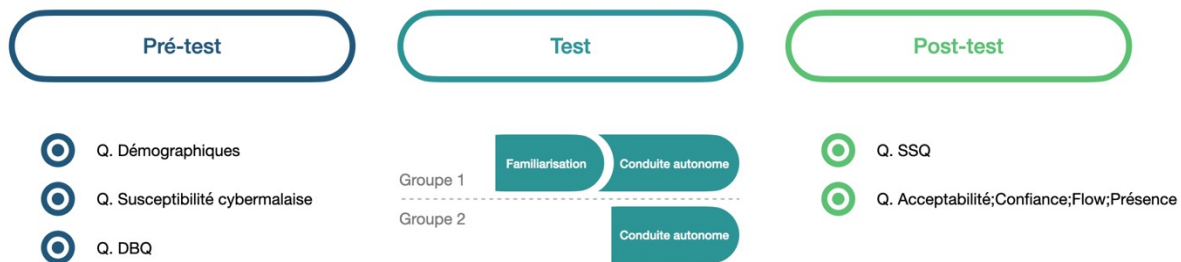


Figure II.37 – Schéma du protocole expérimental.

véhicule est capable de se déplacer sans intervention humaine et conduit le sujet d'un point A à un point B sans danger. Nous avons séparé les sujets en deux groupes de façon aléatoire : groupe "Avec" ou groupe "Sans" familiarisation.

Le groupe "Avec" démarre par une phase de familiarisation. Pendant cette phase de familiarisation, le sujet doit conduire le véhicule en mode manuel, à l'aide du volant et des pédales, et suivre un tracé GPS pendant environ 5 minutes. Arrivé à un certain point, le véhicule passe en mode autonome. Les actions du participant sur le véhicule n'ont alors plus d'effet. Le véhicule suit, de lui-même, un parcours GPS programmé, sur une durée de 5 minutes. Le groupe "Sans" démarre directement par la phase de conduite autonome de 5 minutes.

Une fois le trajet terminé, les participants des deux groupes remplissent les questionnaires post-tests sur le cybermalaise, la confiance, l'acceptabilité, la présence et le flow.



Figure II.38 – Photographie d'un des participants portant le casque de réalité virtuelle.

Résultats

L'analyse des résultats, à l'aide du test des rangs signés de Wilcoxon, montre une différence significative entre le groupe "Avec" et le groupe "Sans" sur le score obtenu en sentiment de présence ($p = 0.04$) : le groupe "Avec" présente un meilleur sentiment de présence que le groupe "Sans" (voir figure II.39 ; voir tableau II.16).

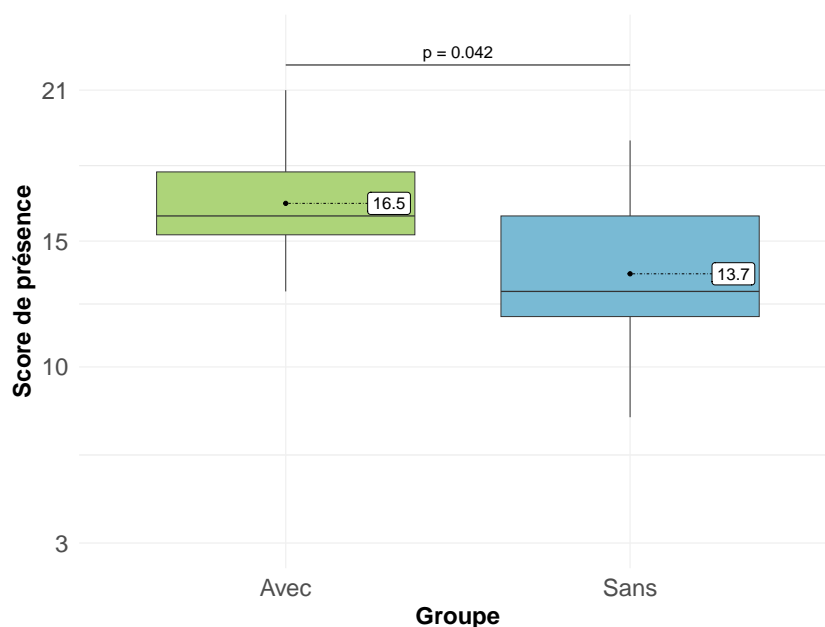


Figure II.39 – Résultats obtenus dans les deux groupes "Avec" et "Sans" pour le score de sentiment de présence.

Les résultats sont résumés dans le tableau II.16. Aucune différence significative entre les deux groupes n'a été observée sur les scores de confiance, de flow ou d'acceptabilité.

	Présence			Confiance			Flow			Acceptabilité		
	min=3	max=21		min=2	max=10		min=3	max=15		min=5	max=25	
	μ	m	σ	μ	m	σ	μ	m	σ	μ	m	σ
Avec	16,5	16	2,4	7,8	8	2,5	6,9	6,0	1,7	17,9	17,5	4,6
Sans	13,7	13	3,1	6,6	7,5	2,3	7,0	7,5	2,7	16,6	17,5	4,1

Tableau II.16 – Synthèse des résultats.

Implications

L'objectif de cette expérimentation préliminaire était de comprendre si une phase de familiarisation en réalité virtuelle durant laquelle le sujet est engagé dans une tâche de conduite pouvait favoriser le sentiment de présence lors d'une phase de simulation d'un véhicule autonome. Au regard de nos résultats, la phase de familiarisation en réalité virtuelle ne semble pas influencer l'acceptabilité chez nos participants lorsqu'ils sont dans un environnement virtuel à bord d'un véhicule autonome. Ce résultat est conforme aux travaux de Ebnali et al. (2020). Ainsi, une phase de familiarisation peut

influencer le sentiment de présence d'un sujet en réalité virtuelle face à un véhicule autonome. Mais, il a été intéressant de noter dans cette étude que la présence d'une phase de familiarisation n'influence pas l'acceptabilité, le flow et la confiance que le sujet peut ressentir vis-à-vis d'un véhicule autonome dans le contexte de notre simulateur.

N'ayant pas observé de différence d'acceptabilité *in situ* avec ou sans phase de familiarisation, nous avons supprimé cette étape pour nos expérimentations futures.

2.2.3 Expérimentation

L'expérimentation que nous présentons cherche à étudier les différentes influences sur l'acceptabilité *in situ* du comportement d'un véhicule autonome :

- une influence sociale à travers un amorçage sur la sécurité perçue ;
- une influence contextuelle à travers le type de route dans lequel évolue le véhicule autonome et la densité du trafic ;
- une influence des paramètres comportementaux du véhicule en étudiant le temps d'attente ;
- une influence des caractéristiques démographiques des passagers à travers l'étude de l'âge, du genre, de l'expérience de conduite et de la familiarité avec les véhicules autonomes.

2.2.3.1 Matériel & Méthodes

Il s'agit d'une étude expérimentale en laboratoire. Les participants ont été recrutés sur la base du volontariat en répondant à un email envoyé au préalable via différentes listes de diffusion au sein du laboratoire et de l'université associée et partagé sur les réseaux sociaux.

Le modèle UTAUT2 place l'expérience comme un modérateur des paramètres du modèle (Venkatesh et al., 2012), Nous avons donc ouvert l'expérimentation aux participants français avec ou sans permis de conduire pour étudier l'effet de l'(in)expérience de conduite.

La collecte des données au laboratoire s'est déroulée entre mars 2023 et mai 2023.

Matériel

Nous avons placé les participants dans un simulateur de conduite composé d'un siège, d'un volant, de pédales et d'un levier de vitesse. La simulation a été développée dans Unity 2021.3.12f1 et présente un environnement routier urbain en 3D. Le programme est conçu pour afficher le point de vue d'une personne assise au volant d'un véhicule qui suit un itinéraire planifié sur une période de 18 minutes. La simulation a été conçue pour être projetée dans un casque de réalité virtuelle. Pour cette expérience, nous avons utilisé un casque HTC Vive Pro Eye. Les participants étaient ainsi complètement immergés dans la simulation comme s'ils étaient à l'intérieur du véhicule. Le volant et les pédales du simulateur n'ont pas été directement utilisés pendant la simulation, mais ont servi à situer et à positionner le participant dans la simulation en réalité virtuelle (voir figure II.40).



Figure II.40 – Photographie d'un participant portant le casque de réalité virtuelle, immergé dans l'environnement de simulation.

Simulation et situations d'intérêt

Durant la simulation, les participants ont été immergés dans un trajet virtuel. Ils sont placés dans un véhicule autonome qui suit un trajet parcourant 14 contextes routiers d'intérêts. Ces situations sont divisées en 4 catégories :

- carrefour à sens giratoire (RA);
- dépassement en ligne droite (SL);
- intersection avec un STOP (IS);
- intersection avec un feu de signalisation (TL).

Le véhicule parcourt chacun de ces contextes routiers plusieurs fois et nous faisons varier la densité de trafic ainsi que le temps avant qu'il ne s'insère dans l'intersection (voir figure II.41).

- Temps d'attente : 4 variations (0 s, 10 s, 15 s et 20 s);
- Vitesse : 3 variations (30 km/h, 50 km/h et 90 km/h);
- Distance entre les véhicules, cette variable indique la densité de trafic : à 30 km/h, lorsque la distance est de 16 m entre les véhicules, il y a un peu moins de 2 secondes en moyenne entre les véhicules, lorsque la distance est de 27 m, il y a un peu plus de 3 secondes en moyenne entre les véhicules.

Le tableau II.17 décrit les 14 situations.

Type de route	Vitesse (km/h)	Distance (m)	Temps d'attente (s)	Explication	ID
Giratoire	30	16	20	Le véhicule s'arrête à l'entrée du giratoire et attend 20 secondes avant de forcer le passage.	3

Type de route	Vitesse (km/h)	Distance (m)	Temps d'attente (s)	Explication	ID
Giratoire	30	16	15	Le véhicule s'arrête à l'entrée du giratoire et attend 15 secondes avant de forcer le passage.	4
Giratoire	30	16	0	Le véhicule s'arrête à l'entrée du giratoire et attend 0 seconde avant de forcer le passage.	5
Giratoire	30	25	15	Le véhicule s'arrête à l'entrée du giratoire et attend 15 secondes avant de forcer le passage.	6
Giratoire	30	25	10	Le véhicule s'arrête à l'entrée du giratoire et attend 10 secondes avant de forcer le passage.	7
Giratoire	30	25	0	Le véhicule s'arrête à l'entrée du giratoire et attend 0 seconde avant de forcer le passage.	14
Ligne droite	90	5	/	Sur une voie rapide (rocade), le véhicule attend d'être à moins de 5 m du véhicule devant lui avant de le dépasser. Il se rabat à moins de 5 m devant le véhicule dépassé.	2
Ligne droite	90	20	/	Sur une voie rapide (rocade), le véhicule attend d'être à moins de 20 m du véhicule devant lui avant de le dépasser. Il se rabat à moins de 20 m devant le véhicule dépassé.	1
Ligne droite	50	5/20	/	Le véhicule attend d'être à moins de 5 m du véhicule devant lui avant de le dépasser. Il se rabat à moins de 20 m devant le véhicule dépassé.	12
STOP	50	27	20	Le véhicule attend 20 secondes avant de forcer le passage.	9
STOP	50	27	10	Le véhicule attend 10 secondes avant de forcer le passage.	11
STOP	50	27	0	Le véhicule attend 0 seconde avant de forcer le passage.	13
Feu de signalisation	50	20	/	Le véhicule attend d'avoir la place de s'engager sans empêcher le passage des autres véhicules, même si le feu passe au vert.	10
Feu de signalisation	50	20	/	Le véhicule passe dès que le feu passe au vert.	8

Tableau II.17 – Tableau reprenant la liste des situations présentées durant l'expérimentation.

- RA Carrefour à sens giratoire
- IS Intersection avec STOP
- TL Intersection avec feu de signalisation
- SL Dépassement en ligne droite

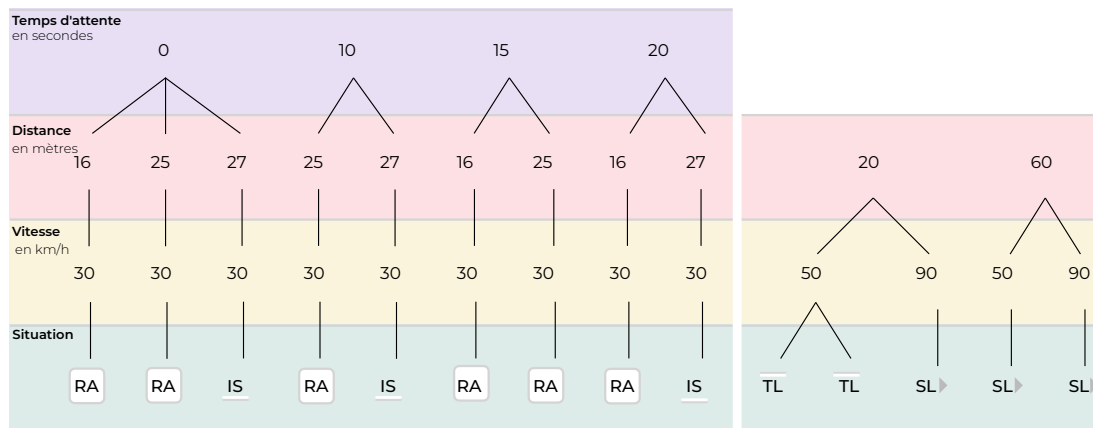


Figure II.41 – La figure illustre les différents paramètres examinés dans les 14 scénarios du protocole expérimental. Les variables indépendantes sont le temps d'attente (avec quatre variations, tandis que la cinquième variation représente les situations où le temps n'a pas été étudié), la distance (avec cinq variations), la vitesse (avec trois variations) et le type de route (avec quatre variations).

Chacune des 14 situations a ensuite été extraite sous la forme d'une vidéo prise du point de vue d'un passager assis derrière le volant. Le champ de vision a été étendu pour permettre d'avoir une vision sur les deux rétroviseurs du véhicule lorsque la vidéo est affichée sur un dispositif à trois écrans (voir figure II.42).



Figure II.42 – Illustration du point de vue perçu dans les vidéos, avec un champ de vision étendu.

Protocole expérimental

Le protocole expérimental est présenté sur la figure II.43.

Après avoir signé un formulaire de consentement libre et éclairé, les participants ont été invités à remplir une série de questionnaires sur une tablette :

- Formulaire démographique ;
- Échelle de stress perçu (PSS) (Cohen et al., 1983) dans une traduction française (voir annexe C.7) ;
- Questionnaire sur le cybermalaise (SSQ) (Bouchard et al., 2007), nous permettant de voir les effets de la simulation en réalité virtuelle (voir annexe A.3) ;

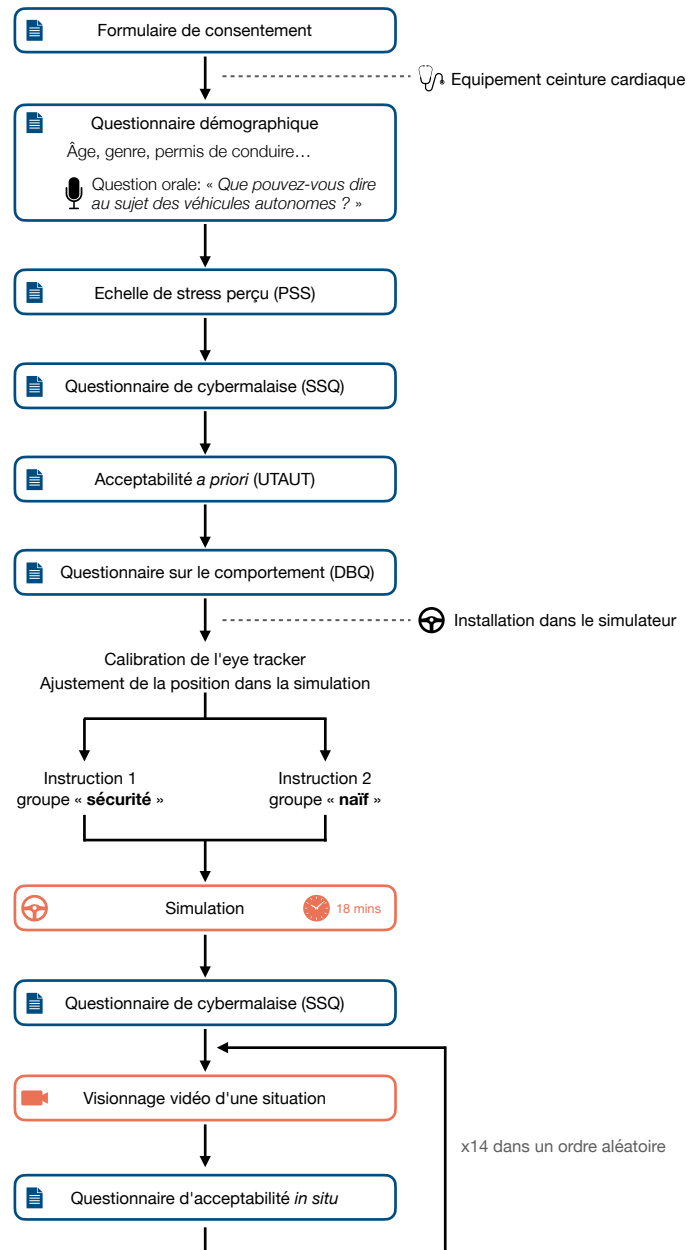


Figure II.43 – Schéma présentant le protocole expérimental.

- Questionnaire UTAUT, afin de mesurer l'acceptabilité *a priori* (avant la confrontation avec le véhicule autonome dans le simulateur). Donne un score d'acceptabilité *a priori* compris entre 23 et 115. (Venkatesh et al., 2003) (voir annexe A.1);
- Questionnaire sur le comportement au volant (DBQ) (Reason et al., 1990), afin de mesurer le comportement au volant des participants, dans une version traduite et validée en français (Guého et al., 2014) (voir annexe A.2).

Une fois cette série de questionnaires complétée, les participants ont été installés dans le simulateur. Comme il n'était pas nécessaire d'utiliser le volant et les pédales, les participants ont simplement été invités à s'installer confortablement. Ils ont ensuite été équipés du casque de réalité virtuelle. Les participants ont ensuite été immergés dans l'environnement de simulation. Une étape de calibration leur a permis d'ajuster leur

positionnement dans le véhicule afin qu'ils se sentent parfaitement à l'aise à l'intérieur du véhicule modélisé dans la simulation.

À ce stade du protocole, les participants ont été répartis aléatoirement dans un groupe différent en fonction des instructions qu'ils avaient reçues. Les instructions suivantes ont été données (en français) :

*“Vous êtes donc passager d'un véhicule autonome de niveau 5. Le niveau 5 signifie que ce véhicule est capable d'agir et de réagir par lui-même et sans interventions extérieures à tous les évènements qui peuvent survenir sur la route. Vous ne pouvez pas interagir avec les commandes du véhicule qui va suivre un tracé GPS et vous emmener à la destination prévue pour cette expérience. **Les différents capteurs du véhicule lui permettent de détecter les éléments environnants (autres véhicules, signalétique, bâtiment ...).** Vous devez savoir que **toutes les décisions prises par le véhicule sont calculées et que la sécurité est l'élément clé de chacune de ces décisions. Chaque action est réalisée pour vous garder en sécurité en toutes conditions.** Durant le trajet, nous n'interagissons pas avec vous, comme si vous étiez seul à bord de votre véhicule. Vous pouvez cependant exprimer votre ressenti à haute voix et si vous ressentez une gêne ou souhaitez arrêter l'expérience, n'hésitez surtout pas à nous en faire part.”*

- Les participants du groupe “sécurité” ont reçu cette instruction dans son intégralité, avec une clarification (en gras dans le texte) sur la sécurité du comportement du véhicule autonome.
- Les participants du groupe “naïf” n'ont pas reçu l'instruction en gras et n'ont donc pas d'amorce de sécurité.

Une fois les instructions reçues, la simulation commence, les participants suivent depuis l'intérieur du véhicule un trajet de 18 minutes contenant les 14 situations d'intérêt. Le trajet est indentique pour tous les participants. À la fin du trajet, le casque est retiré et les participants sont invités à remplir une seconde fois le questionnaire sur le cybermalaise (SSQ).

La deuxième phase de l'expérience consistait en une phase de reconfrontation. Au cours de cette phase, les participants ont visionné les vidéos des 14 situations qu'ils avaient vécues dans le simulateur. Pour chaque situation, les participants ont été invités à remplir un questionnaire sur l'acceptabilité *in situ* de la situation. Ce questionnaire, composé de 13 questions, mesure l'acceptabilité (Venkatesh et al., 2012), la présence (Witmer & Singer, 1998), la confiance (Nees, 2016; O'Cass & Carlson, 2012; Ortega Egea & Román González, 2011), et les composantes émotionnelles (Bradley & Lang, 1994; Scherer, 2005; Shuman et al., 2015) (voir annexe C.8). Ce questionnaire donne un score d'acceptabilité compris entre 13 et 65.

Analyses statistiques

L'expérience vise à évaluer l'effet de différentes conditions expérimentales sur l'acceptabilité des véhicules autonomes. Les variables démographiques prises en compte sont l'âge et le sexe. Les variables indépendantes comprennent la condition (naïve, sûre), le temps d'attente (0, 10, 15, 20 secondes), la distance (16, 20, 25, 27, 60 mètres), la vitesse (30, 50, 90 kilomètres par heure) et la situation de conduite (rond-point, feu de circulation, panneau d'arrêt, ligne droite). La variable dépendante mesurée était le score d'acceptabilité *in situ*, évalué sur une échelle de 0 à 65 en mesures répétées. Les mesures de l'acceptabilité au cours de cette expérience ont été effectuées 14 fois dans le même groupe d'individus. L'analyse d'un échantillon de données appariées dans un petit échantillon pour lequel la variable étudiée n'est pas normalement distribuée (dans le sens où elle ne suit pas une distribution normale) a conduit à l'utilisation de tests non paramétriques. La normalité a été vérifiée d'abord graphiquement, puis à l'aide d'un test de Shapiro-Wilkoxon. Les différences de familiarité et d'acceptabilité *a priori* dans les deux conditions, ainsi que les différences d'acceptabilité *in situ*, ont été mesurées à l'aide d'un test de Wilcoxon. La différence d'acceptabilité en fonction de la situation et des variables indépendantes avec plus de 2 modalités a été mise en évidence à l'aide du test de Kruskal-Wallis, suivi du test post-hoc de Dunn. Une classification ascendante hiérarchique a été utilisée pour regrouper les individus en fonction de leur score d'acceptabilité *a priori*.

Pour plus de détail, se référer au chapitre 1.

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec à l'aide du langage R dans sa version 4.3.1.

2.2.3.2 Résultats

Population

30 personnes ont participé à notre protocole expérimental. 15 hommes et 15 femmes, de 19 à 65 ans ($\mu = 30$; $\sigma = 12$). Sur les 30 participants, la majorité était titulaire d'un permis de conduire français autorisant la conduite d'une voiture sur route ouverte, 5 sujets étaient également titulaires d'un permis de conduire autorisant la conduite d'une moto, et 1 était titulaire d'un permis autorisant la conduite d'un petit camion (voir tableau II.18).

	Hommes			Femmes			Total		
	μ	m	σ	μ	m	σ	μ	m	σ
Âge	24,50	25	6,36	34,47	29	15,04	30,43	26	12,06
Permis B		13			14			27	
Permis A		4			1			5	
Permis C		0			1			1	
Sans permis		2			1			3	

Tableau II.18 – Résultat des questionnaires démographique. L'âge est mesuré en années au jour de passation de l'expérimentation. Permis B désigne le nombre de participants possédant un permis de conduire permettant la conduite d'une voiture. Le permis A autorise la conduite d'une moto et le permis C d'un camion de faible poids.

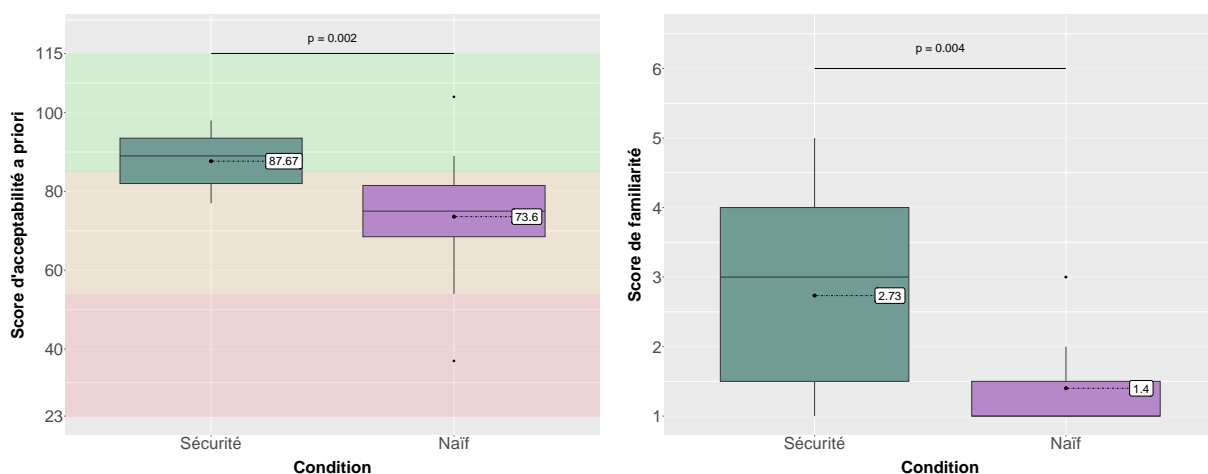
Nous avons inclus dans cette expérimentation des participants ne possédant pas de permis de conduire pour vérifier si le point de vue de quelqu'un n'ayant pas passé le Code de la route et n'ayant pas d'expérience en tant que conducteur avait une influence sur l'acceptabilité.

En moyenne, les participants à l'expérience n'étaient pas des utilisateurs fréquents de la réalité virtuelle (voir tableau II.19). Ils ne suivaient que modérément le développement des véhicules autonomes et étaient plus souvent conducteurs que passagers. Ils étaient relativement peu familiarisés avec les véhicules autonomes. Les participants ont été divisés en deux groupes : "naïf" et "sécurité", selon qu'ils ont reçu ou non une introduction mettant l'accent sur la sécurité du véhicule pendant l'expérience (voir tableau II.19).

15 sujets faisaient partie du groupe "sécurité" et 15 du groupe "naïf". La répartition des participants a été effectuée de façon aléatoire. Nous avons pu mettre en évidence une différence significative entre les deux groupes. Les participants du groupe "sécurité" connaissaient mieux les véhicules autonomes (avec un score moyen de 2,73 contre 1,40, $p < 2,2 \cdot 10^{-16}$, voir tableau II.19, voir figure II.44a) et montraient une acceptabilité *a priori* plus élevée que les participants du groupe "naïf" (avec un score moyen de 87,57 contre 73,69, $p = 0,002$, voir tableau II.19, voir figure II.44b). Mais, dans les 2 cas, l'acceptabilité *a priori* est relativement importante (de moyenne à élevée).

	min/max	"sécurité"		"naïf"		les deux	
		μ	σ	μ	σ	μ	σd
Usage de la réalité virtuelle	1/5	1,47	0,83	1,33	0,49	1,40	0,46
Familiarité avec les véhicules autonomes	1/5	2,73	1,33	1,40	0,74	2,07	1,26
Évolution de l'automatisation des véhicules	1/5	2,60	1,24	1,87	1,06	2,23	1,19
Fréquence en tant que conducteur	1/5	2,87	1,36	3,47	1,51	3,17	1,44
Fréquence en tant que passager	1/5	2,60	0,83	2,80	0,68	2,70	0,56
Acceptabilité <i>a priori</i> (UTAUT)	23/115	87,57	7,19	73,69	16,26	80,89	14,06
Stress (PSS)	10/50	21,64	4,70	28,00	5,43	24,70	5,93
Profil de conducteur (DBQ)							
INE (Erreurs d'inexpérience)		9,21	2,08	9,69	3,73	9,44	2,94
INA (Erreurs d'inattention)		9,36	2,73	10,38	1,89	9,85	2,38
CP (Comportements positifs)		20,42	4,83	20,00	5,18	20,22	4,91
VA (Violations agressives)		6,79	2,04	7,46	2,60	7,11	2,31
F (Erreurs dangereuses)		8,64	1,55	9,46	1,81	9,04	1,70
VO (Violations ordinaires)		5,21	2,22	4,69	1,11	4,96	1,76

Tableau II.19 – Résultats des réponses aux questionnaires démographiques. La deuxième partie du tableau détaille les résultats des questionnaires *a priori* sur l'acceptabilité, le stress et le profil de conduite. Les chiffres en gras représentent une différence significative entre les résultats du groupe "naïf" et du groupe "sécurité" (mesurée avec le test de Wilcoxon).



(a) Score d'acceptabilité *a priori* en fonction du groupe "sécurité" ou "naïf".

(b) Score de familiarité au véhicule autonome en fonction du groupe "sécurité" ou "naïf".

Figure II.44 – Résultats des scores d'acceptabilité et de familiarité avant l'immersion en simulateur en fonction du groupe "sécurité" ou "naïf".

Effet des variables démographiques

Acceptabilité *in situ* en fonction du genre

Notre échantillon comprenait 15 hommes (50%) et 15 femmes (50%). Nous avons observé une différence significative dans l'acceptabilité *in situ* indépendamment du groupe et de la situation entre les hommes et les femmes. Les femmes avaient un score moyen d'acceptabilité *in situ* significativement plus élevé que les hommes ($\mu_{\text{femmes}} = 42,11$; $\mu_{\text{hommes}} = 38,95$; Wilcoxon : $p = 0,04$; voir figure II.45).

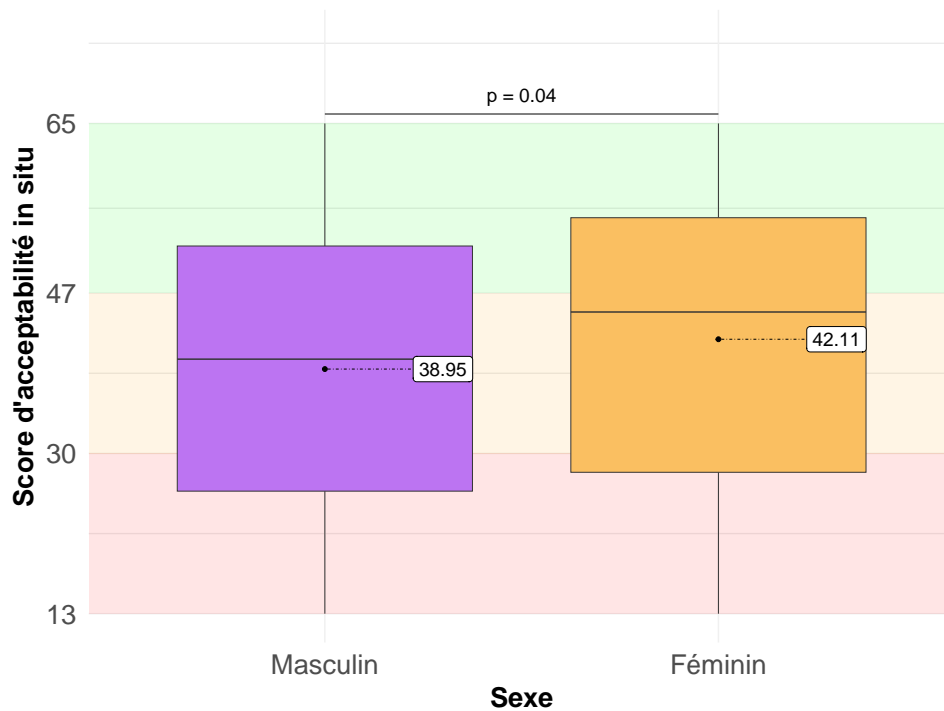


Figure II.45 – Comparaison de l'acceptabilité *in situ* entre les femmes et les hommes.

Acceptabilité *in situ* en fonction de l'expérience de conduite

L'expérience a été réalisée en tenant compte du fait que le participant était ou non titulaire d'un permis de conduire. L'étude n'a pas révélé de différence significative en termes d'acceptabilité *in situ* entre les participants totalement inexpérimentés et ceux qui étaient titulaires d'un permis ($\mu_{\text{expérimenté}} = 40,83$; $\mu_{\text{inexpérimenté}} = 37,79$; Wilcoxon : $p = 0,2435$; voir figure II.46).

Acceptabilité en fonction de l'âge

Nous avons étudié la relation entre l'âge et l'acceptabilité *in situ* dans nos différentes situations. Aucune corrélation n'a été trouvée entre l'âge des participants et l'acceptabilité *in situ* au cours de cette expérience.

Résultats généraux de l'acceptabilité *in situ*

Effet de l'amorçage sur l'acceptabilité *in situ*

Les résultats ont montré une différence significative de l'acceptabilité *in situ* mesurée entre les participants du groupe "sécurité" et ceux du groupe "naïf". L'acceptabilité *in situ* est plus élevée pour les participants du groupe "sécurité" ($\mu_{\text{sécurité}} = 44,38$; $\mu_{\text{naïf}} = 36,69$; Wilcoxon : $p = 5,204 \cdot 10^{-7}$; voir figure II.47; voir tableau II.20).

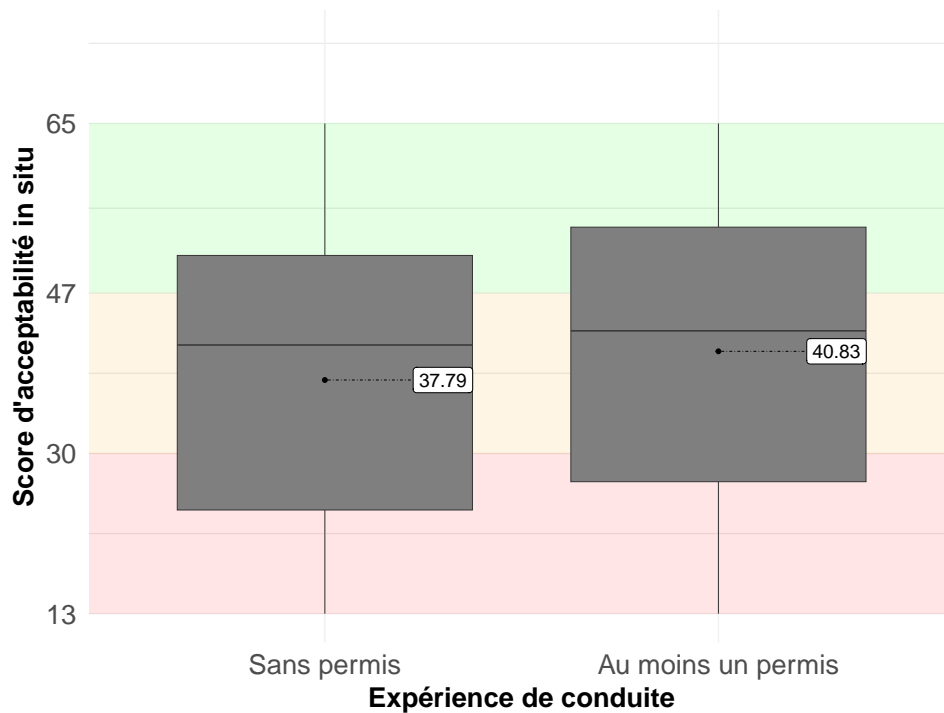


Figure II.46 – Comparaison de l'acceptabilité *in situ* entre les participants ayant au moins un permis de conduire et ceux n'ayant aucun permis.

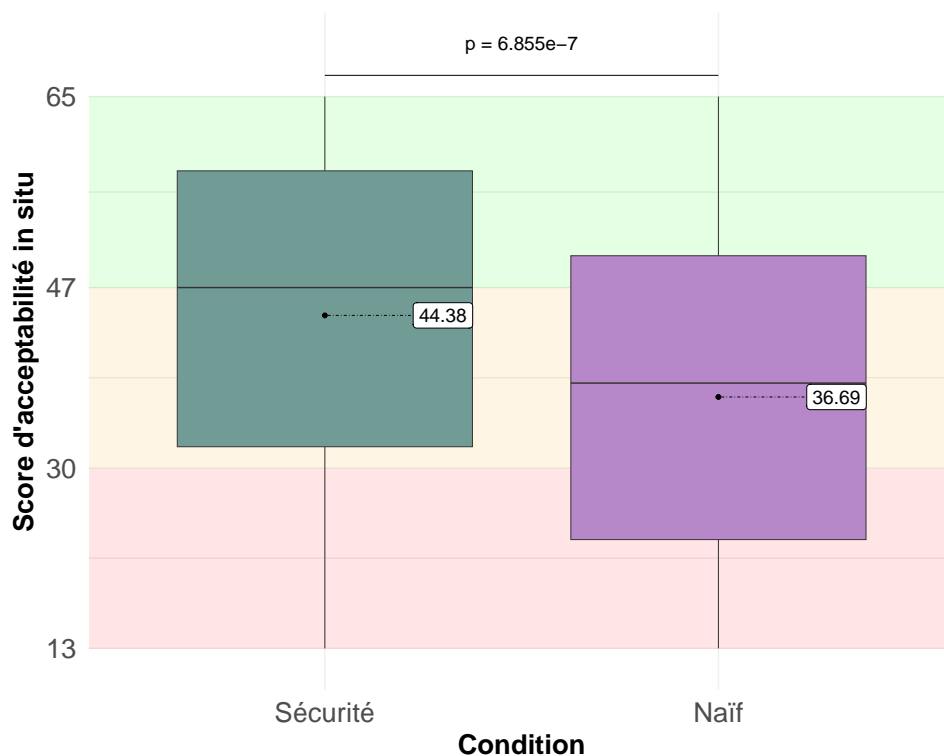


Figure II.47 – Comparaison de l'acceptabilité *in situ* entre la condition "sécurité" et la condition "naïve". La figure montre la distribution des scores dans chaque condition.

Effet de la familiarité sur l'acceptabilité *in situ*

Nous avons séparé les participants en deux groupes :

	“sécurité”	“naïf”	total
μ	44,38	36,69	40,53
m	47	38	42
σ	16,22	15,17	16,15

Tableau II.20 – Résultats du score d’acceptabilité *in situ* en fonction de la condition.

- Familiarité élevée : lorsque le score au questionnaire sur la familiarité était supérieur ou égal à 3 sur 5.
- Familiarité basse : lorsque le score au questionnaire sur la familiarité était inférieur à 3.

Le tableau II.21 montre le score d’acceptabilité *in situ* en fonction de la condition et du niveau de familiarité. On observe une différence significative d’acceptabilité *in situ* entre les participants du groupe “sécurité” et ceux du groupe “naïf” parmi les participants avec une familiarité faible. Dans ce groupe, les participants du groupe “sécurité” ont une acceptabilité *in situ* plus élevée ($\mu_{\text{sécurité}} = 87,57$; $\mu_{\text{naïf}} = 35,79$; Wilcoxon : $p = 7,287 \cdot 10^{-6}$). En revanche, nous n’avons pas mis en évidence de différence significative entre les participants des deux groupes parmi ceux ayant une familiarité plus élevée ($\mu_{\text{sécurité}} = 43,95$; $\mu_{\text{naïf}} = 42,57$; Wilcoxon : $p > 0,05$).

		“sécurité”		“naïf”	
		μ	σ	μ	σ
Familiarité	Elevée	43,95 (n=9)	16,98	42,57 (n=2)	10,41
	Basse	45,01 (n=6)	15,11	35,79 (n=13)	15,60

Tableau II.21 – Effet de la condition sur l’acceptabilité *in situ* en fonction de la familiarité avec les véhicules autonomes. Le nombre entre parenthèses représente la taille du groupe.

On observe que l’acceptabilité *in situ* est modifiée en présence d’un amorçage uniquement lorsque le niveau de familiarité au véhicule autonome est bas.

Effet de l’acceptabilité *a priori* (UTAUT) sur l’acceptabilité *in situ*

Nous avons séparé les participants en trois groupes :

- Acceptabilité *a priori* élevée : lorsque le score au questionnaire UTAUT est supérieur ou égal à 85 sur 115 ;
- Acceptabilité *a priori* moyenne : lorsque le score au questionnaire UTAUT est compris entre 54 et 85 ;
- Acceptabilité *a priori* faible : lorsque le score au questionnaire UTAUT est inférieur à 54.

Les participants du groupe “sécurité” présentaient une acceptabilité *a priori* plus élevée, avec un score moyen de 41,01 sur 115 contre 35,79 dans le groupe “naïf” (Wilcoxon : $p = 7,287 \cdot 10^{-6}$, voir tableau II.18). Le tableau II.23 montre le score d’acceptabilité *in*

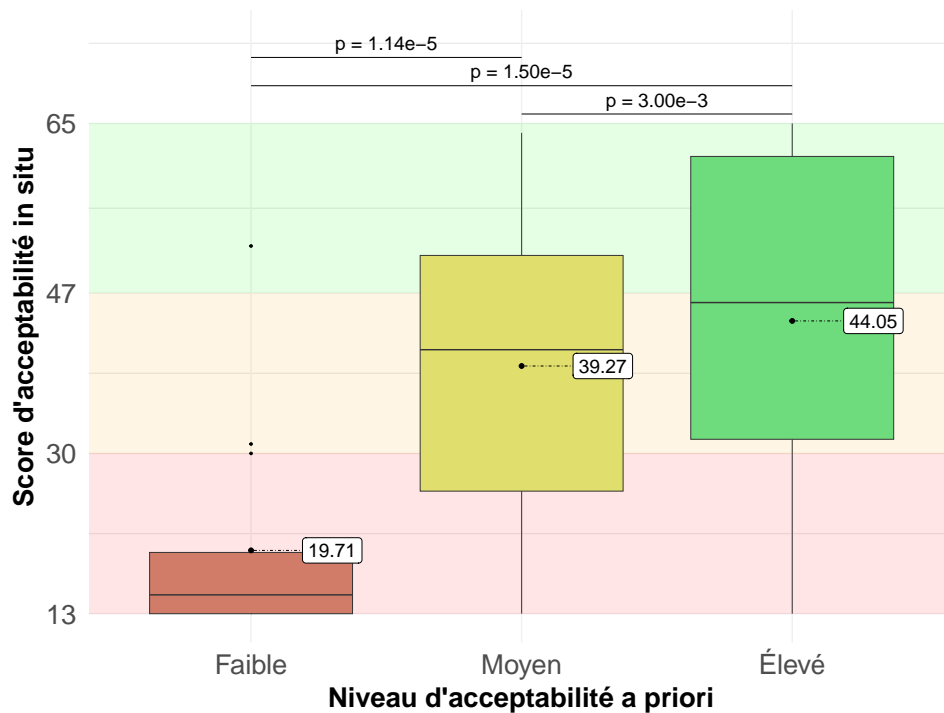


Figure II.48 – Comparaison de l'acceptabilité de *in situ* en fonction du niveau d'acceptabilité *a priori*.

	“sécurité”	“naïf”
Élevé	10	2
Moyen	5	12
Faible	0	1

Tableau II.22 – Tableau de contingence montrant le nombre de participants en fonction du niveau d'acceptabilité *a priori* (élevé, moyen ou faible) et de la condition expérimentale (“Sécurité” ou “Naïf”).

situ en fonction de la condition et du niveau d'acceptabilité *a priori*. On observe une différence significative d'acceptabilité *in situ* entre les participants du groupe “sécurité” et ceux du groupe “naïf” parmi les participants avec une acceptabilité *a priori* la plus basse. Dans ce groupe, les participants du groupe “sécurité” ont une acceptabilité *in situ* plus élevée ($\mu_{\text{sécurité}} = 45$; $\mu_{\text{naïf}} = 35$; Wilcoxon : $p = 1,90 \cdot 10^{-5}$). De même, on observe une différence significative d'acceptabilité *in situ* entre les participants du groupe “sécurité” et ceux du groupe “naïf” parmi les participants avec une acceptabilité *a priori* élevée. Dans ce groupe, les participants du groupe “sécurité” ont une acceptabilité *in situ* plus élevée ($\mu_{\text{sécurité}} = 44,22$; $\mu_{\text{naïf}} = 39,21$; Wilcoxon : $p = 9,89 \cdot 10^{-3}$).

Les participants du groupe “sécurité” ont montré une acceptabilité *in situ* significativement plus élevée que ceux du groupe “naïf”, tant chez les individus ayant une acceptabilité *a priori* basse que chez ceux avec une acceptabilité *a priori* élevée.

		"sécurité"		"naïf"		Total	
		μ	σ	μ	σ	μ	σ
UTAUT	Elevé	45.42	17,53	37.25	15.07	44.05	17.37
	Moyen	42.30	13.14	38.01	14.68	38.27	14.35
	Faible	/	/	19.71	11.10	19.71	11.10

Tableau II.23 – Effet de la condition sur l'acceptabilité *in situ* en fonction de l'acceptabilité *a priori*.

Résultats selon le contexte routier

Effet du type de route sur l'acceptabilité *in situ*

Les variations de l'acceptabilité *in situ* ont été étudiées dans notre expérience en fonction des différents types de route : carrefour à sens giratoire, intersection avec panneau STOP, intersection avec feu de signalisation et dépassement en ligne droite. Les résultats montrent une différence significative dans l'acceptabilité *in situ* mesurée selon les types de route (Kruskal-Wallis : $\chi^2 = 17,762$, $df = 3$, $p = 4,93 \cdot 10^{-4}$). Un test post-hoc a montré une différence significative entre les intersections avec panneaux STOP et les autres situations ($\mu_{IS} = 34,52$; $\mu_{RA} = 41,53$; $\mu_{SL} = 41,17$; $\mu_{TL} = 45,57$). Dans l'ensemble, l'intersection avec le panneau STOP présente un niveau d'acceptabilité *in situ* plus faible que les 3 autres (voir figure II.49 ; voir tableau II.24).

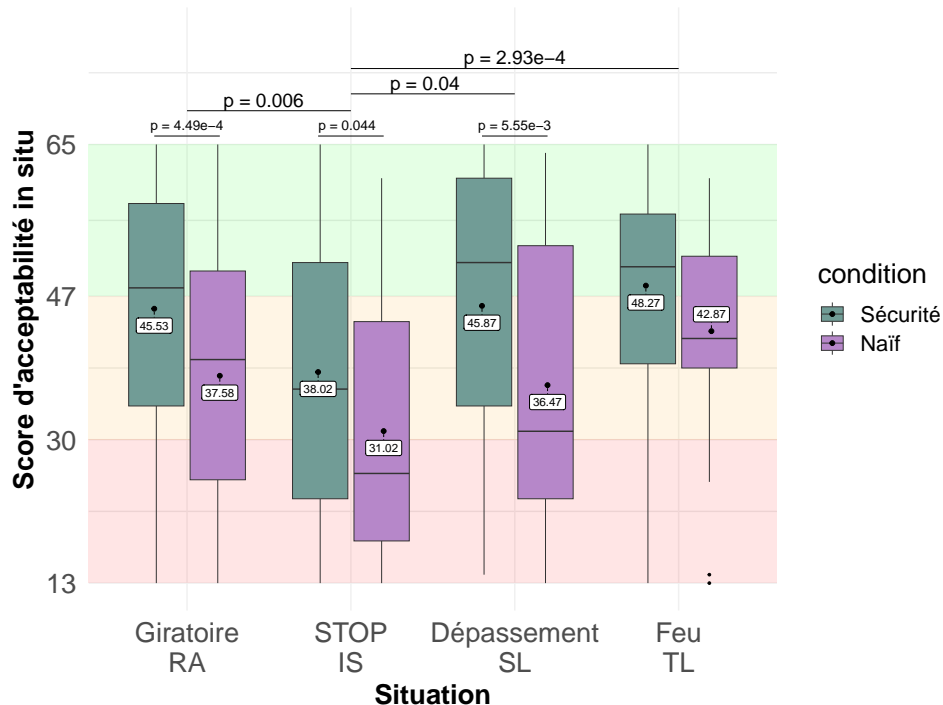


Figure II.49 – Comparaison de l'acceptabilité de *in situ* entre les conditions "sécurité" et "naïf" pour chaque type de route ; les comparaisons post-hoc sont des tests de Wilcoxon.

	"sécurité"			"naïf"			Total		
	μ	m	σ	μ	m	σ	μ	m	σ
Giratoire	45,53	48,0	16,20	37,58	39,5	14,86	41,53	44,0	16,00
STOP	38,02	36,0	17,35	31,02	26,0	14,70	34,52	32,0	16,37
Dépassement	45,87	51,0	16,19	36,47	31,0	16,75	41,17	40,5	17,05
Feu	48,27	50,5	12,31	42,87	42,0	11,61	45,57	47,5	12,17

Tableau II.24 – Effet du type de situation sur l'acceptabilité *in situ* en fonction de la condition.

Effet de la densité de trafic sur l'acceptabilité *in situ*

Au cours de cette expérience, nous avons fait varier la densité du trafic uniquement pour les carrefours à sens giratoire. Les résultats ont montré une différence significative entre l'acceptabilité *in situ* mesurée dans les situations où le trafic est dense et l'acceptabilité *in situ* mesurée dans les situations où le trafic est fluide. L'acceptabilité mesurée était plus élevée dans les situations de trafic dense ($\mu_{\text{dense}} = 44,38$; $\mu_{\text{fluide}} = 37,91$; Wilcoxon : $p = 0,01$). Lorsque l'on examine les différences entre les deux conditions, l'acceptabilité mesurée était toujours plus élevée pour les participants de la condition "sécurité" que pour ceux de la condition "naïve" (voir tableau II.25 ; voir figure II.50).

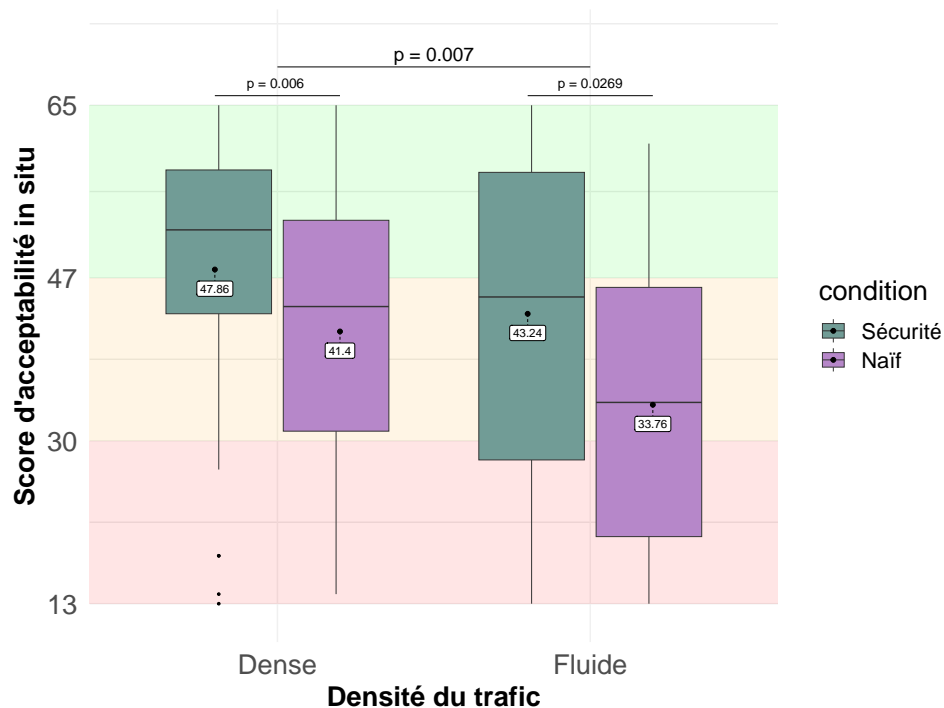


Figure II.50 – Comparaison de l'acceptabilité *in situ* en fonction de la densité de trafic.

	"sécurité"			"naïf"			Total		
	μ	m	σ	μ	m	σ	μ	m	σ
Dense	47,86	52	14,69	41,40	44	14,18	44,60	47	14,71
Fluide	43,24	45	17,41	33,76	34	14,69	38,50	40	16,71

Tableau II.25 – Score d'acceptabilité *in situ* en fonction de la densité de trafic et de la condition.

Résultats en fonction des paramètres du comportement du véhicule autonome

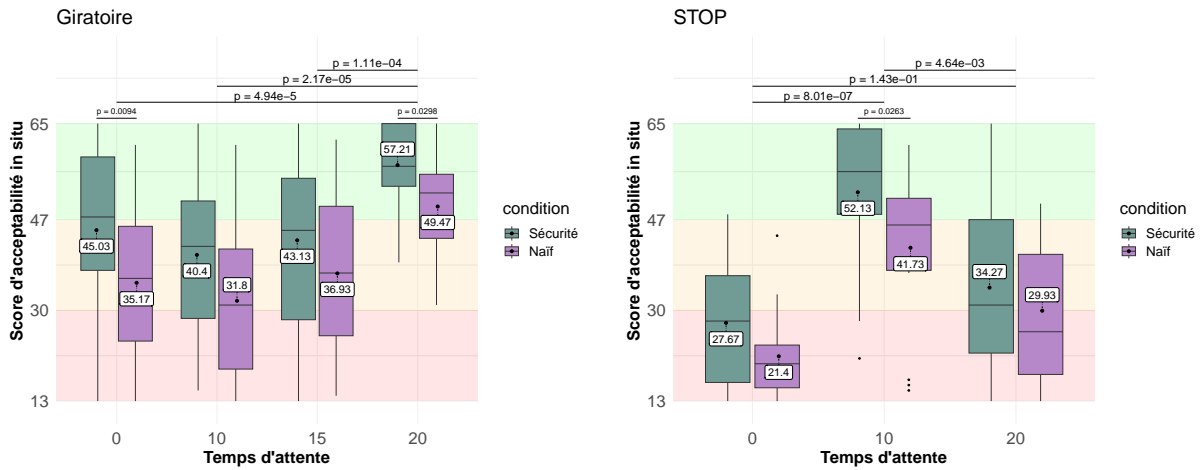
Effet du temps d'attente sur l'acceptabilité *in situ*

Le temps d'attente des véhicules autonomes avant de s'engager dans une situation a été étudié. Cette étude s'est concentrée sur les carrefours à sens giratoire et les intersections dotées d'un panneau STOP. Dans les carrefours à sens giratoire, les résultats ont montré une différence significative dans l'acceptabilité *in situ* mesurée entre les temps d'attente (Kruskal-Wallis : $\chi^2 = 21,30$, $df = 3$, $p = 9,123 \cdot 10^{-5}$). Un test post-hoc a révélé une différence significative entre les carrefours à sens giratoire où les véhicules attendent le plus longtemps (20 secondes) et les autres carrefours à sens giratoire ($\mu_{0\text{second}} = 39,29$; $\mu_{10\text{seconds}} = 36,00$; $\mu_{15\text{seconds}} = 39,53$; $\mu_{20\text{seconds}} = 53,20$; voir figure II.51a). Si l'on examine les différences d'acceptabilité en fonction de la condition, la condition "sécurité" semble toujours avoir une acceptabilité plus élevée. Cependant, dans la condition "naïf", une différence significative n'a été observée que pour les temps d'attente de 0 seconde et 20 secondes (voir tableau II.26).

Aux intersections avec STOP, les résultats ont montré une différence significative dans l'acceptabilité *in situ* mesurée entre les temps d'attente (Kruskal-Wallis : $\chi^2 = 26,67$, $df = 2$, $p = 1,62 \cdot 10^{-6}$). Un test post-hoc a révélé une différence significative dans l'acceptabilité *in situ* mesurée entre les situations où le véhicule a attendu 0 seconde et 10 secondes ($\mu_{0\text{second}} = 24,53$; $\mu_{10\text{second}} = 46,93$; Wilcoxon : $p = 2,71 \cdot 10^{-6}$), et entre les situations où le véhicule a attendu 20 secondes et 10 secondes ($\mu_{20\text{second}} = 32,10$; $\mu_{10\text{second}} = 46,93$; Wilcoxon : $p = 2,00 \cdot 10^{-3}$). L'acceptabilité *in situ* est plus élevée dans les situations d'attente de 10 secondes. L'acceptabilité est plus faible dans les situations où les véhicules attendent 0 seconde et 20 secondes (voir figure II.51b)). Lorsque l'on examine les différences d'acceptabilité en fonction de la condition, on constate une différence significative d'acceptabilité uniquement dans la situation d'attente de 10 secondes. Les participants du groupe "sécurité" ont une meilleure acceptabilité que les participants du groupe "naïf" (voir tableau II.27).

	"sécurité"			"naïf"			Total		
	μ	m	σ	μ	m	σ	μ	m	σ
0 s	45,03	47,5	17,53	35,17	36,0	14,05	40,10	41,5	16,51
10 s	40,40	42,0	14,72	31,80	31,0	14,89	36,10	36,5	15,19
15 s	43,13	45,0	16,45	36,93	37,0	15,12	40,03	43,5	15,97
20 s	57,21	57,0	7,90	49,47	52,0	9,96	53,21	54,0	9,70

Tableau II.26 – Effet du temps d'attente dans les carrefours à sens giratoire sur l'acceptabilité *in situ* en fonction de la condition.



(a) Acceptabilité *in situ* dans les situations de giratoires en fonction du temps d'attente.

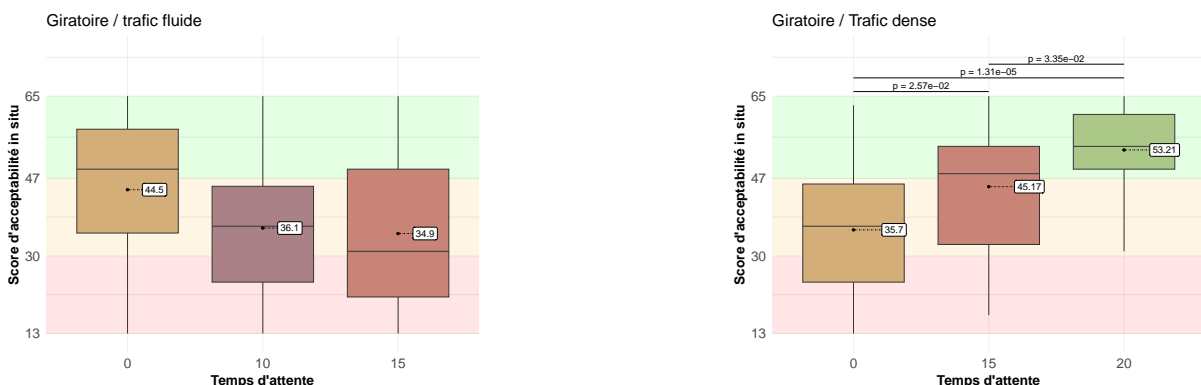
(b) Acceptabilité *in situ* dans les intersections avec STOP en fonction du temps d'attente.

Figure II.51 – Comparaison de l'acceptabilité *in situ* entre la condition "sécurité" et la condition "naïve" dans différents temps d'attente pour (a) les carrefours à sens giratoire et (b) les intersections avec panneau STOP ; les comparaisons post-hoc sont des tests de wilcoxon.

	"sécurité"			"naïf"			Total		
	μ	m	σ	μ	m	σ	μ	m	σ
0 s	27,67	28	11,79	21,40	20	8,35	24,53	22	10,53
10 s	52,13	56	14,25	41,73	46	14,90	46,93	50	15,27
20 s	34,27	31	16,15	29,93	26	12,83	32,10	26	14,50

Tableau II.27 – Effet du temps d'attente dans les intersections avec STOP sur l'acceptabilité *in situ* en fonction de la condition.

Si l'on considère uniquement les situations où le trafic est fluide, on observe une diminution de l'acceptabilité au fur et à mesure que le temps d'attente augmente. À l'inverse, dans les situations où le trafic est dense, nous observons une augmentation significative de l'acceptabilité avec l'allongement du temps d'attente (voir figure II.52).



(a) Acceptabilité *in situ* dans les giratoires à trafic fluide en fonction du temps d'attente.

(b) Acceptabilité *in situ* dans les giratoires à trafic dense en fonction du temps d'attente.

Figure II.52 – Comparaison de l'acceptabilité *in situ* en fonction du temps d'attente pour les carrefours à sens giratoire.

Analyse des émotions

Nous avons comparé les émotions auto-évaluées par les participants après le visionnage de chaque situation. L'échelle SAM nous donne une indication sur la valence émotionnelle que les participants estiment ressentir dans les situations. On obtient ainsi un score entre -5 et 5, les scores négatifs indiquent une valence négative et les scores positifs une valence positive. L'échelle GEW a permis d'affiner ce résultat en associant des émotions aux situations. Nous avons ainsi étudié l'acceptabilité au regard de cette composante émotionnelle évaluée à l'aide de ces deux échelles.

Dans cette partie, nous présentons sur le même graphique :

- le score médian par émotion sélectionnée par le participant sur l'échelle GEW ;
- la valence émotionnelle déterminée à l'aide de l'échelle SAM. Le code couleur utilisée indique si la valence médiane est positive, négative ou neutre ;
- le score d'acceptabilité *in situ*

Situations de carrefour à sens giratoire

La figure II.53 montre le score d'acceptabilité en fonction de la vidéo (de la situation) parmi les situations de carrefour à sens giratoire. On peut observer que lorsque l'acceptabilité est élevée, la valence émotionnelle mesurée est positive (c'est le cas pour les vidéos 3, 4 et 14). Dans ces situations, l'échelle GEW fait principalement ressortir de l'intérêt et du contentement. Pour les situations à l'acceptabilité plus faible, on observe des valences plutôt négatives ou neutres. Dans les cas où la valence est négative, la peur ressort plus souvent. Dans les situations neutres, on peut retrouver à la fois de la peur, mais également de l'intérêt ou du soulagement.

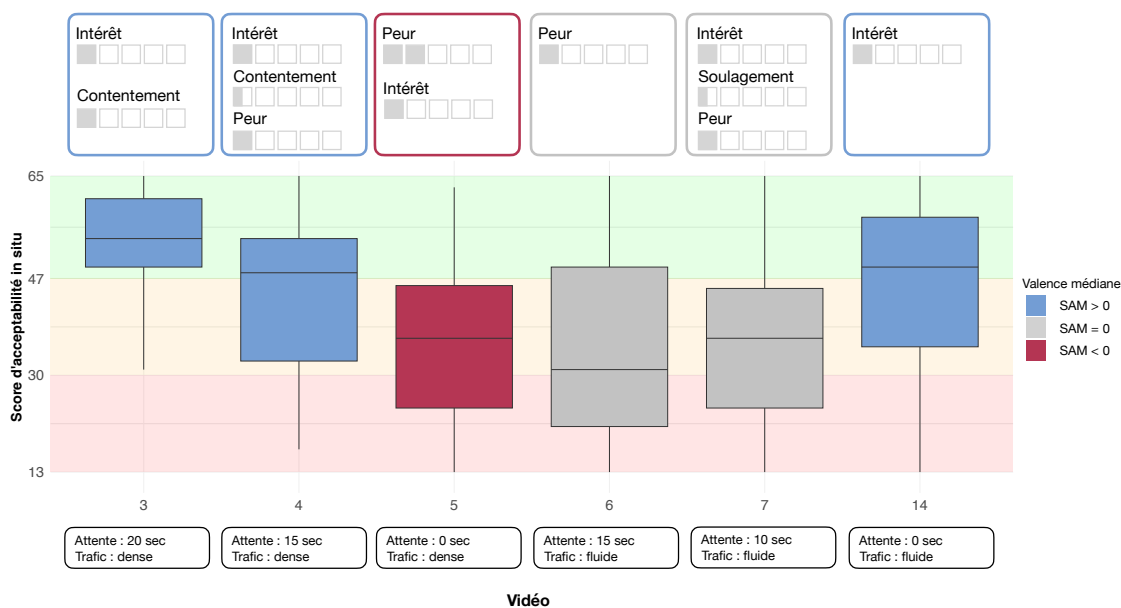


Figure II.53 – Comparaison des émotions évaluées dans les situations de carrefour à sens giratoire.

Situations de feu de signalisation

La figure II.54 montre le score d'acceptabilité en fonction de la vidéo (de la situation) parmi les situations de carrefour avec feu de signalisation. Nos deux situations sont assez similaires pour la valence émotionnelle mesurée qui est positive ou neutre. L'échelle GEW fait principalement ressortir de l'intérêt et du contentement dans des proportions similaires.

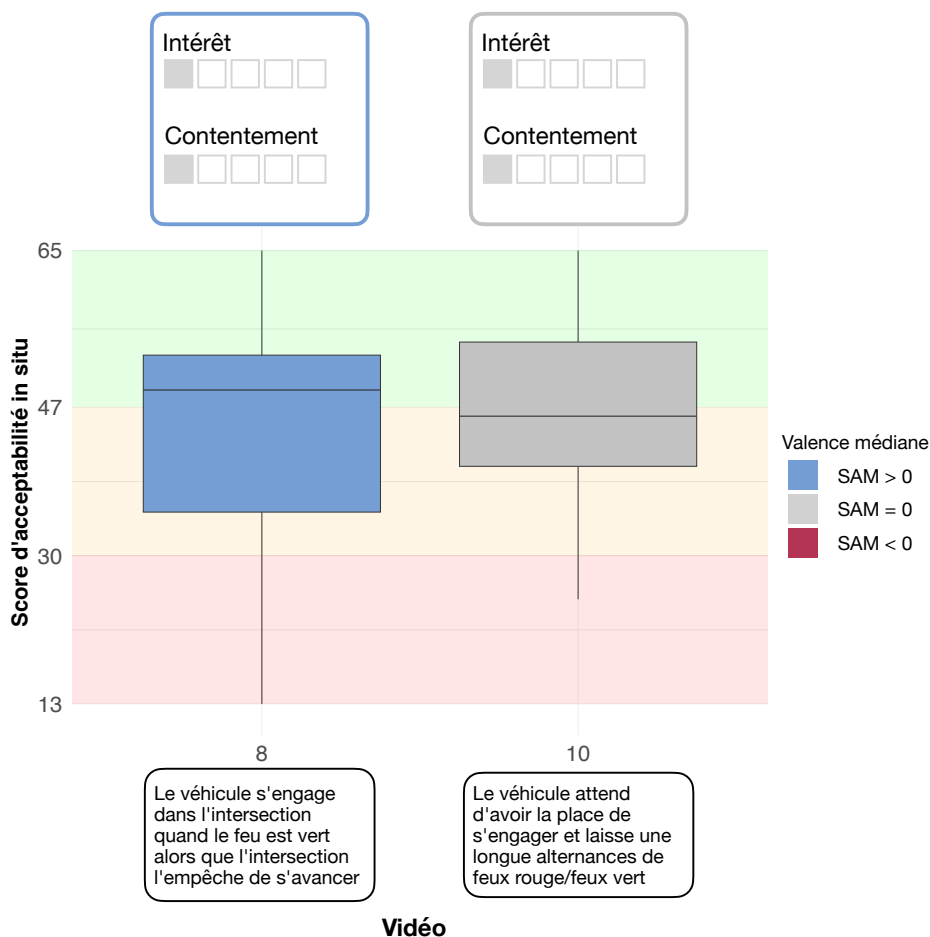


Figure II.54 – Comparaison des émotions évaluées dans les situations de carrefour à feu de signalisation.

Situations de dépassement en ligne droite

La figure II.55 montre le score d'acceptabilité en fonction de la vidéo (de la situation) parmi les situations de dépassement en ligne droite. La première situation est peu ambiguë, l'acceptabilité est très élevée, la variance faible. Dans ce cas, on observe une valence émotionnelle positive et une forte proportion d'intérêt et de contentement. Dans la situation de la vidéo 2, la valence émotionnelle est négative, et une forte proportion de peur semble être associée à une acceptabilité très basse. Pour des raisons de problèmes d'enregistrement, nous n'avons pas obtenu de résultats

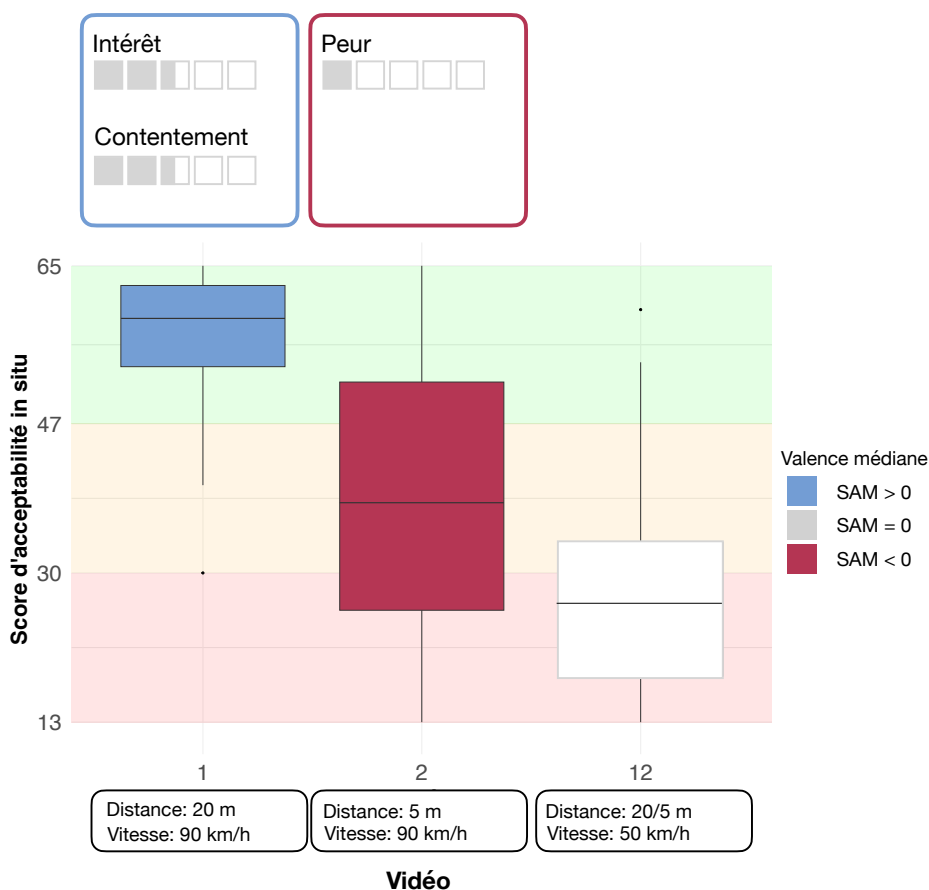


Figure II.55 – Comparaison des émotions évaluées dans les situations de dépassement en ligne droite.

Situations d'intersection avec STOP

La figure II.56 montre le score d'acceptabilité en fonction de la vidéo (de la situation) parmi les situations d'intersections avec un STOP. On peut observer une valence émotionnelle négative, associée à de la peur ainsi qu'à une acceptabilité basse pour les vidéos 9 et 13. La vidéo 13 fait ressortir de la déception en plus de la peur.

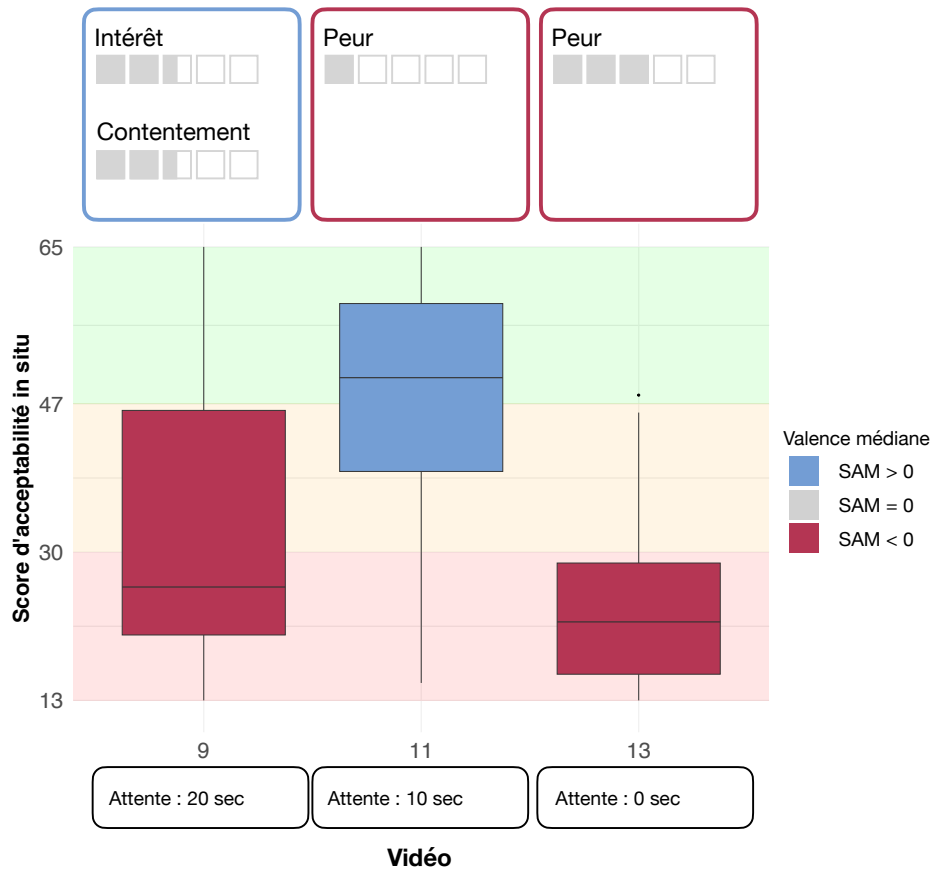


Figure II.56 – Comparaison des émotions évaluées dans les situations d'intersection avec **STOP**.

2.2.3.3 Discussion

L'objectif de cette étude est d'examiner l'effet d'amorçage en se concentrant sur l'aspect sécuritaire du véhicule. En outre, nous étudions l'impact du temps d'attente et de la distance entre les véhicules sur l'acceptabilité des passagers des véhicules autonomes. Pour rappel, nous avons formulé les hypothèses suivantes :

- (a) un amorçage sous la forme d'une instruction soulignant la sécurité du véhicule peut affecter l'acceptabilité du comportement du véhicule par le passager ;
- (b) la situation (type de route) dans laquelle se trouve le véhicule autonome peut affecter l'acceptabilité *in situ* du comportement du véhicule par le passager ;
- (c) le temps d'attente d'un véhicule avant de s'engager dans une situation peut influencer l'acceptabilité *in situ* du comportement du véhicule par les passagers ;
- (d) la densité du trafic dans lequel le véhicule va s'engager peut influencer l'acceptabilité *in situ* du comportement du véhicule par les passagers ;
- (e) au regard des modèles théoriques, les variations de l'acceptabilité *in situ* peuvent être modérées par des variables démographiques telles que l'âge, le sexe, le fait que le participant soit ou non titulaire d'un permis de conduire, les habitudes de conduite ou la familiarité avec les véhicules autonomes.

Dans cette expérimentation, nous avons ajouté une phrase dans la consigne de départ insistant sur la sécurité du véhicule autonome. Les différences significatives entre nos deux groupes semblent bien montrer que cette phrase a agit comme un amorçage (Bargh et al., 2001 ; Doyen et al., 2012 ; Weingarten et al., 2016) et a eu un effet sur les mesures de l'acceptabilité *in situ*.

Les résultats montrent l'impact significatif de l'amorçage sur l'acceptabilité *in situ* du comportement du véhicule autonome. Quel que soit le mode de conduite ou la situation, elle a eu un effet positif sur l'acceptabilité. Dans certains cas, la situation est passée de non acceptable pour les participants du groupe "naïf" à acceptable pour les participants du groupe "sécurité".

Un effet d'interaction avec l'acceptabilité *a priori* et la familiarité a été observé, conformément à la littérature. La familiarité est associée à une plus grande acceptabilité *a priori* (Venkatesh et al., 2012). Dans notre expérimentation, les participants avec une plus grande familiarité et une plus grande acceptabilité *a priori* ont eu une acceptabilité *in situ* élevée et l'ajout de la consigne de sécurité a eu un effet amoindri. En revanche, l'amorce a permis d'augmenter l'acceptabilité *in situ* des participants avec une familiarité et une acceptabilité *a priori* plus faibles. Ces résultats confirment notre hypothèse (a) selon laquelle l'amorçage de la sécurité augmente l'acceptabilité *in situ* du comportement du véhicule autonome.

Durant l'expérimentation, nous avons mesuré l'acceptabilité *in situ* dans différents types de situations. Nous n'avons pas mis en évidence de différence claire dans l'acceptabilité *in situ* entre les différentes situations, nous ne pouvons donc pas soutenir l'hypothèse (b).

Pour ce qui est de l'étude de l'acceptabilité *in situ* en fonction du temps d'attente, au vu de nos résultats, il paraît difficile de généraliser un effet à tous les types d'intersection. Dans les intersections avec un panneau STOP, on observe une plus grande variabilité de l'acceptabilité parmi les participants dans la condition "sécurité". C'est un résultat intéressant, le comportement du véhicule a pu sembler anormal aux participants de ce groupe à qui on a précisé que le véhicule est sûr, mais semble prendre un risque. Cette hypothèse est appuyée par l'analyse des émotions, dans cette situation, on observe une forte proportion de déception à l'égard du véhicule. De manière différente, les carrefours à sens giratoire sont mieux acceptés lorsque le véhicule attend environ 20 secondes avant de s'engager. Il s'agit du temps d'attente proposé le plus long. L'acceptabilité *in situ* n'est pas significativement affectée par le temps d'attente et semble dépendre principalement de la manière dont le véhicule s'engage dans l'intersection. Il est possible que la fluidité perçue de l'engagement influence l'acceptabilité. Notre hypothèse (c) selon laquelle le temps d'attente a un impact sur l'acceptabilité *in situ* semble donc en partie confirmée, mais pourrait être modérée par d'autres variables comportementales du véhicule.

Comme pour le temps d'attente, l'impact du trafic n'est pas immédiatement apparent. Nos résultats indiquent que les situations avec des niveaux de trafic plus élevés sont généralement plus acceptables. Il convient de noter que seules des situations de carrefour giratoire ont été observées. Cela confirme en partie l'hypothèse (d) : le trafic affecte l'acceptabilité, mais il peut être modéré par d'autres variables comportementales du véhicule.

Enfin, en ce qui concerne les variables démographiques, nos résultats indiquent que l'âge, le stress *a priori* et le profil du conducteur n'ont pas eu d'effet significatif sur l'acceptabilité *in situ*. Cependant, il semble y avoir un effet de genre sur l'acceptabilité *in situ*, les femmes rapportant une acceptabilité *in situ* plus élevée que les hommes. En outre, l'effet de l'amorçage semble être plus fort chez les femmes, puisque la différence entre les deux conditions était plus importante chez les femmes que chez les hommes. Cela valide en partie notre hypothèse (e).

L'analyse des émotions associées aux scores d'acceptabilité met en évidence une corrélation claire entre la valence émotionnelle et l'acceptabilité *in situ* des différentes situations de conduite. Les résultats montrent que les situations avec une acceptabilité élevée sont généralement associées à des émotions positives. À l'inverse, les situations jugées moins acceptables sont associées à des émotions négatives. L'acceptabilité *in situ* d'une situation de conduite semble étroitement liée aux émotions qu'elle suscite, les émotions positives favorisant une meilleure acceptabilité. Cette étude permet de souligner l'importance des facteurs émotionnels dans l'évaluation des situations routières et leur influence sur la perception de la sécurité.

2.2.3.4 Conclusion

Cette étude a examiné l'impact de ce que nous appelons les « éléments atomiques » du comportement des véhicules autonomes, à savoir les paramètres impliqués dans le mouvement du véhicule, notamment la vitesse et le temps d'attente avant d'entrer dans une intersection. Ces paramètres ont été étudiés dans différentes situations, y compris les intersections, les lignes droites avec des variations de densité de trafic. La confrontation au simulateur nous a permis de présenter aux participants différents comportements et de les immerger pleinement dans l'environnement. Cette approche nous a permis de démontrer l'impact significatif d'une préparation préalable à la confrontation avec le véhicule autonome. D'autres études sont nécessaires pour examiner l'impact de différentes situations. Cependant, la variabilité observée dans nos résultats suggère que les études futures devraient prendre en compte les différences interindividuelles.

Ce qu'il faut retenir

- La familiarisation au simulateur avant une expérimentation en réalité virtuelle améliore le sentiment de présence, mais n'influe pas sur l'acceptabilité ;
- L'acceptabilité *a priori* influe positivement sur l'acceptabilité *in situ* ;
- Un amorçage sur la sécurité influe positivement sur l'acceptabilité *in situ* ;
- Les paramètres du comportement ont une influence sur l'acceptabilité *in situ* dans certaines situations ;
- Les femmes ont une acceptabilité *in situ* plus élevée que les hommes dans ces situations ;
- Les émotions sont un bon marqueur de l'acceptabilité *in situ*. Une forte activation des émotions à valence positive est corrélée à une acceptabilité *in situ* élevée. À l'inverse, une forte activation des émotions à valence négative est corrélée à une acceptabilité *in situ* basse.
- Le temps d'attente le plus acceptable à un STOP est d'environ 10 secondes. Dans un carrefour à sens giratoire, lorsque le trafic est dense, l'acceptabilité *in situ* augmente avec l'augmentation du temps d'attente. Lorsque le trafic est fluide, l'acceptabilité *in situ* ne varie pas.

Chapitre 3

Ingénierie de l'acceptabilité *in situ*

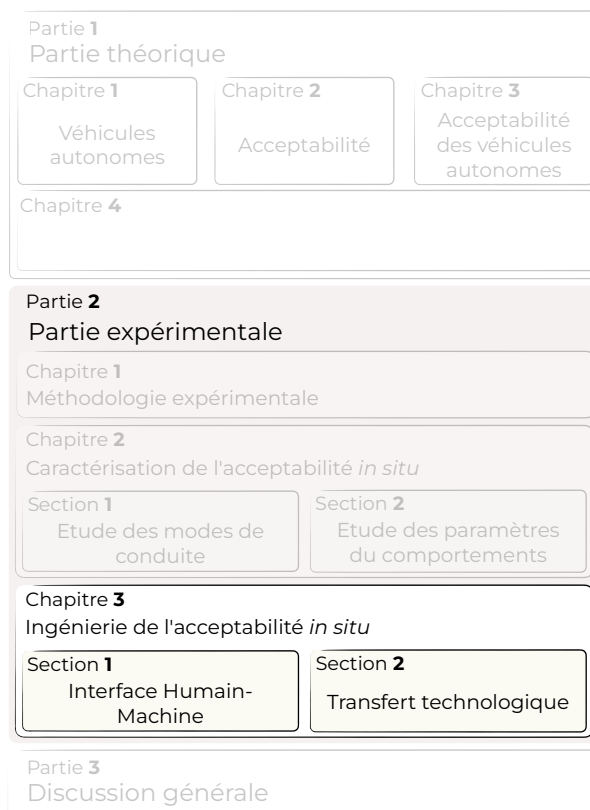


Figure II.57 – Schéma reprenant le plan de la thèse

Les chapitres précédents se sont intéressés à la caractérisation de paramètres influant sur l'acceptabilité du comportement d'un véhicule autonome. Dans ce chapitre, nous étudions les leviers permettant d'intégrer les résultats obtenus sur l'acceptabilité *in situ* dans les architectures de véhicules autonomes. La section 3.1 présente les résultats de 2 protocoles expérimentaux créés dans l'objectif d'étudier la façon dont on pourrait influencer sur l'acceptabilité d'un comportement non acceptable à l'aide d'une interface dans le véhicule. La section 3.2 propose des modèles mathématiques reliant l'acceptabilité aux paramètres de réglage des algorithmes ainsi qu'une méthodologie d'intégration dans les architectures de véhicules autonomes.

3.1 Interfaces Humain-Machine

3.1.1 Introduction

Après avoir étudié les paramètres sur lesquels nous pourrions intervenir dans le comportement du véhicule autonome, nous nous sommes intéressés à l'interface entre l'humain, passager du véhicule autonome, et la machine que constitue le véhicule autonome afin d'agir en temps réel sur l'acceptabilité *in situ*.

3.1.1.1 Définition

Du latin *inter*, signifiant “entre” et *face* signifiant “forme”, “configuration”. En Français, le terme interface a été emprunté à l'anglais pour désigner, en biologie, la “*surface à la frontière entre deux parties de matière ou d'espace*” (Husson & Graf, 1965). Il a ensuite été repris, en informatique, pour désigner un “*ensemble de règles, de conventions permettant un échange d'informations entre deux systèmes, deux éléments d'un système, ou entre l'utilisateur et la machine.*” (Académie Française, 2024b). Une interface entre un humain et une machine désigne donc les éléments permettant la communication entre les deux. Il peut s'agir du bouton sur la machine à café permettant de sélectionner un espresso ou bien de la petite lumière indiquant que les plaques électriques sont chaudes dans nos cuisines.

3.1.1.2 Interface Humain-Véhicule

Dans le contexte automobile, on peut distinguer deux catégories d'utilisateurs en interaction à l'intérieur du véhicule :

- le conducteur qui interagit avec le véhicule pour mener à bien la tâche de conduite;
- le passager qui peut interagir avec le véhicule pour des tâches d'accompagnement à la conduite (GPS) ou de loisir (musique, radio, etc.).

Il existe également des interactions possibles avec d'autres usagers à l'extérieur du véhicule. Nous n'étudierons pas ces interactions au cours de nos travaux, mais nous pouvons citer :

- les conducteurs d'autres véhicules (voitures, motos, transports en commun, etc.);
- les passagers d'autres véhicules;
- les piétons;
- les utilisateurs de pistes cyclables (vélos, trottinettes, etc.).

Nous nous intéressons plus particulièrement aux interactions entre un usager et un véhicule utilisant des fonctions d'automatisation de niveau 5. Dans ce contexte, l'automatisation totale du véhicule libère le conducteur de la tâche de conduite, il devient passager ou superviseur. L'utilisateur pourrait interagir uniquement au début

d'un trajet (Yurtsever et al., 2020). L'expérience de l'utilisateur constitue un élément important de l'acceptabilité d'une technologie (Hassenzahl, 2005 ; Riener et al., 2022). Dans ce contexte, l'automatisation d'un système peut avoir des effets positifs et négatifs sur la compréhension de la situation par l'utilisateur (Baumann et al., 2022). En situations conflictuelles, un agent autonome doit communiquer à l'agent humain sa compréhension de l'environnement pour améliorer la conscience de situation de l'humain. Savoir que le robot connaît les conditions environnementales permet à l'humain d'augmenter la confiance qu'il peut lui accorder (Hancock et al., 2011 ; Wortham et al., 2017). La confiance peut être modulée par l'explication ainsi que par le risque perçu (Atakishiyev et al., 2023). On l'a vu, la confiance en la technologie est un concept lié à l'acceptabilité (voir chapitre I). Les interfaces peuvent être utilisées pour moduler la confiance (Holthausen et al., 2022), notamment en créant des interfaces donnant des informations sur la performance, le contexte de conduite et intégrant des interactions émotionnelles (Lee et al., 2015).

Nous nous sommes d'abord intéressés à la notion d'explicabilité puis à la notion de transparence.

Explicabilité

Du latin, *explicare* signifiant "déployer, dérouler", le fait d'expliquer désigne le fait "*d'exposer avec clarté [...] ses intentions*", de "*donner des indications pratiques ou techniques. [...] Expliquer le fonctionnement d'un appareil, la conduite d'un véhicule*" (Académie Française, 2024a).

L'explicabilité d'un point de vue algorithmique désigne la capacité d'un système à rendre compréhensible et transparent son processus de prise de décision. Un utilisateur serait plus enclin à faire confiance à un système en comprenant la façon dont il a pris une décision par rapport à un système de boîte noire dont on ne perçoit que les entrées et les sorties (Hoffman et al., 2018 ; Ribeiro et al., 2016).

Transparence

La transparence joue un rôle crucial dans l'amélioration de la confiance, ce qui à son tour, peut favoriser une meilleure acceptabilité (Jenkins et al., 2022 ; Ziefle & Wilkowska, 2010). On peut définir la transparence comme la propriété qui permet de percevoir le fonctionnement d'un système (Spagnolli et al., 2018) ou de comprendre pourquoi et comment une décision a été prise (Chatila et al., 2017).

Le modèle P7001 (Winfield et al., 2021) propose 4 niveaux de transparence pour un utilisateur final :

- niveau 1 : un manuel d'utilisateur, expliquant comment le robot agit dans différentes situations, est fourni ;
- niveau 2 : le manuel utilisateur est présenté de manière interactive ;

- niveau 3 : le robot explique à l'utilisateur ses actions lorsque ce dernier le demande ;
- niveau 4 : le robot explique à l'utilisateur ce qu'il pourrait faire dans différentes actions lorsqu'il le demande.

Le modèle de transparence des agents basée sur la conscience de la situation (SAT) (Chen et al., 2018) propose 3 niveaux de transparence :

- niveau 1 : l'interface propose des informations de base sur l'agent, sa position, son objectif ;
- niveau 2 : l'interface propose des informations sur le pourquoi en ajoutant des éléments rationnels à l'interface sur la faisabilité en fonction des ressources disponibles ou les limitations environnementales de l'action ;
- niveau 3 : l'interface propose une projection des futurs états de l'agent.

Sur la base de ces modèles, nous proposons un modèle cumulatif de transparence de l'interface du véhicule autonome de niveau 5, à destination du passager. On va distinguer 3 niveaux de transparences, cumulables :

- niveau 1 : le système permet à l'utilisateur de consulter les données récoltées pour prendre une décision ;
- niveau 2 : le système permet à l'utilisateur de consulter une explication détaillée du chemin de décision ayant mené à la décision ;
- niveau 3 : le système permet à l'utilisateur de consulter différentes actions envisagées et rejetées par le système.

L'explicabilité et la transparence sont deux concepts liés, mais ils présentent des distinctions importantes. La transparence désigne la capacité d'un système à rendre accessibles les informations sur son fonctionnement interne pour permettre aux utilisateurs de comprendre comment et pourquoi une décision a été prise.

L'explicabilité va plus loin, et fournit des explications claires, compréhensibles et adaptées à différents publics sur le fonctionnement et les décisions du système. La transparence se contente de donner l'accès à l'information brute alors que l'explicabilité fait en sorte que l'information puisse être interprétée et communiquée. Un système peut être transparent, mais non explicable. En revanche, un système doit être transparent pour que ses actions puissent être explicables.

Au regard de la littérature, nous avons mis en place deux expérimentations dont l'objectif est d'explorer les effets de l'interface sur l'acceptabilité du comportement du véhicule autonome.

- La première expérimentation explore les effets de l'explicabilité et des modalités d'informations transmises au passager sur l'acceptabilité ;
- La seconde expérimentation explore les effets de la transparence et de la quantité d'informations transmises au passager sur l'acceptabilité.

3.1.2 Expérimentation 1 : Acceptabilité et explicabilité

3.1.2.1 Introduction

Cette expérimentation explore les façons d'influer sur l'acceptabilité du comportement du véhicule autonome du point de vue des passagers en lui proposant une explication à travers l'interface du véhicule.

Nous avons formulé les hypothèses suivantes :

- (a) le niveau d'explicabilité augmente lors d'une présentation multimodale de l'information ;
- (b) l'acceptabilité du comportement d'un véhicule autonome en situation conflictuelle s'accroît avec un niveau plus élevé d'explicabilité.

3.1.2.2 Matériel & Méthodes

Nous avons mis en place une étude expérimentale en laboratoire. Les participants ont été recrutés parmi les étudiants disponibles sur la période de septembre 2023 à janvier 2024. L'expérience était ouverte à tous les participants majeurs, détenteurs d'un permis de conduire ou non.

Matériel

Nous avons placé les participants dans un simulateur de conduite composé d'un siège, d'un volant, de pédales et d'un levier de vitesse. 3 écrans permettent de projeter le point de vue d'une personne assise derrière le volant du véhicule. Une tablette est installée devant le participant et fait office d'écran central permettant au véhicule d'afficher des informations (voir figure II.58).



Figure II.58 – Photographie de l'installation.

Nous avons utilisé 2 situations d'intérêt présentées dans le tableau II.28.

#	Type de route	Vitesse (km/h)	Distance (m)	Temps d'attente (s)	Explication
1	Feu de signalisation	30	/	5	Le véhicule passe un feu de signalisation rouge pour laisser passer un véhicule prioritaire (camion de pompier avec gyrophare et sirène 2 tons).
2	Giratoire	15	5	20	Le véhicule s'arrête à l'entrée du giratoire et attend 20 secondes avant de forcer le passager.

Tableau II.28 – Tableau reprenant les 2 situations présentées durant l'expérimentation.

Nous avons repris les situations de "transgression" relativement acceptables issues de nos précédentes expérimentations. Dans les deux cas, le comportement peut être perçu comme une transgression :

- Dans le cas du **feu de signalisation**, le véhicule doit passer le feu rouge. L'expérimentation présentée au chapitre 2.1 a montré que ce type de transgression n'était pas acceptable, ici nous avons ajouté un véhicule prioritaire pour permettre au véhicule autonome de justifier son comportement ;
- Dans le cas du carrefour à sens **giratoire**, le véhicule doit "couper" la priorité à un véhicule déjà inséré. L'expérimentation présentée au chapitre 2.1 a montré que ce type de comportement était moyennement acceptable.

Les situations ont été modélisées et simulées pour en faire des vidéos (cf. figures II.59 et II.60).



Figure II.59 – Vidéo montrant le véhicule passant un **feu rouge** afin de laisser passer un véhicule de pompiers.



Figure II.60 – Vidéo montrant le véhicule s'insérant dans un carrefour à **sens giratoire** après un temps d'attente de 15 secondes.

Afin d'accompagner les vidéos, nous avons créé une interface sur tablette. Cette interface a été conçue pour afficher une information au passager et lui transmettre une explication sur la situation selon 3 niveaux :

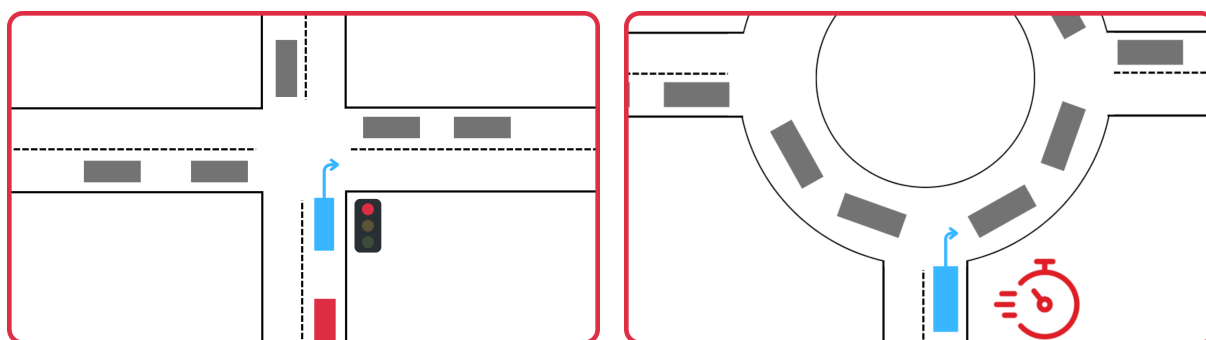
- **Niveau 0** : l'interface n'affiche pas d'information ;
- **Niveau 1** : l'interface affiche des informations visuelles sur le comportement du véhicule pendant la situation (voir figure II.61) ;
- **Niveau 2** : l'interface affiche les mêmes informations visuelles que dans le niveau 1 et est accompagnée d'une explication audio. *Par exemple "Un véhicule prioritaire est en approche, on franchit le feu malgré le feu rouge pour se mettre de côté et on laisse passer le véhicule."*

La voix utilisée est une voix de femme générée par ordinateur, les voix féminines étant plus facilement appréciées que les voix masculines (Chevet, 2017).

Mesures par questionnaire

Durant cette expérimentation, nous avons effectué 3 mesures par questionnaires :

- Acceptabilité *a priori*, mesurée à l'aide du questionnaire UTAUT (Venkatesh et al., 2012) (voir annexe A.1)
- Acceptabilité *in situ* (voir annexe E.3)
- Explicabilité ressentie (voir annexe E.3)



(a) Interface dans la situation dans laquelle le véhicule passe le feu pour laisser la place aux pompiers.

(b) Interface dans la situation dans laquelle le véhicule s'insère dans le carrefour à sens giratoire.

Figure II.61 – Captures d'écran issues de l'interface proposée.

Protocole

Le protocole est présenté sur la figure II.62. Après avoir rempli un formulaire de consentement libre et éclairé, les participants remplissent le questionnaire d'acceptabilité *a priori* UTAUT, puis sont installés dans le simulateur. Une situation est présentée au participant trois fois avec les trois niveaux d'explicabilité dans un ordre aléatoire. Puis la deuxième situation est présentée dans les trois niveaux d'explicabilité.

Au total le participant voit 6 vidéos dans un ordre aléatoire. Entre chaque vidéo, on lui demande de remplir un questionnaire mesurant l'acceptabilité ainsi que le niveau d'explicabilité ressenti. Pour terminer, un entretien est réalisé avec le participant afin de recueillir son ressenti.

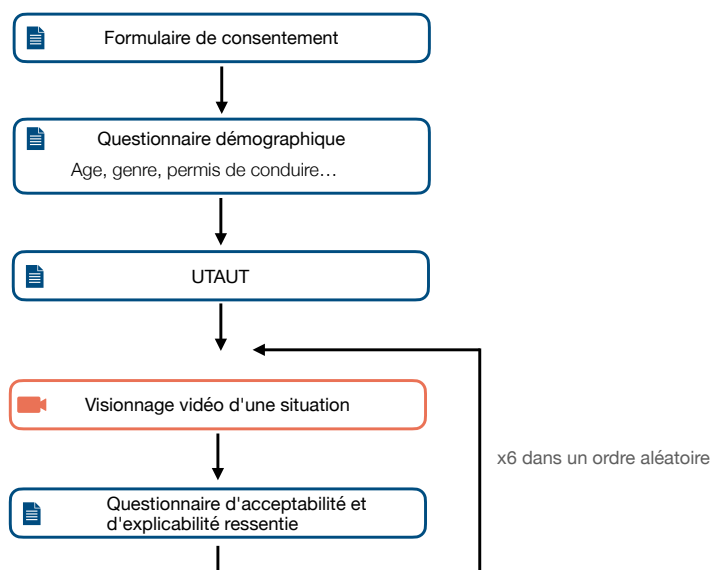


Figure II.62 – Schéma du protocole expérimental.

3.1.2.3 Résultats

Population

23 personnes ont participé à notre protocole expérimental. 14 femmes et 9 hommes, de 19 à 25 ans. Sur les 23 participants, la majorité (20 participants) était titulaire d'un permis de conduire français autorisant la conduite d'une voiture sur route ouverte (voir tableau II.29).

	Hommes			Femmes			Total		
	μ	m	σ	μ	m	σ	μ	m	σ
Age	21	21	1,12	22,36	22,5	1,39	21,83	22	1,44
Permis B		8			12			20	
Sans permis		1			2			3	

Tableau II.29 – Résultat des questionnaires démographiques. L'âge est mesuré en années au jour de passation de l'expérimentation. Permis B désigne le nombre de participants possédant un permis de conduire permettant la conduite d'une voiture.

Variation du niveau d'explicabilité

Lorsqu'on s'intéresse au score d'explicabilité ressenti en fonction du niveau d'explicabilité proposé, on observe une différence significative entre les 3 niveaux. Le

niveau 1, composé d'une seule modalité d'explication visuelle, présente un score plus élevé que le niveau témoin, sans explication ($\mu_{nvx1} = 16,24$; $\mu_{nvx0} = 11,30$; Wilcoxon : $p = 8,76 \cdot 10^{-4}$; voir tableau II.30; voir figure II.63). De même, le niveau 2, composé de deux modalités d'explication, visuelle et auditive, présente un score plus élevé que le niveau 1, et deux fois plus élevé, en moyenne, que le niveau témoin ($\mu_{nvx2} = 22,26$; $\mu_{nvx0} = 11,30$; Wilcoxon : $p = 3,30 \cdot 10^{-5}$; voir tableau II.30; voir figure II.63). On a donc une augmentation de l'explicabilité ressentie par nos participants en fonction du niveau d'explication et du nombre de modalités sensorielles proposées.

	μ	m	σ
Niveau 0	11,30	7,5	6,51
Niveau 1	16,24	16,5	6,04
Niveau 2	22,27	22,5	5,40

Tableau II.30 – Score d'explicabilité ressentie pour chacun des niveaux d'explicabilité proposés.

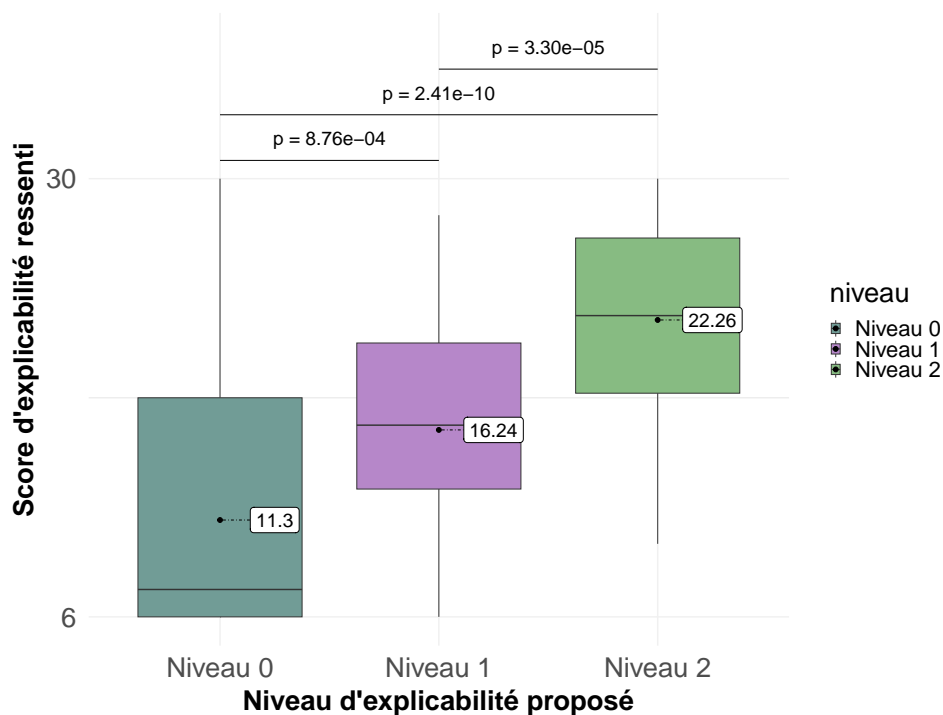


Figure II.63 – Score d'explicabilité ressentie par les participants en fonction du niveau d'explicabilité proposé.

Acceptabilité *in situ* en fonction de l'explicabilité

Lorsqu'on s'intéresse au score d'acceptabilité *in situ* en fonction du niveau d'explicabilité proposé, on observe une différence significative suggérant une distribution différente dans les différents niveaux (Kruskal-Wallis : $\chi^2 = 925,53$, $df = 24$, $p < 92,2 \cdot 10^{-16}$). L'analyse post-hoc permet de mettre en évidence une différence significative de l'acceptabilité *in situ* entre le niveau témoin et les niveaux 1

et 2. En moyenne, l'acceptabilité *in situ* est plus basse dans le niveau 0 que dans les niveaux 1 et 2 ($\mu_{nvx0} = 35,85$; $\mu_{nvx1} = 37,87$; $\mu_{nvx2} = 38,89$; Wilcoxon₀₋₁ : $p = 0,048$; Wilcoxon₀₋₂ : $p = 0,043$; voir tableau II.31; voir figure II.64).

L'augmentation du niveau d'explicabilité semble avoir un effet sur l'acceptabilité *in situ* du comportement du véhicule autonome.

	μ	m	σ
Niveau 0	35,85	36,5	13,15
Niveau 1	37,87	38,5	12,47
Niveau 2	38,89	41,5	13,34

Tableau II.31 – Score d'acceptabilité *in situ* pour chacun des niveaux d'explicabilité proposés.

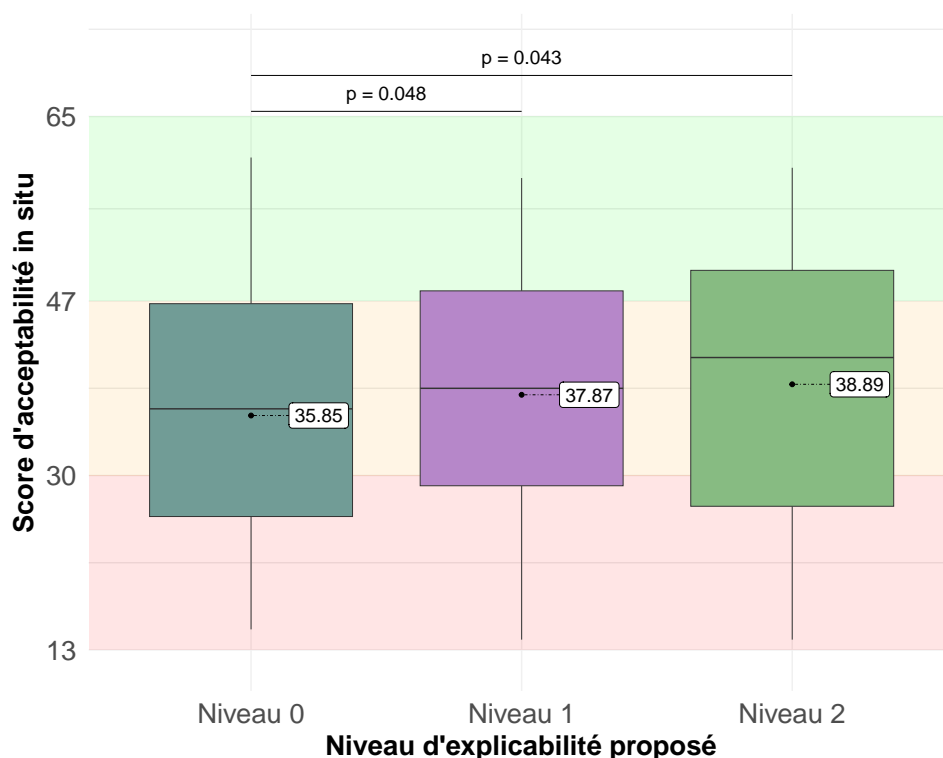


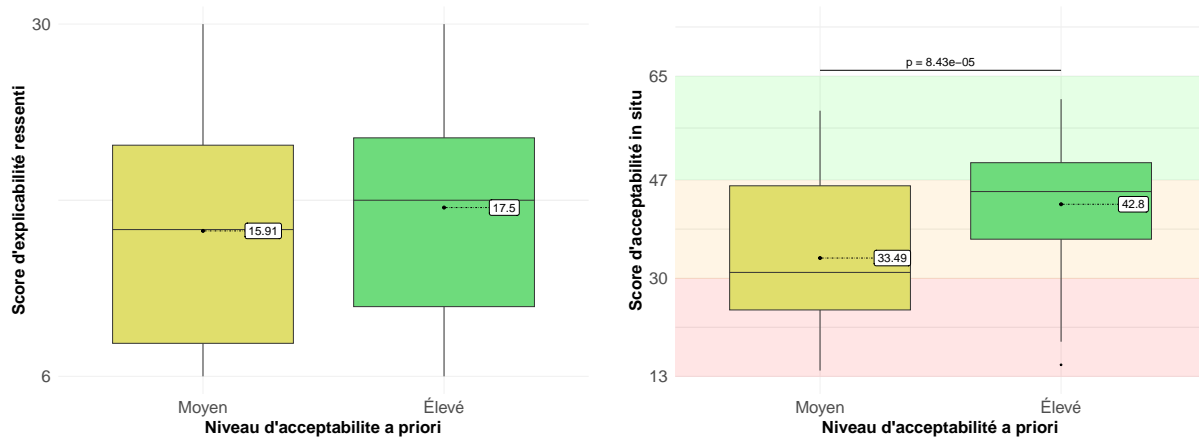
Figure II.64 – Score d'acceptabilité *in situ* en fonction du niveau d'explicabilité proposé.

Effet de l'acceptabilité *a priori*

Avant la confrontation au simulateur, nous avons questionné les participants sur leur acceptabilité *a priori* des véhicules autonomes. Aucun participant n'a présenté une acceptabilité *a priori* faible. Nous avons donc séparé les participants en deux groupes selon qu'ils ont une acceptabilité *a priori* élevée ou moyenne. On peut observer que les participants présentant une acceptabilité *a priori* plus élevée ont eu une acceptabilité *in situ* significativement plus élevée que les participants présentant une acceptabilité *a priori* moyenne ($\mu_{A+} = 42,17$; $\mu_{A-} = 32,58$; Wilcoxon : $p = 4,24 \cdot 10^{-5}$; voir tableau II.32; voir figure II.65b). En revanche, il n'y a pas de différence significative de l'explicabilité ressentie en fonction de l'acceptabilité *a priori* (voir tableau II.32; voir figure II.65a).

	Acceptabilité <i>a priori</i>					
	Élevée			Moyenne		
	μ	m	σ	μ	m	σ
Explicabilité ressentie	17,50	18,00	7,46	15,91	16,00	7,43
Acceptabilité <i>in situ</i>	42,80	45,00	11,24	33,49	31,00	12,80

Tableau II.32 – Score d'acceptabilité *in situ* et d'explicabilité ressentie en fonction du niveau d'acceptabilité *a priori*.



(a) Score d'explicabilité ressentie en fonction du niveau d'acceptabilité *a priori*.

(b) Score d'acceptabilité *in situ* en fonction du niveau d'acceptabilité *a priori*.

Figure II.65 – Effet de l'acceptabilité *a priori* sur l'explicabilité et l'acceptabilité *in situ*.

3.1.2.4 Discussion

Les résultats de cette expérimentation nous ont d'abord permis de démontrer que la multiplication des modalités sensorielles dans la présentation de l'information pouvait augmenter la perception de l'explicabilité. Cela valide notre hypothèse (a), selon laquelle le niveau d'explicabilité perçu augmente lorsqu'on utilise plusieurs modes de transmission de l'information, tels que le son ou la vision ;

Conformément à la littérature, l'acceptabilité *a priori* a une influence positive sur l'acceptabilité *in situ*. Cette expérimentation a également montré un effet positif de l'acceptabilité *a priori* sur l'explicabilité ressentie.

Ces résultats nous ont permis d'évaluer l'effet du niveau d'explicabilité ressenti sur l'acceptabilité *in situ* dans des situations potentiellement conflictuelles. Les situations présentées durant cette expérimentation ont présenté un score d'acceptabilité se situant dans une zone intermédiaire, ni complètement acceptable, ni totalement inacceptable. Dans ces situations "d'entre-deux", l'explication du comportement à travers l'interface a permis d'augmenter l'acceptabilité *in situ* des passagers, validant ainsi notre hypothèse (b), selon laquelle l'acceptabilité *in situ* du comportement d'un véhicule autonome en situation conflictuelle s'accroît avec un niveau d'explicabilité plus élevé et une information multimodale.

3.1.3 Expérimentation 2 : Acceptabilité et transparence

3.1.3.1 Introduction

Après avoir étudié les effets de l'explicabilité sur l'acceptabilité *in situ*, nous avons souhaité affiner nos résultats et explorer le concept de transparence au sein d'une interface. Au regard des résultats présentés dans le chapitre 2.2, nous avons souhaité tester si les effets des leviers (comme l'effet d'amorçage) permettant d'augmenter l'acceptabilité *in situ* pouvaient être cumulables avec l'effet de transparence.

Nous avons formulé les hypothèses suivantes :

- (a) l'acceptabilité *in situ* augmente avec le niveau de transparence proposé par une interface ;
- (b) l'amorçage et l'augmentation du niveau de transparence ont des effets cumulables.

3.1.3.2 Matériel & Méthodes

Nous avons mis en place une étude expérimentale en laboratoire. Les participants ont été recrutés via les listes de diffusion du laboratoire sur la période de mai à juillet 2024. L'expérience était ouverte à tous les participants majeurs, détenteurs d'un permis de conduire ou non.

Matériel

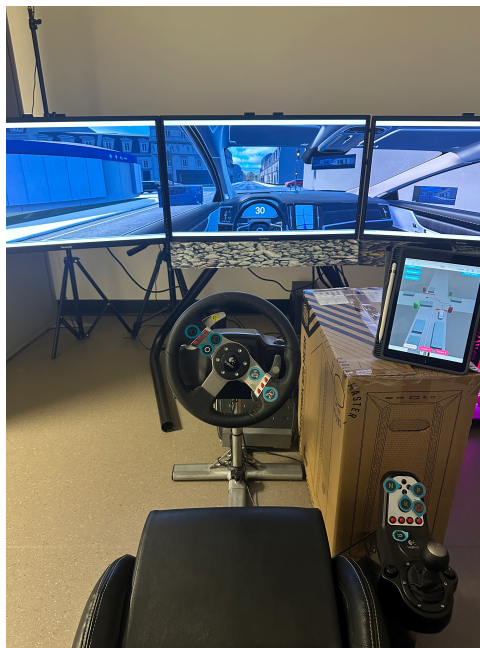


Figure II.66 – Photographie de l'installation.

Nous avons placé les participants dans les mêmes conditions que celles présentées dans la section 3.1.2, dans un simulateur de conduite composé d'un siège, d'un volant,

de pédales et d'un levier de vitesse. 3 écrans permettent de projeter le point de vue d'une personne assise derrière le volant du véhicule. Une tablette est installée devant le participant et fait office d'écran central permettant au véhicule d'afficher des informations (voir figure II.66).

Nous avons utilisé 4 situations d'intérêt présentées dans le tableau II.33.

#	Type de route	Vitesse (km/h)	Distance (m)	Temps d'attente (s)	Explication
1	Feu de signalisation	30	/	5	Le véhicule passe un feu de signalisation rouge pour laisser passer un véhicule prioritaire (camion de pompier avec gyrophare et sirène 2 tons).
2	Feu de signalisation	30	/	/	Le véhicule passe un feu de signalisation orange pour éviter une collision avec une moto dans l'angle mort du passager (voir figure II.67a).
3	Giratoire	15	5	20	Le véhicule s'arrête à l'entrée du giratoire et attend 20 secondes avant de forcer le passager.
4	Ligne droite	60	60	/	Le véhicule dépasse un vélo, un véhicule arrive en face en sens inverse (voir figure II.67b).

Tableau II.33 – Tableau reprenant les 4 situations présentées durant l'expérimentation.

Parmi ces situations, 2 sont directement issues de l'expérimentation présentée dans la section 3.1.2. Nous avons ajouté 2 nouvelles situations dérivées de situations issues de nos précédentes expérimentations.

Dans ces situations, le comportement peut être perçu comme une transgression :

- Dans le cas du feu de signalisation avec moto, le véhicule doit passer un feu orange. L'expérimentation présentée au chapitre 2.1 a montré que ce type de transgression n'était pas acceptable, ici nous avons ajouté une moto dans s'insérant derrière la voiture, dans un angle mort afin de justifier la transgression différemment de celle avec le véhicule prioritaire.
- La situation de dépassement du vélo ajoute une dimension de peur au regard de la voiture arrivant en face, en sens inverse durant le dépassement.

Nous avons créé une interface, présentée sur tablette tactile, permettant au véhicule d'afficher des informations et au passager d'interagir pour accéder à ces informations. Trois niveaux de transparence de l'interface ont été créés :

- **Niveau 1** : Le véhicule présente au passager les informations utilisées lors de sa prise de décision. L'interface permet d'accéder sur un schéma à la liste des usagers détectés, à la signalisation ainsi qu'aux éléments perturbateurs ayant nécessité une prise de décision (voir figures II.68a, II.69a);

- **Niveau 2** : Le véhicule présente au passager les informations du niveau 1 et ajoute un schéma indiquant la façon dont la décision a été prise (voir figures II.68b, II.69b);
- **Niveau 3** : Le véhicule présente au passager les informations des niveaux 1 et 2 et inclut les différentes solutions calculées qui n'ont pas été retenues (voir figures II.68c, II.69c).

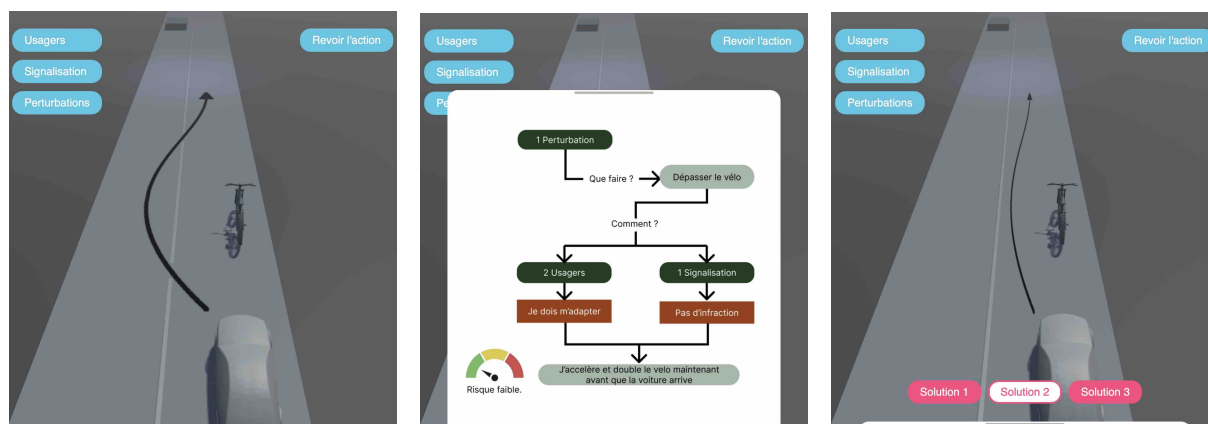


(a) Vidéo montrant le véhicule passant un feu orange, car il a détecté une moto tournant dans l'intersection qu'il vient de passer et dans l'angle mort du passager.



(b) Vidéo montrant le véhicule dépassant un cycliste en empruntant la voie à sens inverse.

Figure II.67 – Capture d'écran issue des vidéos présentées durant l'expérimentation.



(a) Interface de transparence de niveau 1.

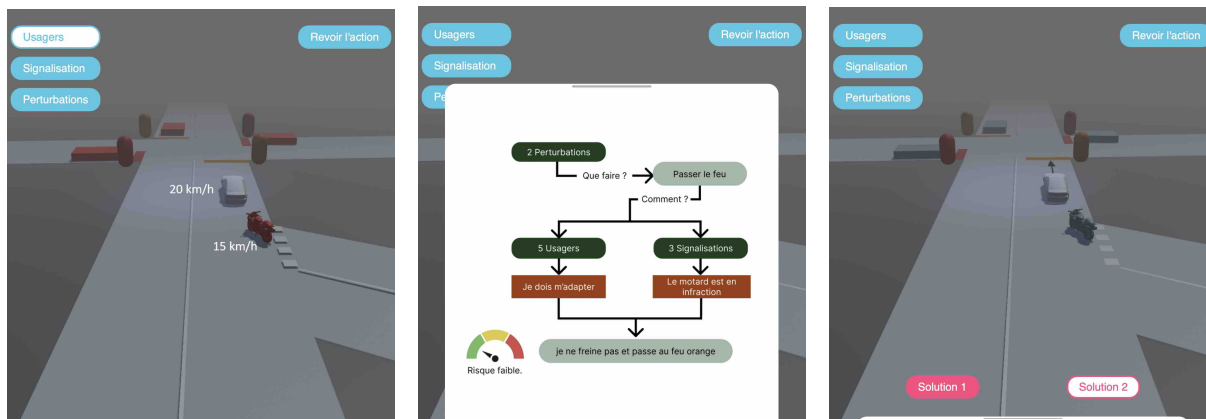
(b) Interface de transparence de niveau 2.

(c) Interface de transparence de niveau 3.

Figure II.68 – Interfaces présentées durant l'expérimentation durant la situation dans laquelle le véhicule dépasse un cycliste.

Protocole

Le protocole expérimental est présenté dans la figure II.70. Après avoir rempli un formulaire de consentement libre et éclairé, les participants remplissent un questionnaire démographique (voir annexe E.2) ainsi que le questionnaire d'acceptabilité *a priori* UTAUT (voir annexe A.1), puis sont installés dans le simulateur.



(a) Interface de transparence de niveau 1.

(b) Interface de transparence de niveau 2.

(c) Interface de transparence de niveau 3.

Figure II.69 – Interfaces présentées durant l’expérimentation durant la situation dans laquelle le véhicule ne s’arrête pas au feu orange, car il a détecté la présence d’une moto s’engageant proche de lui à l’intersection précédente.

Les participants ont été répartis en deux groupes, en fonction des instructions qu’ils recevaient. Les instructions suivantes ont été données (en français) :

“Vous êtes donc passager d’un véhicule autonome de niveau 5. Le niveau 5 signifie que ce véhicule est capable d’agir et de réagir par lui-même et sans interventions extérieures à tous les évènements qui peuvent survenir sur la route. Vous ne pouvez pas interagir avec les commandes du véhicule qui va suivre un tracé GPS et vous emmener à la destination prévue pour cette expérience. **Les différents capteurs du véhicule lui permettent de détecter les éléments environnants (autres véhicules, signalétique, bâtiment ...).** Vous devez savoir que **toutes les décisions prises par le véhicule sont calculées et que la sécurité est l’élément clé de chacune de ces décisions. Chaque action est réalisée pour vous garder en sécurité en toutes conditions.** Durant le trajet, nous n’interagirons pas avec vous, comme si vous étiez seul à bord de votre véhicule. Vous pouvez cependant exprimer votre ressenti à haute voix et si vous ressentez une gêne ou souhaitez arrêter l’expérience, n’hésitez surtout pas à nous en faire part.”

- Les participants du groupe “sécurité” ont reçu cette instruction dans son intégralité, avec une clarification (en gras dans le texte) sur la sécurité du comportement du véhicule autonome.
- Les participants du groupe “naïf” n’ont pas reçu l’instruction en gras et n’ont donc pas d’amorce de sécurité.

Dans chaque groupe, les participants ont été divisés en 3 groupes, en fonction du niveau de transparence que le véhicule allait leur fournir au niveau de l’interface tactile. Une fois les instructions reçues et le niveau attribué, les participants visionnent les 4 vidéos dans un ordre aléatoire. Entre chaque vidéo, il est demandé au participant de remplir un questionnaire mesurant l’acceptabilité *in situ* de la situation (voir

annexe E.3). Pour terminer, un entretien est réalisé avec le participant afin de recueillir son avis.

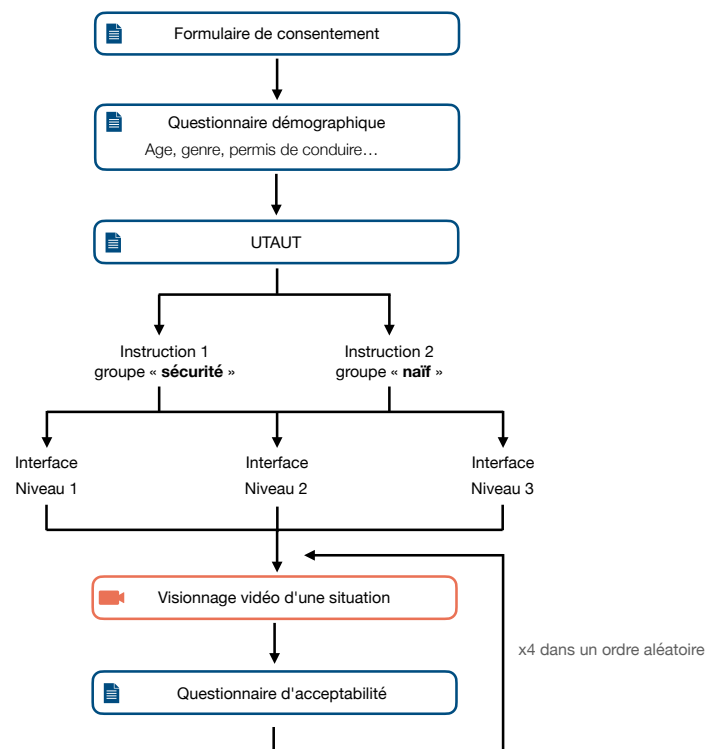


Figure II.70 – Schéma du protocole expérimental.

3.1.3.3 Résultats

Population

28 personnes ont participé à notre protocole expérimental. 17 femmes et 10 hommes et 1 personne qui n'a pas souhaité s'exprimer sur son genre. Les participants étaient âgés de 20 à 66 ans. Sur les 28 participants, 22 étaient titulaires d'un permis de conduire français autorisant la conduite d'une voiture sur route ouverte, 5 ne possédaient aucun permis de conduire (voir tableau II.34).

	Hommes			Femmes			Autre			Total		
	μ	m	σ	μ	m	σ	μ	m	σ	μ	m	σ
Age	30,47	27,0	12,84	25,10	24,5	2,07	21	21	-	28,21	26	10,46
Permis		14			9			0			23	
Sans permis		3			1			1			5	

Tableau II.34 – Résultat des questionnaires démographique. L'âge est mesuré en années au jour de passation de l'expérimentation. "Permis" désigne le nombre de participants possédant un permis de conduire permettant la conduite d'une voiture.

Effet de l'amorce

Nous avons étudié le score d'acceptabilité *in situ* en fonction du groupe des participants, selon qu'ils aient été ou non soumis à l'amorce de sécurité. Dans cette

expérimentation, nous n'avons observé aucune différence significative dans l'acceptabilité mesurée au sein des deux groupes (tableau II.35 ; voir figure II.71).

	μ	m	σ
Naïf	40,45	41,5	13,23
Sécurité	39,20	38,0	13,04

Tableau II.35 – Score d'acceptabilité *in situ* pour chacun des groupes.

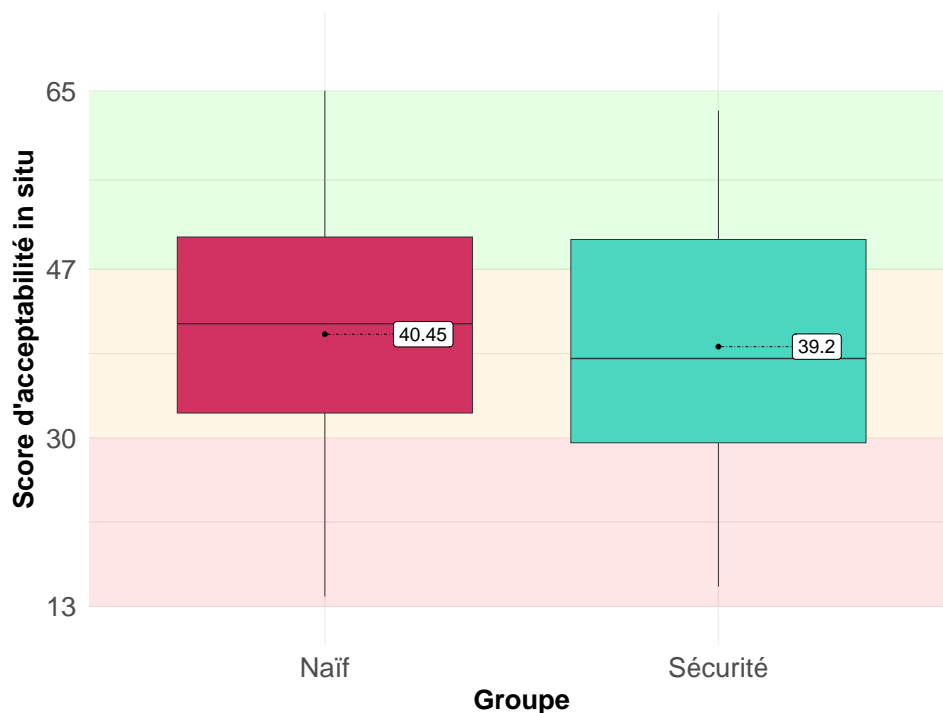


Figure II.71 – Score d'acceptabilité *in situ* en fonction du groupe.

Acceptabilité *in situ* en fonction de transparence

Lorsqu'on s'intéresse au score d'acceptabilité *in situ* en fonction du niveau de transparence, nous n'avons pu mettre en évidence aucune différence significative de l'acceptabilité entre les groupes de niveau (Kruskal-Wallis : $\chi^2 = 3,888$, $df = 2$, $p = 0,1431$) (voir tableau II.36 ; voir figure II.72).

	μ	m	σ
Niveau 1	41,50	41,0	14,07
Niveau 2	36,00	37,5	12,14
Niveau 3	41,20	43,5	12,49

Tableau II.36 – Score d'acceptabilité *in situ* pour chacun des niveaux de transparence.

Nous avons mis en parallèle les résultats obtenus durant cette expérimentation avec ceux obtenus dans l'expérimentation précédente (voir section 3.1.2). Nous avons comparé uniquement les deux situations étudiées dans les deux expérimentations c'est-à-dire le carrefour à sens giratoire et le feu de signalisation avec le véhicule

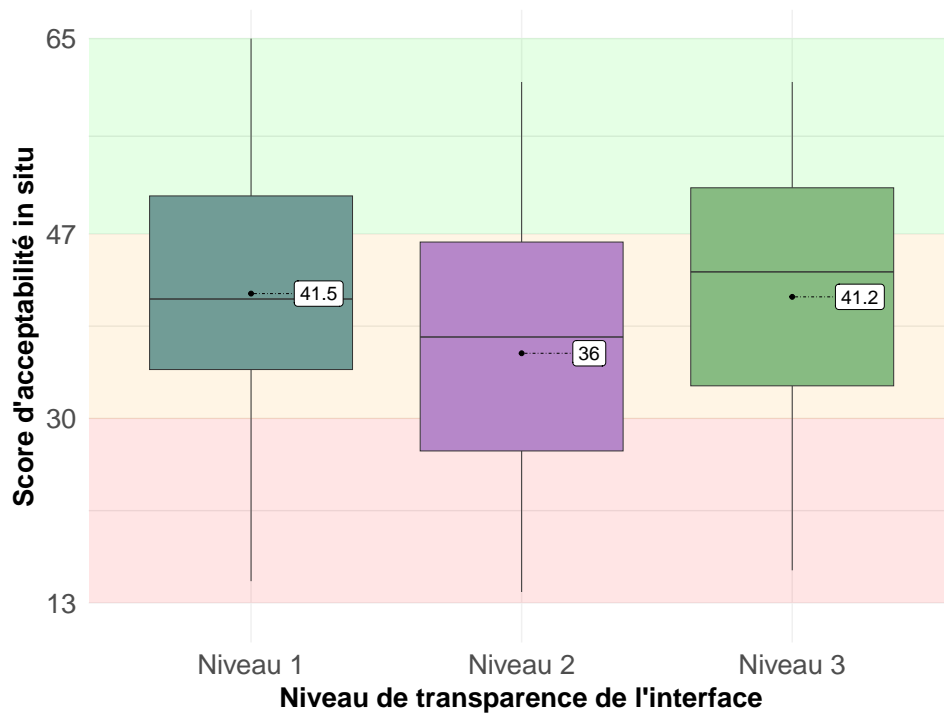


Figure II.72 – Score d'acceptabilité *in situ* en fonction du niveau de transparence.

prioritaire. Les résultats de l'expérimentation précédente, sans interface, nous donnent un niveau témoin (niveau 0). Nous n'avons pu mettre en évidence aucune différence significative dans les résultats obtenus sur le niveau 0 de l'expérimentation précédente et les niveaux 1, 2 ou 3 de cette expérimentation (voir tableau II.37 ; voir figure II.73).

	μ	m	σ
Niveau 0	35,85	36,50	13,15
Niveau 1	40,65	40,00	12,61
Niveau 2	37,25	38,00	10,75
Niveau 3	40,25	41,00	10,83

Tableau II.37 – Score d'acceptabilité *in situ* pour chacun des niveaux de transparence dans les situations de giratoire et de feu de signalisation avec véhicule prioritaire.

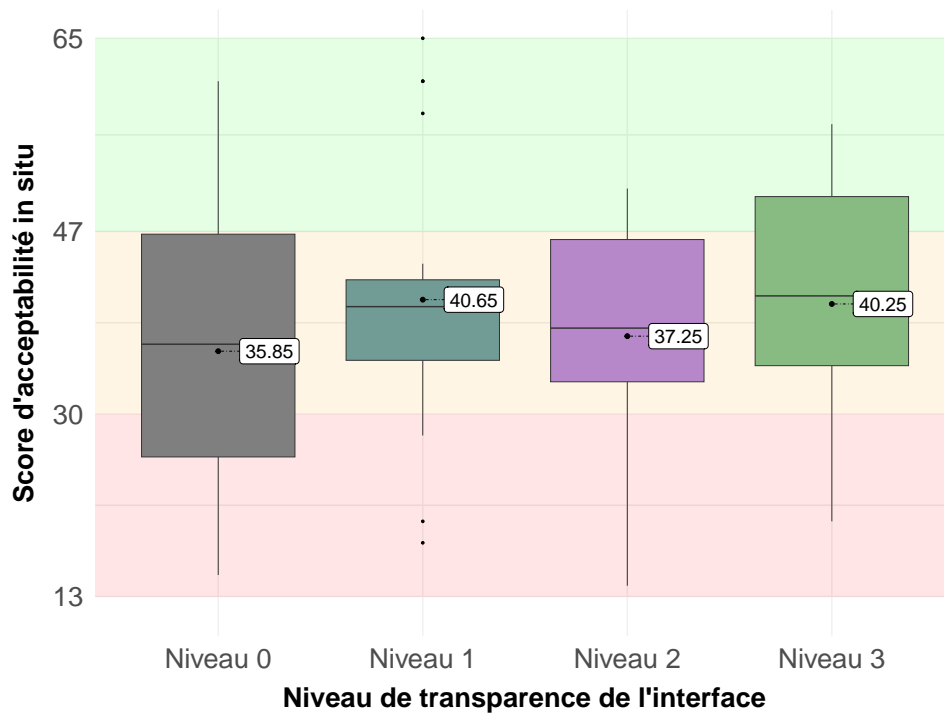


Figure II.73 – Score d'acceptabilité *in situ* en fonction du niveau de transparence dans les situations de giratoire et de feu de signalisation avec véhicule prioritaire.

Effet de l'amorçage sur l'acceptabilité *in situ*

Nous nous sommes intéressés aux résultats de l'acceptabilité *in situ* en fonction de si les participants ont reçu un amorçage de sécurité dans chacun des niveaux de transparence.

Dans le niveau 1, la moyenne d'acceptabilité *in situ* des participants du groupe "sécurité" est plus élevée que celle des participants du groupe "naïf". Cette différence n'est cependant pas significative ($\mu_{\text{sécurité}} = 43,90$; $\mu_{\text{naïf}} = 39,10$; Wilcoxon : $p = 0,136$; voir tableau II.38; voir figure II.74).

Dans le niveau 2, la moyenne d'acceptabilité *in situ* des participants du groupe "sécurité" est significativement plus basse que celle des participants du groupe "naïf" ($\mu_{\text{sécurité}} = 31,15$; $\mu_{\text{naïf}} = 44,08$; Wilcoxon : $p = 0,003$; voir tableau II.38; voir figure II.74).

Dans le niveau 3, la moyenne d'acceptabilité *in situ* des participants du groupe "sécurité" est significativement plus élevée que celle des participants du groupe "naïf". La moyenne et la médiane des participants du groupe 3 passent au-dessus du seuil d'acceptabilité *in situ* élevé ($\mu_{\text{sécurité}} = 47,75$; $\mu_{\text{naïf}} = 36,83$; Wilcoxon : $p = 0,011$; voir tableau II.38; voir figure II.74).

Effet de l'acceptabilité *a priori*

Avant la confrontation au simulateur, nous avons questionné les participants sur leur acceptabilité *a priori* des véhicules autonomes. Nous avons séparé les participants en

	"sécurité"			"naïf"		
	μ	m	σ	μ	m	σ
1	43,90	42,0	14,45	39,10	37,0	13,61
2	31,15	32,0	10,78	44,08	46,5	10,02
3	47,75	50,5	6,50	36,83	36,0	13,68

Tableau II.38 – Score d'acceptabilité *in situ* en fonction du niveau de transparence et de l'amorçage.

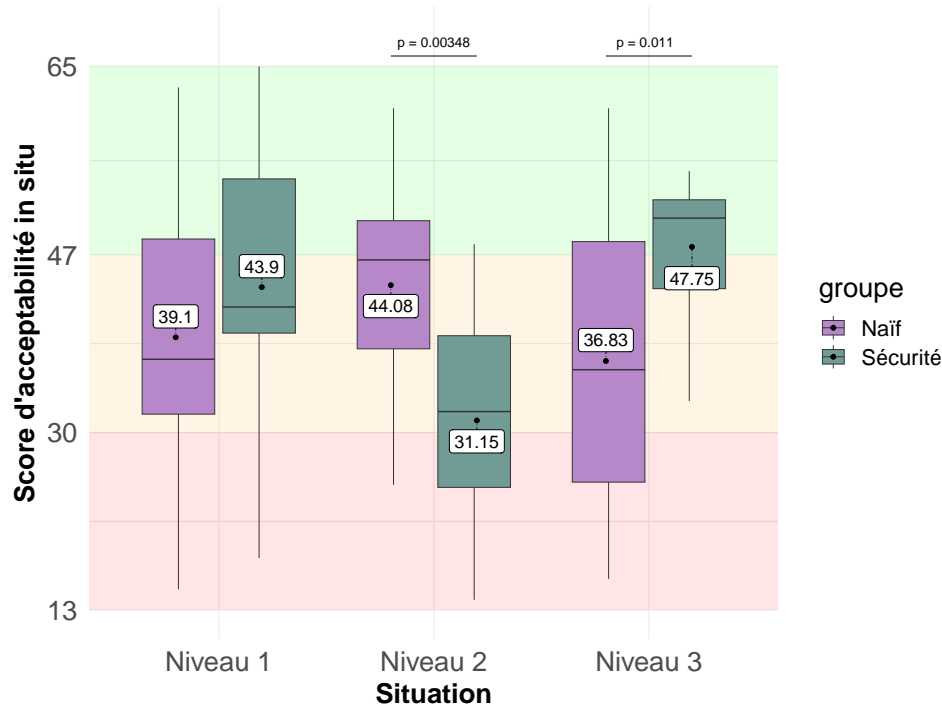


Figure II.74 – Score d'acceptabilité *in situ* en fonction de si les participants ont reçu un amorçage (groupe "sécurité") ou non (groupe "naïf").

deux groupes selon qu'ils ont une acceptabilité *a priori* élevée ou faible. Aucune différence significative n'a été mise en évidence dans les scores d'acceptabilité *in situ* entre les deux groupes (voir tableau II.39 ; voir figure II.75).

	μ	m	σ
Élevé	41,89	42,50	13,82
Moyen	31,00	20,00	14,90
Faible	39,28	41,00	12,55

Tableau II.39 – Score d'acceptabilité *in situ* en fonction du niveau d'acceptabilité *a priori*.

Conclusion

Nous avons formulé 2 hypothèses :

- (a) l'acceptabilité *in situ* augmente avec le niveau de transparence proposé par une interface ;

	“sécurité”	“naïf”
Élevé	5	4
Moyen	9	9
Faible	0	1

Tableau II.40 – Tableau de contingence montrant le nombre de participants en fonction du niveau d’acceptabilité a priori (élevé, moyen ou faible) et de la condition expérimentale (“Sécurité” ou “Naïf”).

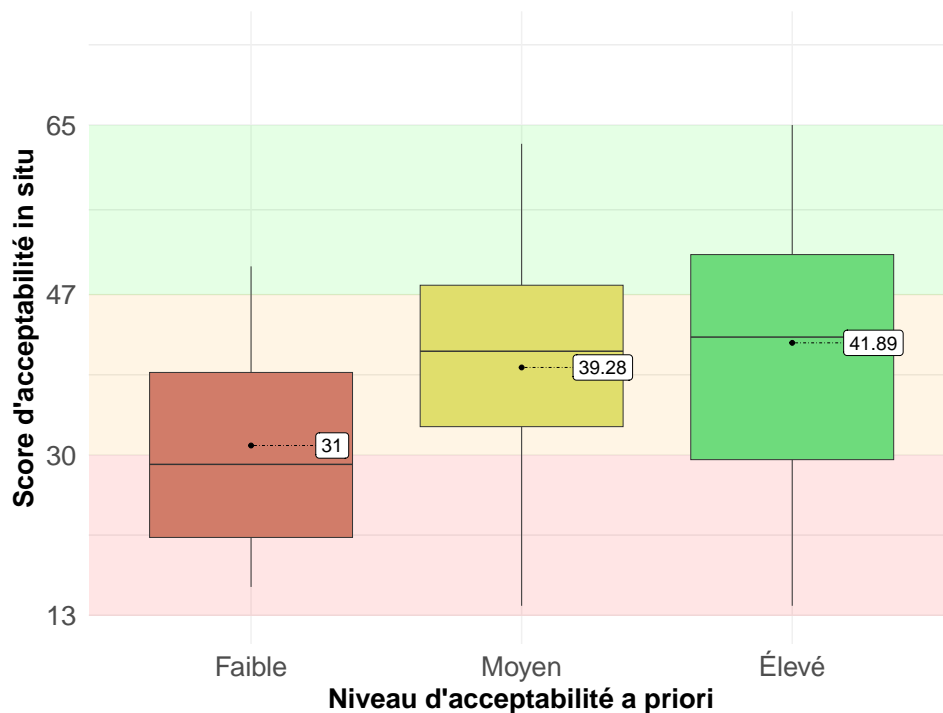


Figure II.75 – Score d’acceptabilité *in situ* en fonction du niveau d’acceptabilité *a priori*.

(b) l’amorçage et l’augmentation du niveau de transparence ont des effets cumulables.

Les résultats de cette expérimentation semblent montrer que le niveau de transparence n’a pas d’effet particulier sur l’acceptabilité *in situ* d’un véhicule autonome dans les situations étudiées. Nous n’avons ainsi pas pu valider l’hypothèse (a). La transparence n’ayant pas d’effet significatif, il est difficile d’explorer l’hypothèse (b). Cependant, nous avons observé une variation de l’acceptabilité *in situ* en fonction de la présentation d’un amorçage. La dynamique générale semble converger vers les résultats obtenus lors de nos expériences précédentes (voir section 2.2). Néanmoins, au niveau 2, l’effet observé est inversé : les participants du groupe “naïf” ont montré une acceptabilité significativement plus élevée que ceux du groupe “sécurité”. Aucune autre différence notable n’a été détectée chez les participants de ce groupe.

De plus, les résultats ont montré une absence de différence d’acceptabilité *in situ* en fonction de l’amorce présentée ou non aux participants. Ce résultat, bien que contraire à nos résultats précédents, pourrait s’expliquer par la petite taille de nos sous-groupes,

ne permettant pas d'offrir une puissance statistique satisfaisante pour conclure sur cette question dans ce contexte.

3.1.4 Conclusion

Ce chapitre a permis d'approfondir notre compréhension de l'impact des interfaces sur l'acceptabilité des véhicules autonomes, en se concentrant sur deux concepts clés : l'explicabilité et la transparence. Nos résultats indiquent que l'explicabilité, lorsqu'elle est soutenue par une variété de modalités sensorielles, peut améliorer l'acceptabilité *in situ* des comportements des véhicules autonomes, notamment dans des situations potentiellement conflictuelles. En revanche, la transparence seule n'a pas montré d'effet significatif sur l'acceptabilité *in situ* dans le cadre de notre expérimentation. Ces observations soulignent l'importance de concevoir des interfaces qui privilégient l'explicabilité plutôt que de se contenter de la transparence.

De plus, les résultats obtenus au cours de cette étude diffèrent de ceux de nos expérimentations antérieures, en particulier en ce qui concerne l'absence de différences liées aux consignes de sécurité. Une différence majeure entre les deux séries d'expérimentations réside dans l'utilisation de la réalité virtuelle, que nous n'avons pas intégrée ici. La réalité virtuelle augmente le niveau d'immersion, et il est possible que l'amorçage ne soit efficace qu'en présence d'une immersion élevée.

Ce qu'il faut retenir

- La multimodalité dans la présentation des informations améliore l'explicabilité ressentie et l'acceptabilité *in situ* en temps réel ;
- L'explicabilité améliore l'acceptabilité *in situ* en temps réel ;
- La transparence seule ne suffit pas à améliorer l'acceptabilité *in situ*.

3.2 Transfert technologique

3.2.1 Introduction

Dans cette section, nous entamons une réflexion sur les façons d'intégrer ces règles au sein des algorithmes contrôlant le comportement des véhicules autonomes. Il s'agit d'une réflexion en deux étapes :

- Comment extraire des modèles mathématiques de l'acceptabilité afin d'être embarqués dans les véhicules autonomes ?
- Comment la notion d'acceptabilité peut être intégrée dans les architectures existantes de véhicules autonomes ?

Notre objectif est de proposer une méthodologie permettant de pré-configurer ou d'adapter le comportement du véhicule autonome dans le but de maximiser l'acceptabilité, en partant de l'identification des paramètres impliqués dans l'acceptabilité (recherche théorique et empirique en laboratoire) à l'implémentation industrielle au sein des algorithmes. On parle de maturation d'une technologie.

Le niveau de maturité d'une technologie, abrégé TRL pour *Technology Readiness Level*, est un outil développé par la NASA dans les années 1970. Ce niveau, tel que décrit dans la figure II.76, permet d'évaluer la maturité d'une technologie sur une échelle de 1 (étude de principes basiques) à 9 (technologie développée, testée et éprouvée en conditions réelles) (Mankins, 1995).

Au sein de groupes industriels comme Stellantis, les passages d'un TRL à un autre représentent des jalons importants d'un projet, marqué par des tests spécifiques validant le niveau de maturité d'une technologie. Les exemples présentés dans ce document sont théoriques, et aucun jalon industriel n'a encore été passé.

Notre méthodologie propose donc de passer du TRL 1 au TRL 4.

TRL 1	Principes de bases
TRL 2	Formulation du concept
TRL 3	Preuve de concept
TRL 4	Validation en laboratoire
TRL 5	Validation en environnement contrôlé
TRL 6	Démonstration d'un prototype en environnement contrôlé
TRL 7	Démonstration d'un prototype en environnement réel
TRL 8	Système "prêt à rouler"
TRL 9	Système "prêt à rouler" et éprouvé en conditions réelles

Figure II.76 – Schéma représentant les niveaux de maturité d'une technologie décrits dans Mankins (1995)

La méthodologie proposée s'effectue en 5 étapes présentées dans les paragraphes qui suivent.

Étape 1 : Identification des paramètres

La première étape dans l'étude de l'acceptabilité est de détecter quels paramètres influent sur l'acceptabilité du comportement du véhicule autonome.

Il est d'abord nécessaire de sélectionner une échelle de paramètres impliqués dans le comportement du véhicule. Il faut ensuite isoler les variables indépendantes (environnementales, point de vue, conformation de la route) des variables dépendantes. Ces variables indépendantes seront des leviers sur lesquels nous pourrons agir au sein des algorithmes de conduite autonome pour agir sur l'acceptabilité.

Cette étape peut être effectuée de deux façons (non exclusives) :

- revue de la littérature ;
- étude exploratoire.

Cette étape équivaut au TRL 1, c'est le plus bas niveau de maturation. On étudie les effets d'un nouveau paramètre sur l'acceptabilité du comportement.

Étape 2 : Analyses empiriques

Lorsqu'un nouveau paramètre est identifié, il doit être testé en simulateur. L'objectif de ces tests doit être de mettre en évidence la façon dont l'acceptabilité du comportement du véhicule évolue en fonction des variations du paramètre étudié. Cette étape doit permettre d'établir des règles et des plages de valeurs au sein desquelles le paramètre peut évoluer afin de conserver un niveau d'acceptabilité correct.

Cette étape reste à un TRL 1.

Étape 3 : Création ou adaptation du modèle

L'étape précédente nous a permis d'obtenir des données quantitatives permettant d'estimer un niveau d'acceptabilité (ou une variation d'acceptabilité) au regard de modifications du paramètre étudié. Nous allons donc maintenant proposer un modèle incluant ce paramètre. L'objectif ici est de proposer des modélisations mathématiques reliant l'acceptabilité au paramètre étudié. Puis lorsque l'on répète l'opération avec de nouveaux paramètres, d'étendre ce modèle pour qu'il inclue ces nouveaux paramètres. Cette étape pourrait correspondre à une montée en TRL 2. Maintenant que nous avons défini la façon dont le paramètre influe sur l'acceptabilité, on peut identifier les moyens d'influer sur l'acceptabilité dans les algorithmes gérant le comportement du véhicule autonome intégrant les paramètres étudiés.

Étape 4 : Intégration du modèle

Le modèle établi à l'étape précédente peut être intégré dans les algorithmes existants de plusieurs manières :

- directement dans l'algorithme en le modifiant et en proposant de nouvelles heuristiques intégrées à l'algorithme ;
- dans une brique séparée, utilisée par la brique de prise de décision.

L'intégration du modèle au sein d'un algorithme pourrait correspondre à une montée en TRL 3. On produit ainsi des "preuves de concept" en laboratoire intégrant les modèles développés à l'étape précédente.

Étape 5 : Tests du modèle

Les phases de tests, d'abord en laboratoire (TRL 4) puis en environnement contrôlés (TRL 5) et enfin d'un prototype réaliste, proches de l'utilisation finale (TRL 6) constituent des étapes clefs de la méthode avant de pouvoir passer aux phases finales de validation d'une technologie prête à l'usage (TRL 7, 8 et 9).

La figure II.77 schématise ces 5 étapes. Les étapes 1 et 2 ont été présentées au cours des chapitres précédents de ce manuscrit. Dans la suite de ce chapitre, nous proposons des éléments permettant de passer de ces étapes aux phases de modélisation et d'intégration.



Figure II.77 – Schéma de la méthodologie proposée.

Les travaux menés durant cette thèse s'inscrivent dans les premières étapes de cette méthodologie. Les premiers chapitres montrent que nous avons pu identifier des paramètres pouvant faire varier l'acceptabilité du comportement du véhicule, comme le temps d'attente avant de s'insérer dans une intersection (étape 1). Nous avons ensuite testé empiriquement la façon dont ce paramètre fait varier l'acceptabilité dans différentes situations (étape 2). La suite de ce chapitre présente une preuve de concept des étapes suivantes, de la conception ainsi que l'intégration d'un modèle intégrant ces travaux (étapes 3 et 4).

3.2.2 Création ou adaptation du modèle

Dans cette section, nous proposons des approches utilisant les données issues des étapes précédentes afin de modéliser l'acceptabilité *in situ* pour une future intégration industrielle.

La modélisation de l'acceptabilité *in situ* du comportement d'un véhicule autonome présente un intérêt dans la configuration des paramètres algorithmiques. En effet, il peut exister un comportement optimal en termes de sécurité et de respect du Code de la route. Cependant, à l'instar du comportement humain, ce comportement peut être ajusté : le véhicule peut accélérer plus ou moins vite dans certaines situations ou bien attendre plus ou moins longtemps avant de s'engager dans une intersection.

L'algorithme dispose donc d'une certaine marge de manœuvre sur certains paramètres. Comme on a pu le voir dans les chapitres précédents, la difficulté réside dans la

compréhension de l'influence de ces paramètres sur le ressenti des passagers. C'est là qu'intervient l'acceptabilité dont la modélisation pourrait permettre d'ajuster les algorithmes et d'y insérer cette marge de manœuvre afin que le comportement ne soit pas rejeté par les passagers ou les autres usagers de la route.

Dans un premier temps, cette modélisation peut permettre de proposer un profil moyen. Empiriquement, on peut étudier l'acceptabilité moyenne d'un échantillon représentatif afin d'en proposer une modélisation. Celle-ci pourrait servir à une calibration initiale des algorithmes "sortie d'usine". L'intérêt pour les constructeurs est d'être capable de proposer un véhicule autonome dont le comportement est accepté par le plus grand nombre de personnes.

Il est possible d'étendre cette idée et de proposer non plus un profil moyen, mais différents profils, par exemple davantage défensifs ou davantage agressifs, sélectionnables en fonction des profils des passagers. On pourrait même envisager une solution dans laquelle le véhicule pourrait re-calibrer les profils en temps réel en fonction de certains feedbacks des passagers.

3.2.2.1 Objectif

On voudrait modéliser *acc* l'acceptabilité *in situ*, perçue par le passager d'un véhicule autonome tel que :

$$acc = f(\Theta), \quad (3.1)$$

où

- $\Theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_n]^T$ est le vecteur des paramètres agissant sur l'acceptabilité ;
- $f: \mathbb{R}^n \rightarrow [13, 65]$ est une fonction liant les paramètres à un score d'acceptabilité compris entre 13 et 65. Nous souhaitons obtenir un score d'acceptabilité *in situ* comparable à celui mesuré dans les phases expérimentales (le questionnaire offrant un score entre 13 et 65)

Dans ce chapitre, pour l'exemple, nous allons nous limiter à l'étude d'un seul paramètre à savoir le temps d'attente dans certaines situations, car il s'agit du paramètre pour lequel nous disposons du plus grand nombre de données. De plus, notre objectif ici est de formaliser une démarche méthodologique. La méthodologie présentée reste toutefois valable, quels que soient les paramètres étudiés.

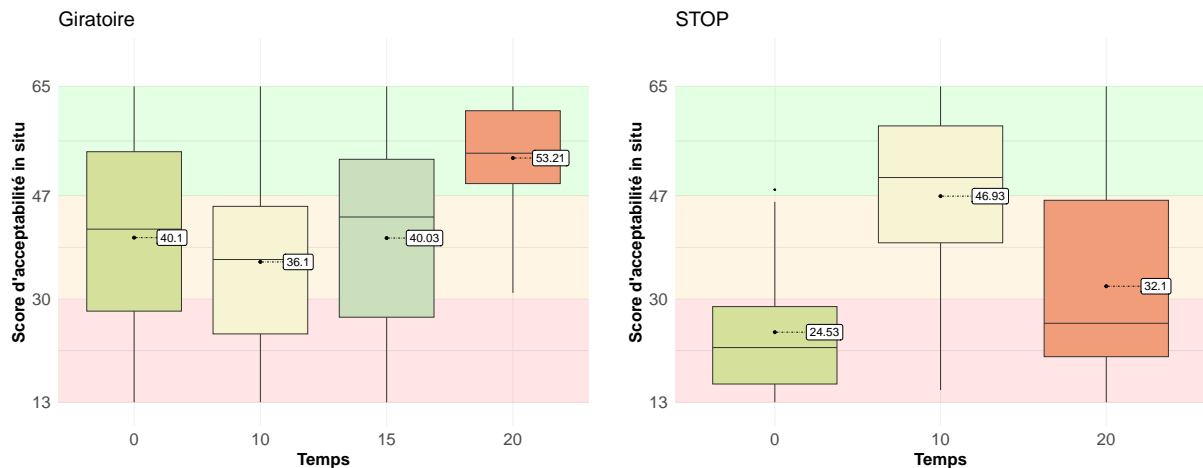
3.2.2.2 Les données

Nous disposons de données quantitatives, il s'agit de mesures de l'acceptabilité *in situ* dans différentes situations. Ces données sont issues de l'expérimentation présentée dans la section 2.2.

Acceptabilité en fonction du temps d'attente

Cette variable correspond au temps d'attente avant qu'un véhicule s'engage dans une situation. La figure II.78a montre l'acceptabilité *in situ* mesurée pour différents temps

d'attente avant de s'engager dans un carrefour à sens giratoire. La figure II.78b montre l'acceptabilité *in situ* mesurée pour différents temps d'attente avant de s'engager dans une intersection.



(a) Score d'acceptabilité *in situ* en fonction du temps d'attente dans les situations de carrefour à sens **giratoire**.

(b) Score d'acceptabilité *in situ* en fonction du temps d'attente dans les situations d'intersection avec un **STOP**.

Figure II.78 – Acceptabilité en fonction du temps d'attente dans 2 types d'intersections.

3.2.2.3 Approche par modèle déterministe

Une première approche envisagée pour modéliser la variation d'acceptabilité en fonction du comportement du véhicule autonome est une approche déterministe. Une approche déterministe produit toujours les mêmes résultats lorsqu'on part des mêmes conditions initiales. Il n'y a pas d'incertitude dans les résultats; tout est fixé par les conditions de départ (Draper & Smith, 1998).

Lorsqu'on observe les scores d'acceptabilité en fonction du temps d'attente des figures II.78a et II.78b, on voit que les médianes forment des profils sans discontinuités et incurvés. Au regard de nos données, nous avons choisi d'utiliser des polynômes pour modéliser l'acceptabilité en fonction du temps d'attente t_a . Ainsi, on considère pour ces situations une acceptabilité de la forme :

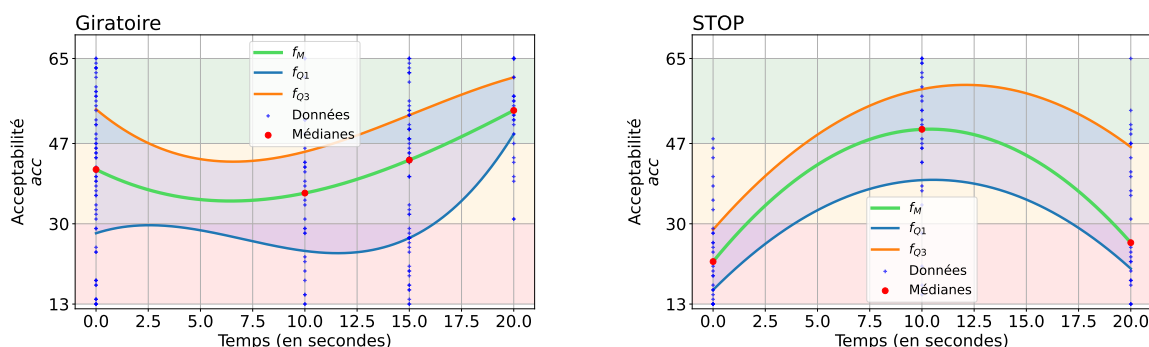
$$acc = \sum_i^N \beta_i t_a^i, \quad (3.2)$$

- β_i sont les coefficients du polynôme;
- N est le degré du polynôme (fixé *a priori*);
- t_a est le temps d'attente.

Les coefficients β_i sont déterminés à partir de nos données grâce à une régression polynomiale garantissant la plus petite erreur au sens des moindres carrés. Il s'agit d'une méthode qui consiste à minimiser l'écart entre les valeurs observées (réelles) et les valeurs prédites par le modèle de régression.

Les données présentées dans les figures II.78a et II.78b montrent des tendances différentes en fonction du type d'intersection. Nous avons donc modélisé séparément la variation d'acceptabilité en fonction du temps d'attente dans chacune des intersections. Pour chaque situation (sens giratoire et Stop), nous avons extrait les médianes ainsi que les quartiles du score d'acceptabilité *in situ* en fonction des différents temps d'attente proposés durant nos expérimentations. L'écart entre les courbes de régression des quartiles 1 et 3 donne l'écart inter-quartile. Plus il est petit, plus la variabilité du score d'acceptabilité *in situ* est petite pour un temps d'attente donné. À partir de ces valeurs, nous avons calculé trois modèles de régression, les figures II.79a et II.79b illustrent les résultats des régressions polynomiales, respectivement dans la situation de carrefour à sens giratoire, et intersection avec STOP :

- la courbe de la fonction f_M tracée en vert représente la régression polynomiale sur tout le jeu de données ;
- la courbe de la fonction f_{Q_1} tracée en orange représente la régression polynomiale sur le premier quartile de chaque temps d'attente ;
- la courbe de la fonction f_{Q_3} tracée en bleu représente la régression polynomiale sur le troisième quartile de chaque temps d'attente.



(a) Régression sur le score d'acceptabilité *in situ* en fonction du temps d'attente dans les situations de carrefour à sens giratoire.

(b) Régression sur le score d'acceptabilité *in situ* en fonction du temps d'attente dans les intersections avec STOP.

Figure II.79 – Acceptabilité en fonction du temps d'attente dans 2 types d'intersections.

Dans la situation du carrefour à sens giratoire (voir figure II.79a), la régression polynomiale de degré 3 est celle qui capture le mieux la tendance des données. Ainsi, pour $N = 3$, on cherche à modéliser les données selon l'équation suivante.

$$acc = \sum_i^3 \beta_i t_a^i = \beta_3 t_a^3 + \beta_2 t_a^2 + \beta_1 t_a + \beta_0. \quad (3.3)$$

L'opération de régression par la méthode des moindres carrés permet d'obtenir les équations suivantes modélisant respectivement le jeu des données complet, les premiers quartiles et les troisièmes quartiles.

$$f_M(t_a) = -0.0028 t_a^3 + 0.20 t_a^2 - 2.19 t_a + 41.50. \quad (3.4)$$

$$f_{Q_1}(t_a) = 0.016 t_a^3 - 0.34 t_a^2 + 1.43 t_a + 28. \quad (3.5)$$

$$f_{Q_3}(t_a) = -0.0079 t_a^3 - 0.36 t_a^2 - 3.72 t_a + 54.25. \quad (3.6)$$

Les données montrent une variation négative entre 0 s et 6 s de l'acceptabilité médiane en fonction du temps d'attente. Elle devient ensuite positive et est maximale pour le temps d'attente maximale testé : 20 s.

Dans le cas, de l'intersection avec STOP (voir figure II.79a), , l'opération de régression par la méthode des moindres carrés permet d'obtenir les équations suivantes modélisant respectivement le jeu des données complet, les premiers quartiles et les troisièmes quartiles.

$$f_M(t_a) = -0.3 t_a^2 + 5.4 t_a + 22. \quad (3.7)$$

$$f_{Q_1}(t_a) = -0.21 t_a^2 + 4.43 t_a + 22. \quad (3.8)$$

$$f_{Q_3}(t_a) = -0.21 t_a^2 + 5.075 t_a + 28.75. \quad (3.9)$$

Dans cette situation, les données montrent une variation positive entre 0 s et 10 s de l'acceptabilité médiane en fonction du temps d'attente. Elle devient ensuite négative. Le temps d'attente optimal semble donc être de 10 s puisque l'acceptabilité médiane y est la plus grande.

Les modèles ainsi obtenus permettent de capturer les tendances du score d'acceptabilité en fonction du temps d'attente et de la situation. Ils peuvent donc être utilisés pour reconfigurer les paramètres des algorithmes de conduite autonome en vue d'augmenter, voire maximiser, l'acceptabilité.

Évidemment ces premiers modèles mathématiques ne constituent que des résultats préliminaires qui mériteraient d'être affinés. En effet, pour chaque courbe des figures II.79b et II.79a, les régressions sont faites sur un nombre limité de modalités issues de nos expérimentations. De nouvelles expérimentations avec d'autres temps d'attente permettraient de consolider les tendances des courbes. Par exemple, on peut raisonnablement supposer que dans le cas du carrefour à sens giratoire le score d'acceptabilité finira par redescendre au-delà d'un certain temps d'attente trop long. La méthodologie pour obtenir ces modèles déterministes pourrait s'étendre à davantage de situations comme les priorités à droite, les intersections avec passages piétons, d'autres types d'intersections, etc. Les tendances obtenues pourraient de nouveau être approximées par des polynômes, ou par d'autres types de fonctions si nécessaires (exponentielles, logarithmes, fonctions trigonométriques, etc.).

3.2.2.4 Approche par modèle probabiliste

Une autre approche applicable pourrait être une approche probabiliste permettant d'intégrer dans le modèle l'incertitude et la variabilité des données. La modélisation à l'aide de lois de probabilité permet d'intégrer de l'aléa au modèle et d'exprimer les résultats en termes de probabilité de survenue d'un évènement (Gelman, 2014).

Dans notre contexte, nous disposons d'un petit échantillon, qui ne semble pas suivre de distribution classique connue (loi normale par exemple). Une distribution de loi bêta

permet de capturer l'incertitude associée à la taille limitée d'un échantillon tout en restant flexible pour modéliser des distributions variées. La distribution bêta est bornée, et permet donc de modéliser des données dont les valeurs sont restreintes (comme dans notre contexte, entre 13 et 65).

Les paramètres α et β de la loi sont des paramètres de forme dans l'intervalle $]0, +\infty[$, permettant à la fonction de prendre une grande variété de formes. Elle est ainsi bien adaptée à la modélisation de fonctions dont on n'a pas de connaissances *a priori* sur la forme.

La distribution bêta est une distribution qui suit une loi de densité $f(x; a, b)$ définie comme suit :

$$f(x; a, b) = \frac{x^{a-1}(1-x)^{b-1}}{B(a, b)}$$

où B est la fonction bêta (intégrale d'Euler de première espèce) définie pour tous nombres complexes x et y à partie réelle strictement positive, telle que :

$$B(x, y) = \int_0^1 t^{x-1}(1-t)^{y-1} dt = \frac{\Gamma(x)\Gamma(y)}{\Gamma(x+y)}$$

où Γ est la fonction gamma (intégrale d'Euler de seconde espèce), prolongement de la fonction factorielle, telle que, pour $n \in \mathbb{N}$

$$\Gamma(n) = (n-1)!$$

pour tous entiers naturels m et n , on a donc la relation

$$B(n, m) = \frac{(n-1)!(m-1)!}{(n+m-1)!} = \frac{n+m}{nm \binom{n+m}{n}}$$

Estimation des paramètres

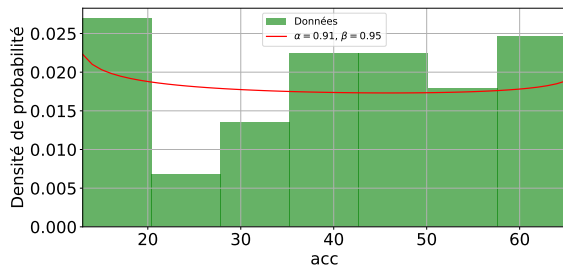
Pour l'exemple, nous allons traiter uniquement les données issues des expérimentations de carrefour à sens giratoire (voir figure II.78a). Notre démarche consiste à ajuster une distribution suivant une loi bêta, cet ajustement se fait par l'estimation des paramètres de forme α et β par l'estimateur du maximum de vraisemblance.

On obtient ainsi une fonction de densité ajustée à nos données, cette fonction modélise la distribution de ces dernières (voir figures II.80a, II.81a, II.82a, II.83a). Les paramètres α et β ont une influence sur la forme de la fonction de densité. Par exemple, dans les situations de carrefour à sens giratoire avec un temps d'attente de 20 secondes (voir figure II.83a), l'histogramme montre une plus grande concentration des données vers les valeurs élevées du score d'acceptabilité. Ce phénomène est représenté dans l'ajustement de la loi par des valeurs $\alpha > 1$ et $\beta > 1$, générant une densité unimodale. Il est également possible de tracer la fonction de répartition associée à la loi de probabilité ajustée (voir figures II.80b, II.81b, II.82b, II.83b). Cette fonction caractérise la loi de probabilité telle que

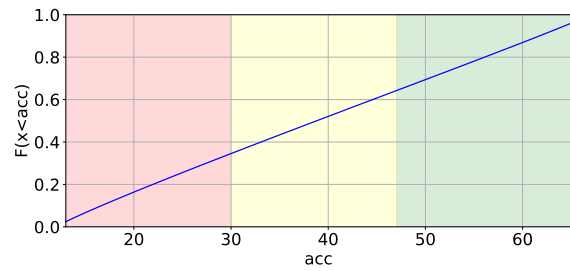
$$F_X(x) = \mathbb{P}(X \leq x)$$

c'est-à-dire que, dans notre exemple, $\forall x \in [13, 65]$, la probabilité que la variable aléatoire X soit inférieure ou égale à x est donnée par la fonction de répartition. Ces modèles permettent donc d'estimer que, pour 20 secondes d'attente avant de s'insérer dans un carrefour à sens giratoire, la probabilité que l'acceptabilité soit supérieure à 47 (correspondant à la limite de la zone d'acceptabilité élevée) est :

$\mathbb{P}(acc > 47) = 1 - \mathbb{P}(acc \leq 47) \approx 1 - 0.25 = 0.75$. Il y a donc 75% de chance d'y avoir une acceptabilité élevée dans ce contexte.

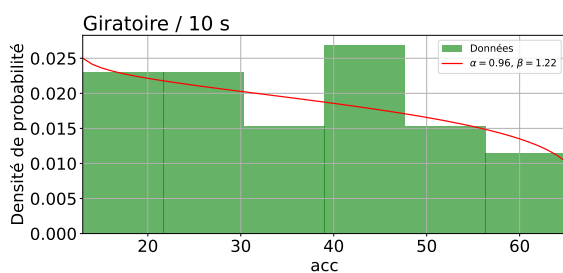


(a) Densité de probabilité ajustée sur les données de carrefour à sens **giratoire** pour **0 seconde** de temps d'attente.

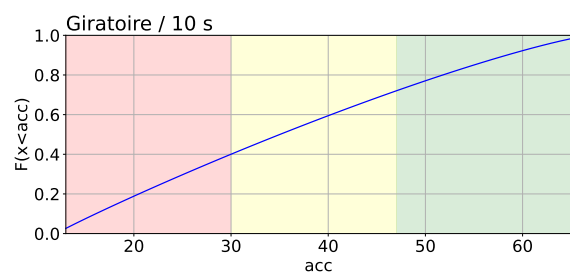


(b) Fonction de répartition caractérisant la loi de probabilité ajustée sur les données de carrefour à sens **giratoire** pour **0 seconde** de temps d'attente.

Figure II.80 – Comparaison entre la densité et la fonction de répartition pour un temps d'attente de **0 seconde**.

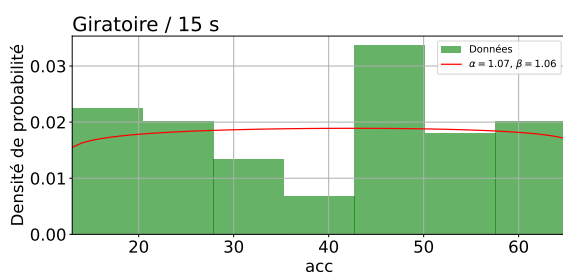


(a) Densité de probabilité ajustée sur les données de carrefour à sens **giratoire** pour **10 secondes** de temps d'attente.

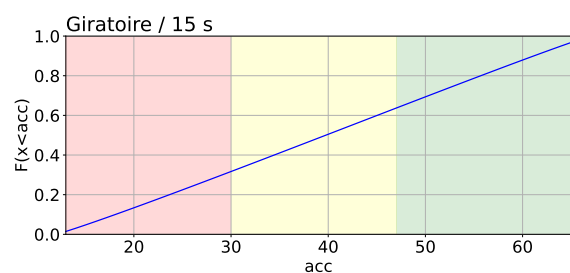


(b) Fonction de répartition caractérisant la loi de probabilité ajustée sur les données de carrefour à sens **giratoire** pour **10 secondes** de temps d'attente.

Figure II.81 – Comparaison entre la densité et la fonction de répartition pour un temps d'attente de **10 secondes**.

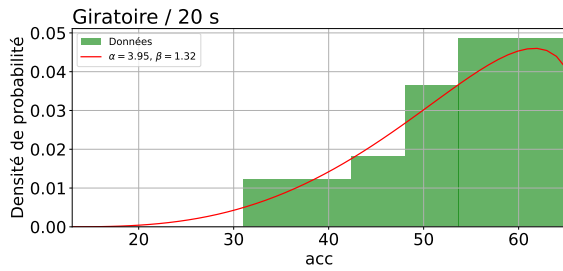


(a) Densité de probabilité ajustée sur les données de carrefour à sens **giratoire** pour **15 secondes** de temps d'attente.

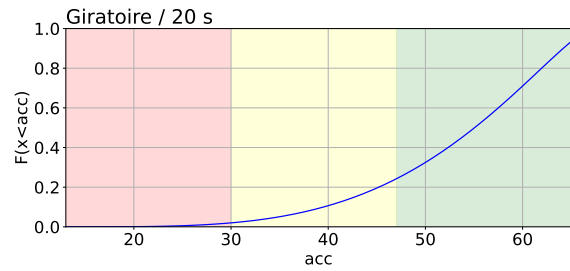


(b) Fonction de répartition caractérisant la loi de probabilité ajustée sur les données de carrefour à sens **giratoire** pour **15 secondes** de temps d'attente.

Figure II.82 – Comparaison entre la densité et la fonction de répartition pour un temps d'attente de **15 secondes**.



(a) Densité de probabilité ajustée sur les données de carrefour à sens **giratoire** pour 20 **secondes** de temps d'attente.



(b) Fonction de répartition caractérisant la loi de probabilité ajustée sur les données de carrefour à sens **giratoire** pour 20 **secondes** de temps d'attente.

Figure II.83 – Comparaison entre la densité et la fonction de répartition pour un temps d'attente de **20 secondes**.

Dans ce contexte, on peut imaginer qu'un algorithme de prise de décision dispose d'un ensemble de modèles probabilistes pour les différents paramètres. En étant dans une situation, l'algorithme sélectionnerait les modèles correspondants et pourrait estimer les modalités qui offriraient la plus grande probabilité d'avoir une acceptabilité élevée au regard des distributions disponibles.

Dans notre exemple, si on cherche dans les figures II.80b, II.81b, II.82b et II.83b,

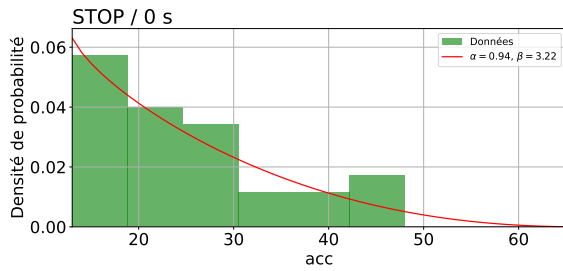
- pour 0 seconde d'attente, on a $\mathbb{P}(acc > 47) \approx 0,35$;
- pour 10 secondes d'attente, on a $\mathbb{P}(acc > 47) \approx 0,27$;
- pour 15 secondes d'attente, on a $\mathbb{P}(acc > 47) \approx 0,37$;
- pour 20 secondes d'attente, on a $\mathbb{P}(acc > 47) \approx 0,72$;

Il est plus probable d'avoir un **niveau d'acceptabilité *in situ* élevé si le véhicule attend 20 secondes dans un carrefour à sens giratoire.**

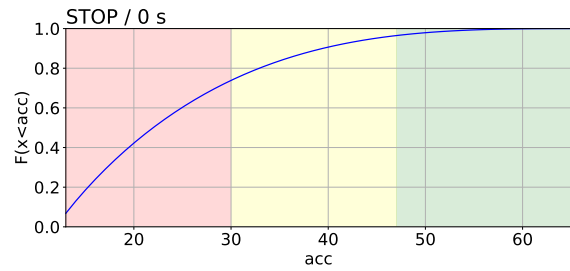
Si on s'intéresse maintenant aux données de l'acceptabilité *in situ* en fonction du temps d'attente avec de s'insérer dans une intersection un Stop, après avoir caractérisé les fonctions de densité et de répartition pour chaque temps d'attente, on obtient (voir figures II.84b, II.85b et II.86b) :

- pour 0 seconde d'attente, on a $\mathbb{P}(acc > 47) \approx 0,03$;
- pour 10 secondes d'attente, on a $\mathbb{P}(acc > 47) \approx 0,53$;
- pour 20 secondes d'attente, on a $\mathbb{P}(acc > 47) \approx 0,12$;

Il est plus probable d'avoir un **niveau d'acceptabilité *in situ* élevé si le véhicule attend 10 secondes dans une intersection avec un STOP.**

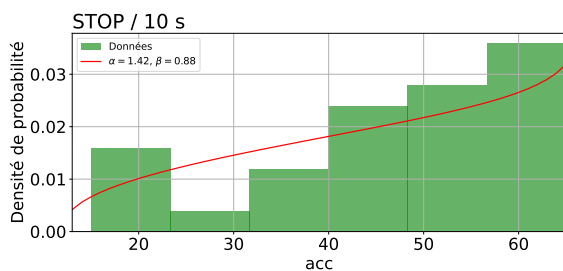


(a) Densité de probabilité ajustée sur les données d'intersection avec un **STOP** pour 0 seconde de temps d'attente.

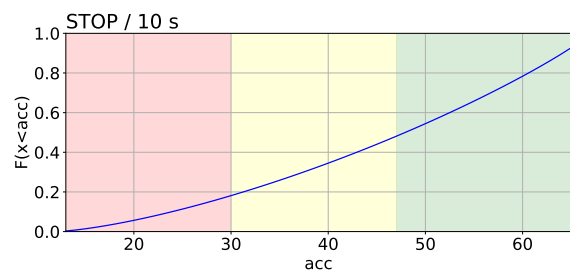


(b) Fonction de répartition caractérisant la loi de probabilité ajustée sur les données d'intersection avec un **STOP** pour 0 seconde de temps d'attente.

Figure II.84 – Comparaison entre la densité et la fonction de répartition pour un temps d'attente de **0 seconde**.

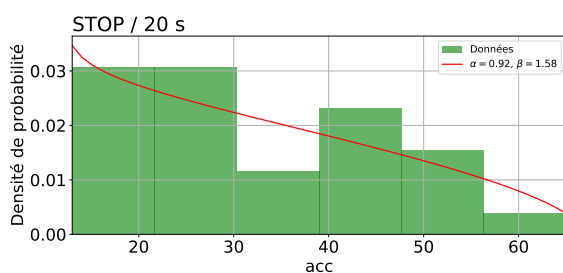


(a) Densité de probabilité ajustée sur les données d'intersection avec un **STOP** pour 10 secondes de temps d'attente.

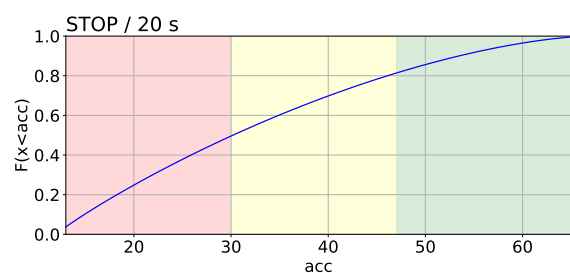


(b) Fonction de répartition caractérisant la loi de probabilité ajustée sur les données d'intersection avec un **STOP** pour 10 secondes de temps d'attente.

Figure II.85 – Comparaison entre la densité et la fonction de répartition pour un temps d'attente de **10 secondes**.



(a) Densité de probabilité ajustée sur les données d'intersection avec un **STOP** pour 20 secondes de temps d'attente.



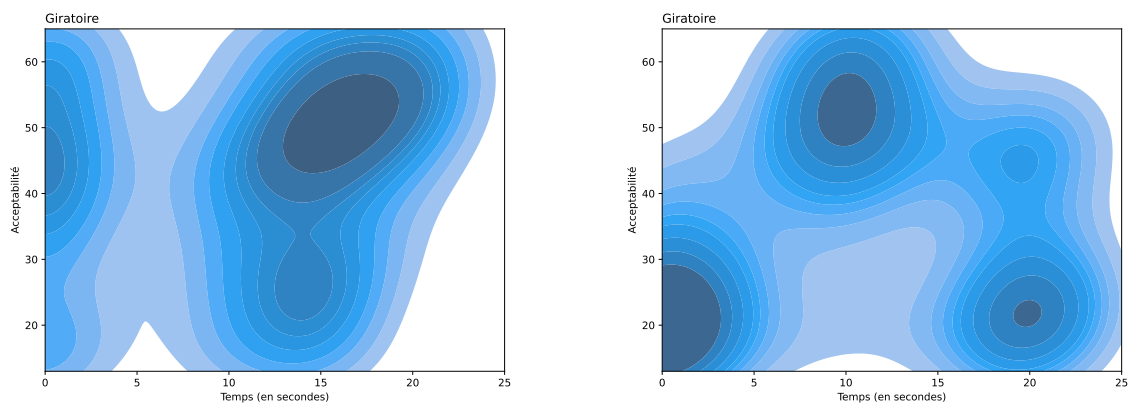
(b) Fonction de répartition caractérisant la loi de probabilité ajustée sur les données d'intersection avec un **STOP** pour 20 secondes de temps d'attente.

Figure II.86 – Comparaison entre la densité et la fonction de répartition pour un temps d'attente de **20 secondes**.

Extension du modèle probabiliste

La méthode précédente limiterait un algorithme d'optimisation à des valeurs discrètes du paramètre d'intérêt pour lesquels il a été possible de construire un modèle. Il est possible de construire un modèle probabiliste pour estimer une probabilité d'obtenir une valeur d'acceptabilité pour tous les temps d'attente compris dans nos valeurs d'intérêt.

La méthode de lissage par noyau permet d'estimer la densité de probabilité de la totalité du jeu de données. Les figures II.87a et II.87b présentent le résultat du lissage et la distribution du score d'acceptabilité en fonction du temps d'attente. La probabilité que les points de données tombent dans une région spécifique est calculée en intégrant la fonction de densité de probabilité sur cette région. La fonction de densité de probabilité estimée (kde) donne la densité des points dans l'espace des variables. L'intégration de cette fonction sur une région spécifique donne la probabilité que les points de données se trouvent dans cette région. La couleur du graphique KDE indique la densité de probabilité, avec des couleurs plus foncées représentant des densités plus élevées. L'intégration sur une région où les couleurs sont plus foncées donnera une probabilité plus élevée que dans une région où les couleurs sont plus claires.



(a) Lissage par noyau (KDE) illustrant la distribution conjointe entre le temps d'attente (en secondes) et l'acceptabilité dans les carrefours à sens **giratoire**.

(b) Lissage par noyau (KDE) illustrant la distribution conjointe entre le temps d'attente (en secondes) et l'acceptabilité dans les intersections avec **STOP**.

Figure II.87 – Lissage par noyau (KDE)

3.2.2.5 Conclusion

Dans cette section, nous proposons deux approches pour modéliser les variations de l'acceptabilité en fonction de paramètres du comportement d'un véhicule autonome. La première approche, déterministe, offre un résultat prévisible et constant pour des paramètres d'entrée identiques. Ces modèles offrent un avantage en termes de simplicité et d'interprétation. En effet, la nature souvent non linéaire et contextuelle du comportement humain face aux véhicules autonomes est difficilement représentée par

ces modèles statiques. Cependant, ils offrent une bonne estimation de l'acceptabilité médiane *in situ*, en fournissant une représentation robuste des comportements types dans des situations standards. La seconde approche, probabiliste, introduit la notion d'incertitude dans les modèles proposés, permettant de mieux prendre en compte la variabilité inhérente aux perceptions individuelles et contextuelles. Cela permet de modéliser l'acceptabilité médiane, mais aussi la distribution complète des réactions, en estimant par exemple la probabilité qu'un comportement donné soit perçu comme acceptable ou non. Cette approche permet ainsi de mieux anticiper les scénarios. Dans notre exemple, les deux approches ont fourni des résultats sensiblement similaires, le tableau II.41 synthétise les avantages et les inconvénients de chaque méthode.

Critères	Approche déterministe	Approche probabiliste
Précision des résultats	Résultats précis et fixes pour des conditions initiales données.	Intègre la variabilité et l'incertitude dans les résultats.
Modélisation des données	Utilisation de polynômes pour modéliser les tendances observées.	Modélisation via des lois de probabilité (comme la loi bêta).
Adaptabilité aux variations des données	Moins flexible face à des fluctuations ou des données incertaines.	Très flexible pour capturer l'aléa et la variabilité des données.
Complexité des calculs	Calculs relativement simples (régression polynomiale).	Calculs plus complexes, nécessite l'estimation de paramètres probabilistes.
Interprétation des résultats	Les résultats sont fixes et facilement interprétables.	Les résultats sont exprimés en termes de probabilité, ce qui peut être moins intuitif.
Applicabilité à des situations variées	Nécessite des modèles spécifiques pour chaque situation (ex. giratoire, STOP).	Peut être généralisé à plusieurs situations avec des distributions adaptées.
Exploitation des résultats	Utilisé pour ajuster directement les paramètres d'un algorithme.	Permet d'estimer la probabilité d'obtenir une acceptabilité élevée, utile pour des décisions probabilistes.
Limitation des données	Moins efficace avec de petits échantillons de données ou de grandes incertitudes.	Bien adapté à des échantillons limités ou incertains, grâce aux distributions probabilistes.
Robustesse aux nouvelles données	Les modèles doivent être recalculés ou ajustés avec de nouvelles données.	S'adapte plus facilement à de nouvelles données par ajustement des probabilités.
Niveau de maturité	Approche standard bien établie mais nécessitant des ajustements pour être plus généralisée.	Approche plus avancée, nécessitant des connaissances approfondies pour sa mise en œuvre.

Tableau II.41 – Comparaison des approches déterministe et probabiliste pour la modélisation de l'acceptabilité *in situ*.

3.2.3 Intégration de l'acceptabilité dans les algorithmes des véhicules autonomes

3.2.3.1 Intégration dans une stratégie de décision

On peut prendre un exemple pour déterminer à quel niveau l'acceptabilité peut être intégrée à l'échelle d'une stratégie de conduite. La figure II.88 présente la stratégie simplifiée d'insertion dans une intersection avec un STOP. Dans cette stratégie, si le véhicule suit scrupuleusement le Code de la route, s'il a la place de s'engager, il le fait, sinon il attend. On imagine assez bien que dans les situations à forte densité de trafic, le véhicule pourrait théoriquement attendre indéfiniment.

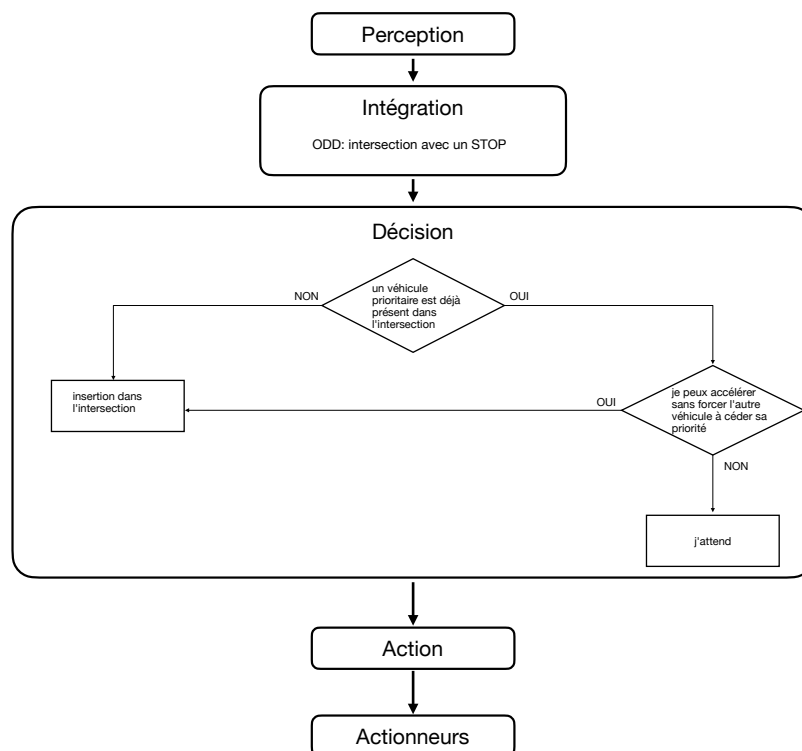


Figure II.88 – Stratégie d'insertion dans une intersection avec un **STOP** dans laquelle le véhicule respecte uniquement le Code de la route.

On peut donc utiliser les résultats sur l'évolution de l'acceptabilité en fonction des différents paramètres pour déterminer des seuils qui permettront d'adapter la stratégie. La figure II.89 présente une stratégie adaptée, dans laquelle on a intégré le temps d'attente. Ici, si le temps dépasse le seuil déterminé, la stratégie est modifiée, permettant au véhicule de s'insérer en "forçant la priorité" après avoir déterminé si le véhicule en approche a la possibilité de s'arrêter confortablement.

Au fur et à mesure de l'avancée des recherches et des essais dans la modélisation des paramètres impliqués dans l'acceptabilité du comportement du véhicule autonome, il faudra adapter cette stratégie pour prendre en compte les différents paramètres. Pour l'exemple, on peut imaginer que l'accélération a un effet sur l'acceptabilité. La figure II.90 montre comment on peut agrémenter la stratégie en y intégrant les valeurs d'accélération acceptables (au regard des tests à effectuer).

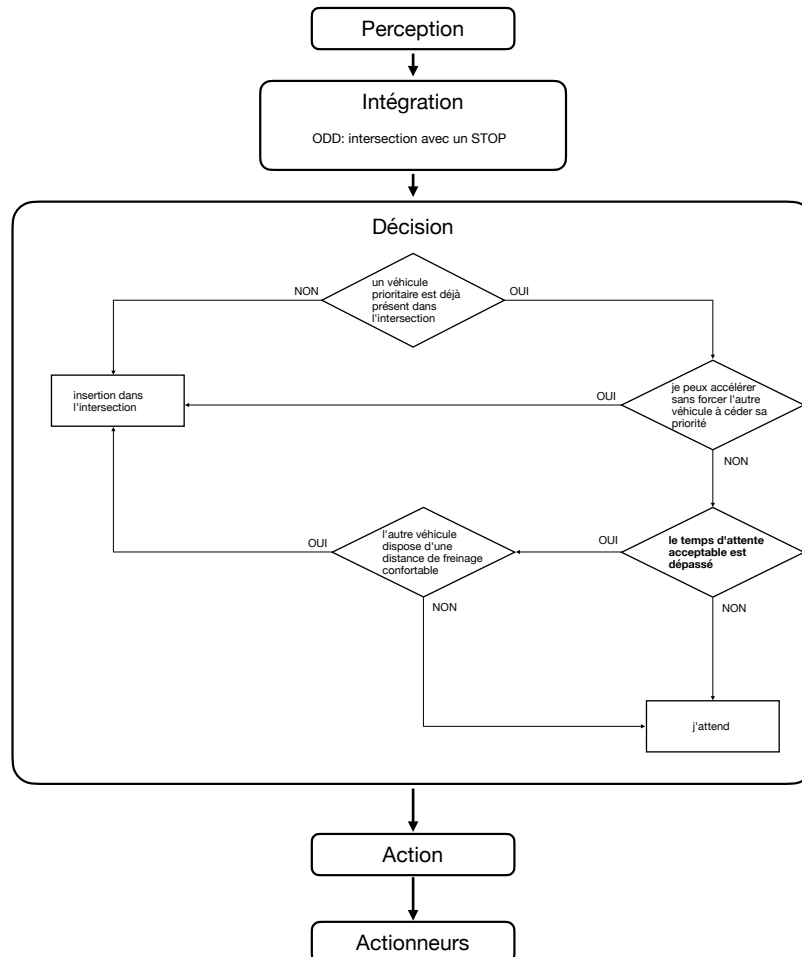


Figure II.89 – Stratégie d’insertion dans une intersection avec un **STOP** intégrant le temps d’attente.

Ces stratégies peuvent permettre de déterminer les paramètres qui influent sur l’acceptabilité. Dans l’exemple, on peut observer que la mise en place de la stratégie peut impliquer une décision sur (voir figure II.91) :

- le temps que l’on va passer à attendre ;
- la puissance de l’accélération pour s’engager ;
- la distance au véhicule devant lequel on pourrait s’engager.

Ce constat permet d’orienter les recherches dans la modélisation de l’acceptabilité telles que présentées dans la section 3.2.2. De premiers travaux menés en interne chez Stellantis ont porté sur l’application des critères d’acceptabilité des algorithmes de conduite autonomes (Stellantis, 2024). Le projet a proposé une série d’expérimentations en simulation dans lesquelles les critères d’acceptabilité caractérisés dans nos travaux ont été appliqués aux algorithmes de conduite. Les situations étudiées sont celles décrites dans le tableau II.42.

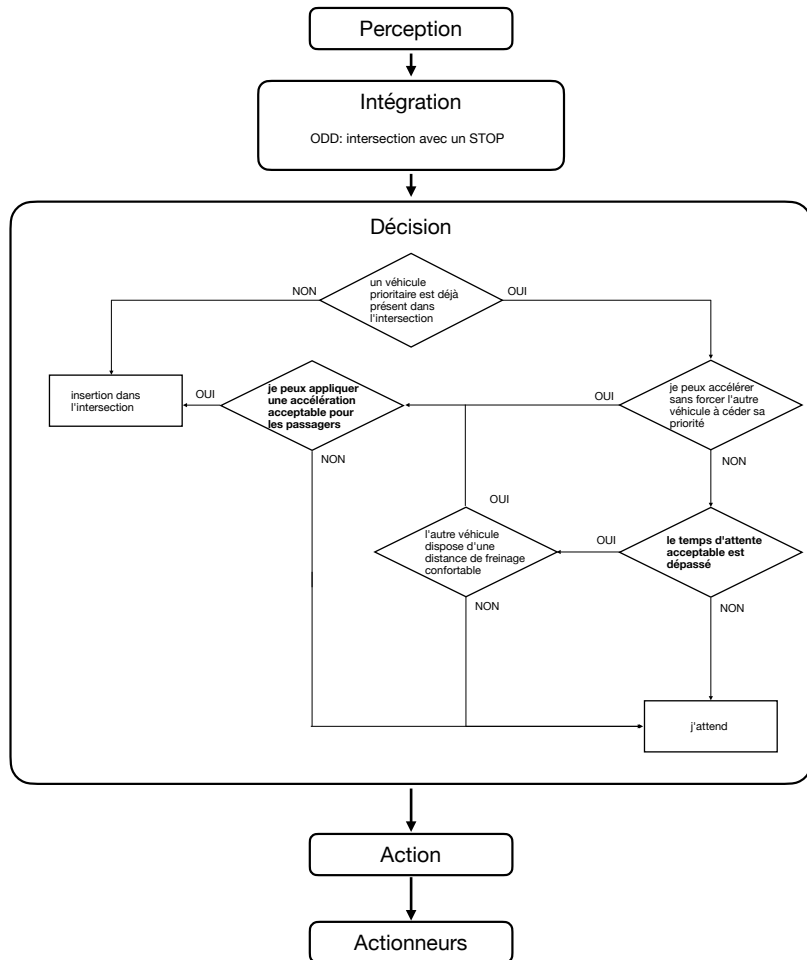


Figure II.90 – Stratégie d’insertion dans une intersection avec un **STOP** intégrant le temps d’attente et l’accélération.

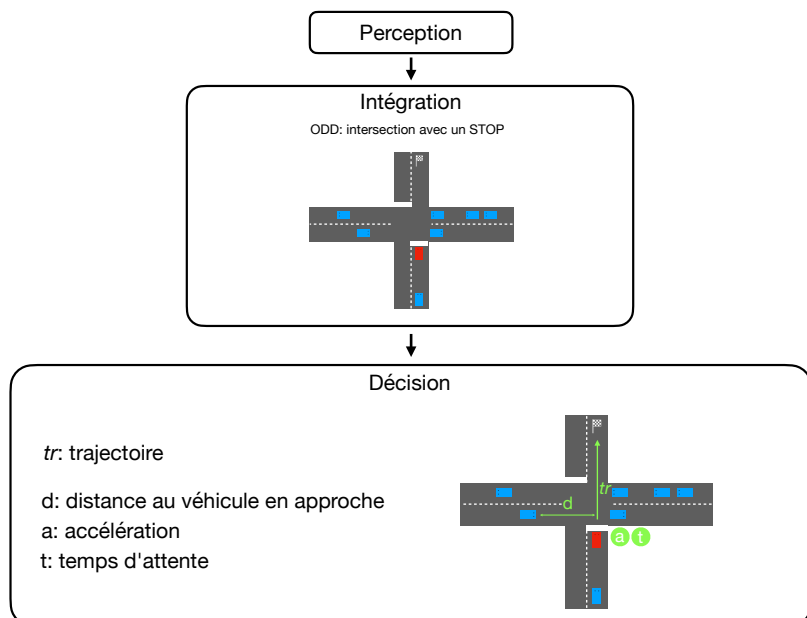


Figure II.91 – Paramètres impliqués dans la stratégie, déterminés dans la prise de décision.

Situation	Paramètres contrôlables	Paramètres non contrôlables	Apports sur la stratégie
Situation	Paramètres contrôlables	Paramètres non contrôlables	Apports sur la stratégie
Dépassement d'un cycliste	Temps d'attente derrière et à côté du cycliste, temps avant collision	Visibilité, vitesse du véhicule arrivant en sens inverse	Messages rassurant les passagers améliorent la perception de sécurité.
Intersection avec feux de circulation	Temps d'attente avant de forcer le passage	Densité du trafic	Forcer l'insertion après un temps d'attente acceptable réduit la frustration.
Intersection avec STOP/Cédez-le-passage	Temps d'attente avant de prendre la priorité	Flux de circulation	Acceptabilité améliorée en forçant la priorité après un certain temps.
Rond-point	Temps d'attente avant d'entrer	Volume de trafic	Forcer l'insertion après un temps d'attente réduit les retards.
Intersection avec priorité à droite	Temps d'attente avant de forcer la priorité	Véhicules venant de la droite	Acceptabilité augmentée en contournant les règles de priorité lorsque nécessaire.
Route restreinte	Céder le passage malgré la priorité	Taille du véhicule arrivant, zones de travaux	Céder le passage évite les blocages.
Traversée de piétons	Temps d'attente, communication via HMIs	Comportement des piétons	Sécurité et confort améliorés pour les piétons grâce aux messages.
Passage de véhicules prioritaires	Manœuvrer pour dégager le passage	État du feu, position du véhicule d'urgence	Ajustements clairs des règles de priorité augmentent la sécurité.

Tableau II.42 – Résumé des situations conflictuelles utilisées en interne par Stellantis, paramètres et apports en termes d'acceptabilité.

Ces expérimentations ont été menées en intégrant certains paramètres d'acceptabilité présentés dans le manuscrit au sein d'une plateforme de simulation réaliste utilisant des outils industriels tels que SCANeR et MATLAB/SIMULINK. Cela montre que ces paramètres peuvent être intégrés dans des algorithmes de conduite autonome développés pour des véhicules industriels.

3.2.3.2 Intégration dans une architecture

Une fois que l'on dispose d'un modèle de l'acceptabilité *in situ* en fonction de paramètres du comportement d'un véhicule autonome se pose la question de l'intégration de ce modèle dans l'architecture des véhicules autonomes. La figure II.92 présente l'architecture utilisée couramment dans les véhicules autonomes. Pour plus de détails, voir le chapitre 1.

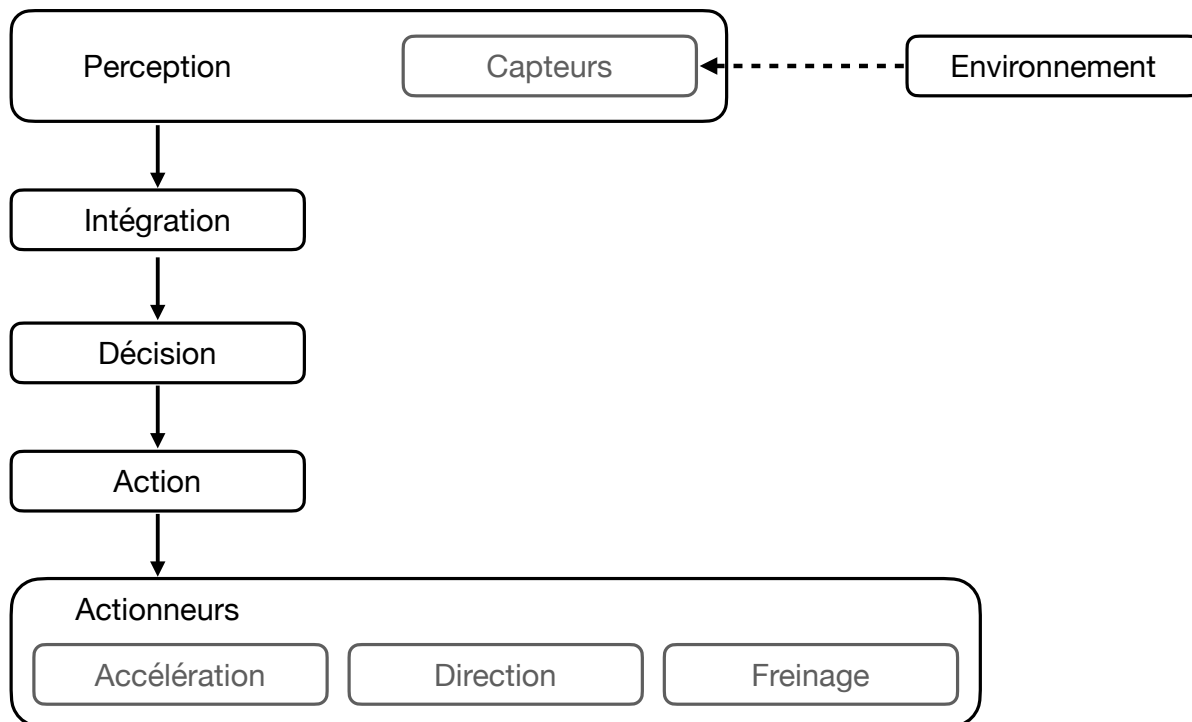


Figure II.92 – Architecture dite “en couche” utilisée dans le développement des véhicules autonomes.

Un module d'optimisation

Les modèles présentés dans la section précédente peuvent être intégrés au sein d'un module d'acceptabilité. Il s'agirait d'un module dont le rôle serait de renvoyer les valeurs qui maximisent l'acceptabilité en fonction de la situation et des paramètres disponibles (voir figure II.93).

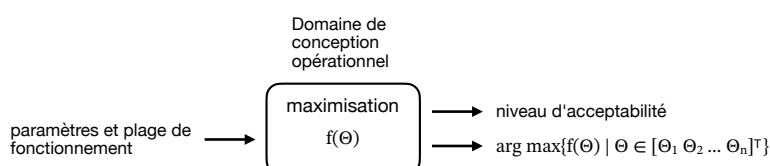


Figure II.93 – Schématisation du module d'acceptabilité qui reçoit les paramètres à optimiser, le domaine de conception opérationnel (ODD) et renvoie la valeur des paramètres qui maximisent l'acceptabilité et le niveau d'acceptabilité associé.

Si on continue à dérouler l'exemple de l'intersection avec un STOP, les paramètres impliqués sont le temps d'attente, la distance au véhicule approchant et l'accélération. Le module reçoit alors une plage de valeurs pour chaque paramètre, par exemple, le temps d'attente possible techniquement dans cette situation est compris entre 2 secondes et 50 secondes (ces valeurs sont arbitraires pour l'exemple). À partir de ces paramètres et du contexte (ODD), le module renvoie les valeurs pour lesquelles l'acceptabilité est maximale et le niveau d'acceptabilité associé (voir figure II.94). Ici, dans les plages de valeurs initiales, le modèle obtient un niveau d'acceptabilité moyen

pour un temps d'attente de 21 secondes, une distance au véhicule de 4,50 mètres et une accélération de 3 m/s.

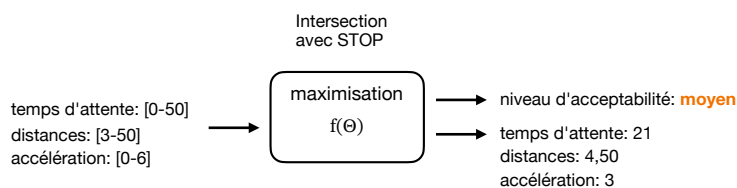


Figure II.94 – Schématisation du module d'acceptabilité qui reçoit les paramètres à optimiser, le domaine de conception opérationnel (ODD), ici une intersection avec un STOP, et renvoie la valeur des paramètres qui maximisent l'acceptabilité et le niveau associé.

Intégration dans l'architecture

Ce module pourrait s'intégrer au sein de l'architecture de véhicule autonome. Ainsi, si on reprend les étapes :

- La couche de **perception** reçoit des données brutes issues des différents capteurs du véhicule. Il s'agit de nuage de points, de système de détection des obstacles, etc.
- La couche d'**intégration** analyse les données reçues et peut déterminer un domaine de conception opérationnel (ODD). À ce niveau, on sait dans quelle situation on se trouve, la position des autres usagers, etc.
- La couche de **prise de décision** prend la décision adéquate en fonction du domaine de conception opérationnel, il planifie les trajectoires possibles.
- La couche d'**action** convertit la décision en paramètres opérationnels pour transmettre aux actionneurs une consigne.

L'acceptabilité pourrait s'intégrer dans le module de prise de décision. Une fois le domaine de conception opérationnel déterminé, la décision consisterait en :

- une sélection du module de décision adapté à la situation ;
- une planification des trajectoires possibles ;
- la **détermination des paramètres impliqués et des marges de manœuvre disponibles**. Par exemple, avant d'arriver au STOP, le véhicule doit ralentir, il a une marge de manœuvre sur la distance de freinage (une distance de freinage proche du STOP implique un freinage plus puissant qu'une distance de freinage plus éloignée). Il est possible d'estimer la faisabilité technique du freinage et produire une plage de valeur dans laquelle le freinage est possible.
- l'**optimisation des paramètres à l'aide du module d'acceptabilité**. L'étape précédente a produit une liste de paramètres et des plages de valeurs. Le module d'acceptabilité reçoit ces paramètres et par un processus d'optimisation produit la valeur de chaque paramètre qui maximise l'acceptabilité.

- la transmission des valeurs à la couche d'action.

Dans cette proposition, l'acceptabilité est intégrée de manière à aider la décision lorsque plusieurs choix sont possibles. Il pourrait exister des cas dans lesquels, les marges de manœuvre sont faibles et ne permettent pas d'obtenir un niveau d'acceptabilité satisfaisant (e.g. le véhicule passe un feu de signalisation rouge pour laisser passer un camion de pompier). Le module d'acceptabilité retourne le niveau d'acceptabilité estimé dans la situation, ainsi, il serait possible d'utiliser cette composante afin de proposer des interfaces adaptées pour limiter la perte d'acceptabilité. Au regard des résultats obtenus dans le chapitre 3.1, une explication permet d'améliorer l'acceptabilité du comportement. Ainsi, on peut imaginer une interface qui expliquerait la situation au passager lorsque le niveau d'acceptabilité estimé passerait sous un certain seuil.

La figure II.95 récapitule la proposition d'intégration présentée.

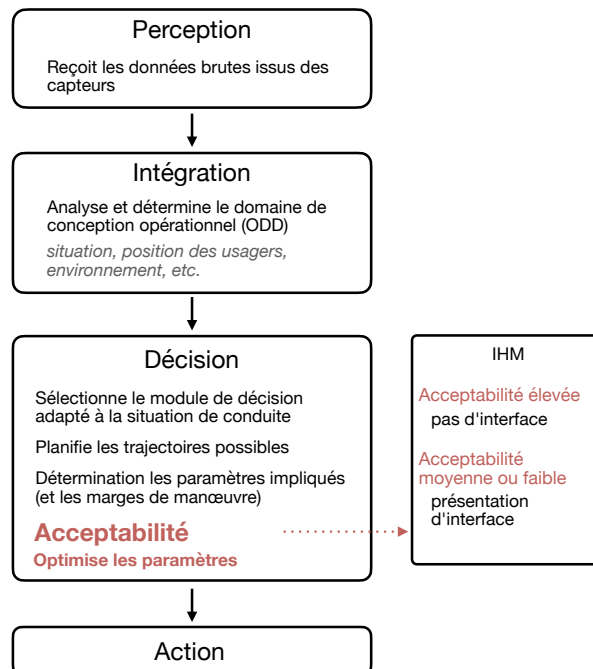


Figure II.95 – Schématisation de l'intégration d'un module d'acceptabilité dans l'architecture de véhicule autonome.

3.2.4 Conclusion

Nous avons exploré l'intégration de l'acceptabilité des comportements des véhicules autonomes dans des situations urbaines potentiellement conflictuelles. En combinant des modèles mathématiques rigoureux et des simulations, nous avons développé deux approches principales pour modéliser cette acceptabilité : une approche déterministe, plus simple et directe, et une approche probabiliste, capable de capturer la variabilité des perceptions humaines. Ces modèles permettent d'adapter les algorithmes de conduite des véhicules autonomes afin de maximiser l'acceptabilité perçue par les passagers et les autres usagers de la route.

Le travail s'est ensuite orienté vers le transfert technologique de ces modèles dans des systèmes industriels à travers la recherche des stratégies de décision et la proposition d'un module d'acceptabilité permettant l'optimisation flexible des paramètres de conduite, et une intégration directe dans les algorithmes de prise de décision. Ces propositions ont été testées en simulation, notamment en collaboration avec Stellantis, pour démontrer leur faisabilité et leur applicabilité industrielle.

Toutefois, le chemin vers une adoption à grande échelle nécessite encore des validations en conditions réelles, ainsi qu'une normalisation des critères d'acceptabilité pour garantir des comportements cohérents et sécurisés dans divers contextes de conduite. Ces avancées sont essentielles pour permettre aux véhicules autonomes d'être perçus comme fiables et sûrs par les utilisateurs et d'atteindre une maturité technologique complète.

À ce jour, les jalons de maturité proposés n'ont pas été validés au niveau industriel. Mais en théorie, une intégration d'un modèle simplifié avec un nombre de paramètres limités à quelques situations identifiées est techniquement réalisable en simulateur. On pourrait donc atteindre le niveau de TRL 3 (Stellantis, [2021](#))

Cependant, plusieurs défis restent à surmonter pour permettre une adoption à grande échelle dans des environnements réels. La prochaine étape consistera à tester et affiner ces algorithmes dans des situations de conduite en conditions réelles, en tenant compte de la complexité et de la variabilité des interactions humaines. Cela exigera une étroite collaboration entre chercheurs, industriels, et régulateurs pour s'assurer que les critères d'acceptabilité soient normalisés et universellement adoptés, garantissant une cohérence dans l'expérience des usagers à travers différentes régions du monde.

Enfin, le succès de l'intégration de ces algorithmes dans des véhicules commerciaux dépendra non seulement de leur performance technique, mais aussi de leur capacité à rassurer les usagers en termes de sécurité et de confort. La création d'interfaces intuitives et transparentes jouera un rôle clé dans cette acceptation. Ainsi, les travaux présentés ici constituent un premier pas vers un transfert industriel complet de données expérimentales en laboratoire.

Troisième partie

Discussion générale

Synthèse du travail réalisé

1.1 Rappel des objectifs et du contexte de recherche

Nous avons présenté un travail exploratoire, visant à étudier l'acceptabilité du comportement d'un véhicule autonome, en situation potentiellement conflictuelle, en milieu urbain. Nous avons étudié le comportement des véhicules autonomes de niveau 5. Les fonctionnalités d'autonomie de niveau 5 permettent à un véhicule de se déplacer sans aucune intervention humaine et sans limitation de domaine de conception opérationnelle (SAE International, 2021). A ce jour, on trouve sur nos routes des véhicules disposant de fonctionnalités d'assistance à la conduite comme le régulateur de vitesse ou le maintien entre les lignes sur autoroute (niveau 1 à 2) et de fonctionnalités d'autonomie niveau 3, permettant à un véhicule de se garer seul sous la surveillance du conducteur. Le niveau 4 peut être considéré comme atteint pour de rares essais dans quelques villes américaines et chinoises (Waymo, 2024). Ces voitures sont capables de récupérer des passagers et de les conduire à destination dans un environnement défini. L'acceptabilité des technologies est un *continuum*, avant la confrontation à la technologie, on étudie l'acceptabilité *a priori*, les aspects sociaux et psychologiques sont mis en lumière, notamment à travers des modèles comme UTAUT 2 (Venkatesh et al., 2012) qui offre un cadre théorique intéressant dans le cadre de l'intégration sociale d'une technologie pour des consommateurs. La littérature présente déjà des éléments de réponse au regard de l'acceptabilité *a priori* des véhicules autonomes, mais surtout pour les niveaux de 0 à 3. Dans le *continuum* de l'acceptabilité, les premières confrontations à la technologie sont étudiées à travers l'acceptabilité *in situ* que l'on peut étudier à la fois à travers les attitudes (composantes psychologiques), mais également à travers le comportement durant l'usage (Bauchet et al., 2020).

Dans le contexte de la conduite autonome de niveau 5, le véhicule devra être capable de gérer les situations qui lui sont présentées de manière autonome sans intervention de l'humain. Au-delà du strict respect des réglementations en vigueur et du maintien de la sécurité, à l'instar de l'humain, le véhicule disposera d'une certaine marge de

manœuvre quant à son comportement. La définition de ce comportement est un enjeu majeur pour qu'il soit rendu acceptable. Peu d'études se sont intéressées aux éléments algorithmiques impliqués dans le comportement et à leurs effets sur l'acceptabilité du point de vue des passagers.

Notre objet d'étude peut être considéré comme un ensemble d'éléments à plusieurs niveaux interagissant les uns avec les autres (voir figure III.96). Nous considérons l'Humain, avec ses caractéristiques personnelles (genre, âge, etc.) et dont l'expérience influe sur son acceptabilité *a priori* d'une technologie (Venkatesh & Bala, 2008). Le véhicule présente, quant à lui, des caractéristiques algorithmiques. Avec l'Humain, ils forment un système au sein duquel la communication est rendue possible par les interfaces du véhicule. Ce système est intégré dans un environnement en interaction à la fois avec le véhicule (adaptation du comportement contextuelle), mais également avec l'Humain dont le ressenti peut être modifié par les conditions environnementales (travaux, météo, etc.) ou le comportement des autres usagers de la route. Enfin, tous ces éléments prennent place dans une dimension sociale. Le Code de la route offre un cadre légal au système qui adapte son comportement en fonction. La norme sociale, quant à elle, s'impose au passager. Par exemple, la règle tacite du "un sur deux" veut que lorsque le trafic est très dense, les conducteurs d'une voie prioritaire cèdent leur priorité aux conducteurs venant de voies non prioritaires. Cette règle n'est inscrite nulle part, mais semble être intégrée par un bon nombre de conducteurs.

Nous nous intéressons donc au comportement d'un véhicule autonome de niveau 5 et à la façon dont un passager perçoit ce comportement dans des situations potentiellement conflictuelles. C'est-à-dire des situations dans lesquelles plusieurs usagers pourraient entrer en rivalité dans une trajectoire commune.

Ce cadre d'étude nous a conduits à poser les problématiques suivantes :

- Dans le cadre d'un véhicule autonome de niveau 5, quel lien y a-t-il entre l'acceptabilité évaluée en simulation (*in situ*), et l'acceptabilité évaluée avant la confrontation (*a priori*) ?
- Quels sont les paramètres qui influencent l'acceptabilité *in situ* du comportement du véhicule autonome du point de vue du passager et du véhicule ?
 - Quels sont les leviers permettant d'influer sur l'acceptabilité *in situ* du comportement du véhicule autonome ?
 - Quels sont les freins à l'amélioration de l'acceptabilité *in situ* du comportement du véhicule autonome ?
- Comment les constructeurs de véhicules autonomes peuvent-ils améliorer ou maintenir l'acceptabilité *in situ* de leurs véhicules à travers des ajustements d'algorithmes et/ou d'interfaces utilisateurs ?

Nous allons discuter nos résultats au regard de chacune de ces problématiques.

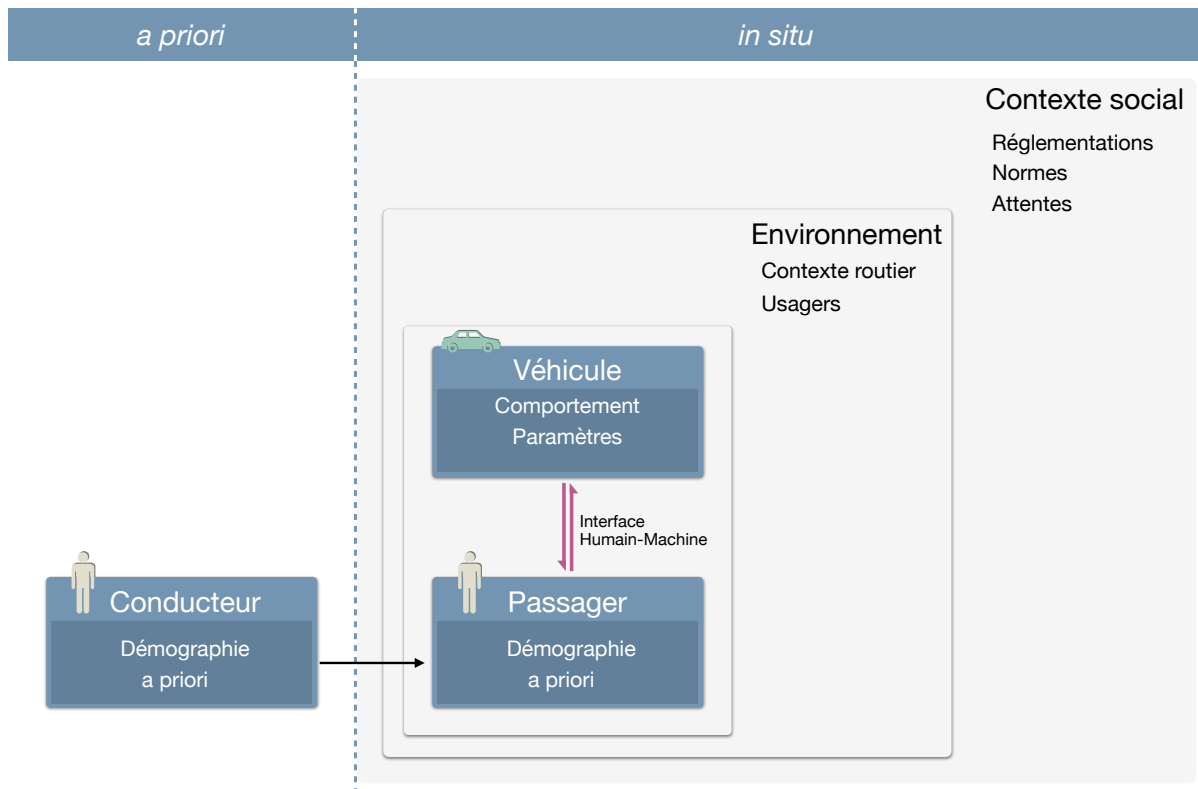


Figure III.96 – Cadre d'étude de l'acceptabilité du comportement d'un véhicule autonome.

1.2 Dans le contexte de la conduite autonome, quel lien y a-t-il entre acceptabilité *in situ* et acceptabilité *a priori* ?

Pour répondre à cette question, nous avons étudié expérimentalement l'acceptabilité et nous avons questionné l'acceptabilité *a priori* des participants, avant leur confrontation à un véhicule autonome simulé afin de mesurer l'acceptabilité *in situ*. Dans un premier temps, les participants ont été immergés dans une simulation en réalité virtuelle (voir chapitre 2.2). Le véhicule, en conduite automatisée de niveau 5, parcourait un trajet comportant des intersections avec un trafic plus ou moins dense et des variations du temps avant que le véhicule ne prenne la décision de s'engager. Au cours de cette expérience, nous avons observé des différences significatives entre participants en fonction de leur acceptabilité *a priori*. Le niveau d'acceptabilité *a priori* a été mesuré à l'aide du questionnaire UTAUT.

- Les participants avec une acceptabilité *a priori* élevée présentaient une acceptabilité *in situ* intermédiaire plus élevée que les autres participants.
- Les participants avec une acceptabilité *a priori* moyenne présentaient une acceptabilité *in situ* intermédiaire.
- Les participants avec une acceptabilité *a priori* faible présentaient une acceptabilité *in situ* nettement plus faible que les autres participants.

Dans un second temps, la mesure a été faite sur des participants dans le cadre d'une simulation affichée sur des écrans dans laquelle, on a présenté aux participants plusieurs situations dans lesquelles on a fait varier le niveau d'explicabilité de la situation par le véhicule (voir section 3.1.2). Au cours de cette expérience, nous avons constaté des différences significatives dans les niveaux d'acceptabilité *in situ* selon l'acceptabilité *a priori* des participants. Ceux ayant une acceptabilité *a priori* élevée présentaient une acceptabilité *in situ* supérieure à celle des participants avec une acceptabilité *a priori* moyenne. Il est à noter qu'aucun participant n'avait une acceptabilité *a priori* faible dans cette expérimentation.

Ces résultats montrent une correspondance claire entre l'acceptabilité *a priori* et celle observée *in situ*. Cependant, cette observation mérite d'être nuancée à la lumière des résultats de la dernière expérimentation, dans laquelle une simulation sur écran a présenté aux participants différentes situations avec des niveaux variables de transparence des informations fournies par le véhicule (voir section 3.1.3). Au cours de cette expérience, aucune différence significative de l'acceptabilité *in situ* entre les trois groupes n'a pu être mise en évidence. Toutefois, les participants du groupe avec une acceptabilité *a priori* faible avaient une médiane sous le seuil d'acceptabilité *in situ* faible, tandis que ceux des autres groupes affichaient des niveaux intermédiaires.

Cette différence de résultats peut, selon nous, s'expliquer de deux manières. Tout d'abord, les expérimentations en réalité virtuelle et la première simulation affichée sur écran mettaient en scène des situations de conduite dans un trafic exclusivement composé de voitures, tandis que la dernière expérimentation introduisait des interactions avec des vélos et des motos. Cette complexification du contexte pourrait avoir influencé les perceptions des participants. De plus, le faible nombre de participants dans le groupe ayant une acceptabilité *a priori* faible dans la dernière expérimentation constitue une autre explication. Un plus grand nombre de participants aurait probablement permis de confirmer la différence, avec une médiane plus basse, sous le seuil d'acceptabilité *in situ* faible.

Les résultats de ces expérimentations soulignent que l'acceptabilité *a priori* est influencée par d'autres facteurs *in situ*. En particulier, le contexte routier met en évidence la nature dynamique de l'acceptabilité, qui évolue dans son *continuum*.

Par ailleurs, les divergences de résultats observées entre les expérimentations en réalité virtuelle et celles où les situations étaient uniquement affichées sur un écran posent des questions quant à la manière de confronter les utilisateurs à des environnements immersifs. Ces différences pourraient s'expliquer par le degré d'immersion offert par la réalité virtuelle, qui permettrait une meilleure représentation du contexte routier (Rhiu et al., 2020 ; Slater, 2009 ; Witmer & Singer, 1998)

L'acceptabilité d'une technologie s'inscrit dans un continuum (Barcenilla & Bastien, 2010 ; Bel et al., 2019 ; Bobillier-Chaumon & Dubois, 2010). Selon le modèle UTAUT-2, l'intention d'utiliser une technologie est influencée par les *a priori* de l'individu, tels que les performances attendues, les efforts perçus, et les habitudes (Venkatesh et al.,

2012). Ces résultats vont dans le sens d'études déjà réalisées sur des niveaux d'autonomie inférieurs, notamment dans le niveau 3, dans lequel il a été démontré l'effet positif des *a priori* (Lee et al., 2023 ; Tomasevic et al., 2022) sur l'intention d'usage. Nos résultats semblent corroborer ce continuum en confirmant le lien entre l'acceptabilité *a priori* et l'acceptabilité *in situ*, dans un contexte simulé de conduite autonome de niveau 5.

1.2.1 Modifier l'*a priori*

Dans les expérimentations réalisées, nous avons séparé nos participants en deux groupes :

- un groupe "sécurité" qui recevait, avant la confrontation à la simulation, une consigne modifiée (amorçage), mettant l'accent sur la sécurité du comportement du véhicule autonome ;
- un groupe "naïf" (contrôle) qui passait l'expérimentation sans cette modification d'instruction.

Lors des expérimentations en réalité virtuelle, une différence significative d'acceptabilité *in situ* a été observée, en fonction de si le groupe a reçu l'amorçage ou non. Les participants ayant reçu les consignes axées sur la sécurité ont manifesté un niveau d'acceptabilité *in situ* supérieur à ceux du groupe contrôle. Ces résultats corroborent les conclusions d'études antérieures, notamment celles portant sur des niveaux d'autonomie plus faibles. Ces recherches soulignent l'importance d'une information préalable sur les capacités de la technologie pour augmenter l'intention d'usage ainsi que l'usage effectif (Feinauer et al., 2024 ; Tomasevic et al., 2022). La figure III.97 illustre le rôle de l'amorçage dans le continuum de l'acceptabilité.

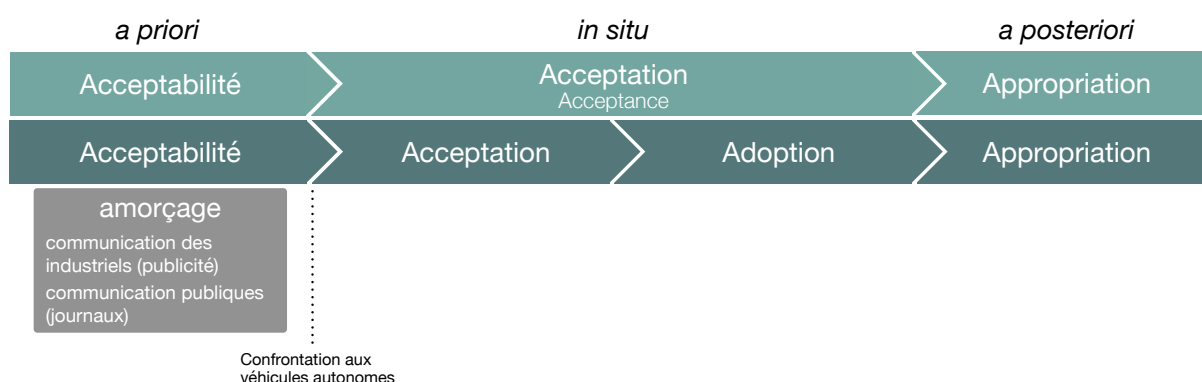


Figure III.97 – Place de l'amorçage dans le continuum de l'acceptabilité

Dans ce cadre, l'acceptation *in situ* dépend de l'acceptabilité *a priori*, soulignant ainsi l'importance des perceptions initiales. Nos expérimentations sur l'amorçage ont démontré qu'il est possible d'influencer ces *a priori*, offrant ainsi des perspectives intéressantes pour les industriels. En communiquant en amont sur leurs véhicules, ils pourraient potentiellement améliorer leur acceptabilité. Du point de vue social, la

manière dont l'information sera relayée dans les médias, notamment à travers les actualités, jouera un rôle crucial dans l'acceptabilité globale.

1.2.2 Limites

Les expérimentations en réalité virtuelle fournissent de premiers résultats intéressants et permettent d'évaluer un large éventail de situations en laboratoire. Toutefois, pour approfondir l'étude du continuum de l'acceptabilité, il sera essentiel d'analyser le comportement du véhicule autonome dans des conditions écologiques réelles. De premiers essais en conditions réelles sur des navettes autonomes ont pu montrer qu'une première expérience positive permettait de diminuer les inquiétudes des passagers (Feys et al., 2020).

Il semble essentiel de s'intéresser aux individus ayant une acceptabilité *a priori* faible. Dans nos expérimentations, leur nombre était limité, ce qui reflète la difficulté à recruter des participants ayant une perception négative de la technologie à étudier. Pourtant, ces personnes représentent un enjeu majeur pour l'adoption de la technologie au sein de la société. Ce sont précisément elles qu'il sera nécessaire de convaincre pour faciliter l'intégration de cette innovation. Un rapport de la Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (Chakir et al., 2021) indique que les consommateurs potentiels ne sont, pour l'heure, pas convaincus par l'intérêt de l'autonomie totale, et qu'ils accordent peu de confiance aux grands constructeurs automobiles. Le rapport présente une étude menée au Canada qui révèle que 36% des personnes interrogées expriment des inquiétudes à l'idée de monter dans un véhicule autonome. Dans une seconde étude aux États-Unis, il est révélé que plus de 50 % des répondants ont des réticences concernant la sécurité, et bien que ce chiffre ait triplé en 4 ans, seulement 34 % envisagent de posséder un véhicule autonome dans les 10 prochaines années.

Ces résultats mettent en lumière l'importance cruciale de la communication *a priori* autour de ces technologies.

1.3 Quels sont les paramètres qui influencent l'acceptabilité *in situ* du comportement du véhicule autonome du point de vue du passager et du véhicule ?

Pour répondre à cette question, nous avons adopté une démarche en deux temps :

1. évaluer si des variations dans le comportement du véhicule autonome entraînent des différences d'acceptabilité *in situ* ;
2. déterminer les freins, liés au contexte, et les leviers, liés aux comportements, qui influent sur l'acceptabilité *in situ*.

1.3.1 Influence du comportement du véhicule sur l'acceptabilité *in situ*

Nous avons mis en place un protocole expérimental avec un simulateur statique (voir chapitre 2.1), où différents comportements du véhicule autonome ont été présentés aux passagers. Les participants ont été confrontés à trois types de comportement dans des situations routières potentiellement conflictuelles, chacun caractérisé par son respect du Code de la route :

- Un comportement défensif, très respectueux des réglementations qui anticipent les situations, en ralentissant avant d'arriver une intersection par exemple.
- Un comportement agressif, qui, à l'instar de certains conducteurs humains, a tendance à s'affranchir de certaines réglementations comme l'arrêt au feu orange.
- Un comportement transgressif qui ne respecte pas les réglementations pour atteindre plus rapidement son objectif.

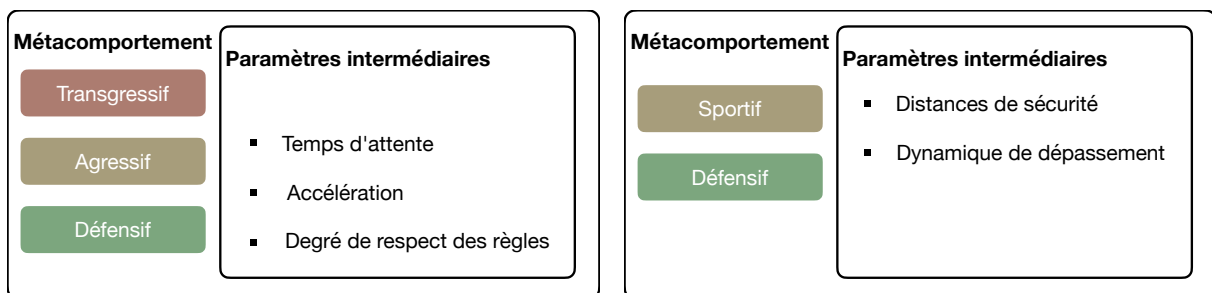
Ces comportements ont été présentés dans différentes intersections (carrefour à sens giratoire, feu de signalisation, cédez-le-passage et passage piéton), des situations potentiellement conflictuelles, car elles constituent des zones de rencontre, et donc de possible rivalité de trajectoires. Les résultats ont montré que le comportement du véhicule a une influence sur l'acceptabilité *in situ*. En effet, un comportement défensif est mieux accepté qu'un comportement agressif, lui-même mieux accepté qu'un comportement transgressif. Cette différence est observée, quel que soit le contexte routier.

Nous avons pu mettre en évidence deux aspects importants de l'acceptabilité *in situ* dans cette expérimentation :

- La composante émotionnelle est un aspect important dans l'analyse de l'acceptabilité *in situ*. Les émotions à valence négatives sont liées à une acceptabilité *in situ* faible. En effet, lorsqu'on s'est intéressé aux émotions qu'auraient ressenties les participants dans les situations présentées. Nous avons pu observer une plus forte proportion des émotions à valence négative dans les situations à comportement transgressif, celles dont l'acceptabilité *in situ* mesurée était la plus faible. À l'inverse, dans les situations à comportement défensif, nous avons observé une plus forte proportion d'émotions à valence positive.
- L'analyse des verbatims de cette expérimentation a révélé qu'en situation de comportements transgressifs et agressifs, les participants adoptaient un discours principalement négatif, centré autour du champ lexical de la régulation et de la sécurité. Ces observations mettent en évidence le lien entre l'acceptabilité sociale et la nécessité de ressentir un sentiment de sécurité, tout en soulignant une attente de performance associée au respect de la réglementation.

Ainsi, les modifications du comportement du véhicule autonome influencent son acceptabilité *in situ*. Cela nous a conduits à nous interroger sur les éléments qui génèrent ces comportements.

Dans une étude sur les comportements de conduite, Mühl et al. (2020) décrivent un comportement défensif caractérisé par des distances de sécurité importantes, ainsi qu'un comportement sportif impliquant des distances plus courtes. Cela met en évidence que le comportement du véhicule peut être orienté vers différents objectifs, tels que la sécurité ou la dynamique de conduite. Dans notre étude, nous nous sommes concentrés principalement sur le respect des règles de la route (voir figure III.98a), tandis que l'étude de Mühl et al. (2020) se focalise davantage sur la dynamique de conduite et son effet sur la perception des passagers (voir figure III.98b). Ces distinctions montrent que l'acceptabilité du véhicule peut être influencée par des priorités différentes, telles que la conformité aux règles ou le confort perçu lié à la fluidité du trajet.



(a) Exemples de métacomportements liés à la réglementation.

(b) Exemples de métacomportements liés à la dynamique de conduite.

Figure III.98 – Exemples de métacomportements.

1.3.2 Les freins et les leviers de l'acceptabilité *in situ*

Toutes les actions d'un véhicule sont gérées à l'aide de trois composantes fonctionnelles :

- l'accélération :
- le freinage ;
- la direction.

Seules, ces trois composantes ne suffisent pas à caractériser un comportement. En effet, on peut obtenir un comportement transgressif avec une accélération de $2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, un freinage de $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ et une direction de 12° . L'aspect transgressif est alors indiqué par l'environnement : si le véhicule se trouve dans une intersection avec un STOP, le fait de ne pas freiner entraîne une transgression du Code de la route et donc un comportement transgressif. Les mêmes paramètres dans un carrefour à sens giratoire sans trafic peuvent entraîner un comportement défensif. Le comportement peut donc être défini par la caractérisation fonctionnelle du déplacement d'un véhicule au regard de son environnement.

Le comportement d'un véhicule peut être défini à l'aide de paramètres de haut niveau qui intègrent l'environnement, comme le temps d'attente avant l'insertion dans la circulation. Ce temps d'attente est le résultat d'une combinaison de facteurs tels que le freinage, l'accélération et le contexte (par exemple, l'attente avant de s'insérer dans un rond-point ou de dépasser un cycliste). Afin de mieux caractériser les variations d'acceptabilité *in situ* en fonction du comportement du véhicule, nous avons mené une étude exploratoire autour de ce paramètre (voir chapitre 2.2). Durant cette expérimentation, réalisée en réalité virtuelle, les participants ont été confrontés à plusieurs situations (intersections) dans lesquelles la densité de trafic variait, et où le comportement du véhicule était modifié par le temps d'attente.

Les résultats ont montré que l'acceptabilité *in situ* était significativement influencée par le temps d'attente, mais que cette influence variait selon les paramètres environnementaux, tels que la densité de trafic et le type d'intersection. Dans nos expérimentations :

- Dans les intersections avec STOP et un trafic dense, la tendance montrait que le temps d'attente le mieux accepté avant de s'insérer dans l'intersection était de 10 secondes, mais nous n'avons pas mis en évidence de différence significative.
- Dans les carrefours à sens giratoire avec un trafic dense, le temps d'attente le mieux accepté avant de s'insérer dans le trafic était de 20 secondes (soit le temps d'attente testé le plus long).
- Dans les carrefours à sens giratoire avec un trafic plus fluide, le temps d'attente le mieux accepté avant de s'insérer dans le trafic était de 0 seconde (soit le temps d'attente testé le plus court).

Cette étude a mis en évidence deux types de paramètres influençant l'acceptabilité *in situ* :

- Freins : paramètres environnementaux sur lesquels nous n'avons pas de contrôle, tels que la densité du trafic ou le contexte routier ;
- Leviers : paramètres fonctionnels du comportement du véhicule autonome, sur lesquels il est possible d'agir, comme le temps d'attente.

Ces paramètres sont intrinsèquement liés, et les dynamiques de l'acceptabilité *in situ* en réponse à une variation des caractéristiques fonctionnelles dépendent du contexte environnemental. Par exemple, l'acceptabilité du temps d'attente à une intersection avec un panneau STOP évolue différemment selon la densité du trafic.

Notre démarche en deux temps a permis de démontrer deux points essentiels :

- il est possible d'influencer l'acceptabilité *in situ* en agissant sur les paramètres du comportement du véhicule ;
- l'acceptabilité *in situ* doit être analysée dans le cadre d'une situation spécifique, en tenant compte de l'interaction entre le véhicule, le passager et le contexte routier (ODD).

Quelques études se sont penchées sur des paramètres intermédiaires du comportement de conduite. Mühl et al. (2020) ont étudié les distances de sécurité, calculées à partir des distances d'arrêt, pour définir des comportements : défensif (avec une distance de 150 m) et sportif (avec une distance de 80 m). Ils montrent ainsi qu'un comportement défensif augmente la confiance des passagers.

Siebert et Wallis (2019) ont exploré l'effet de la vitesse du véhicule et des distances inter-véhicules en fonction de la visibilité extérieure. Ils ont constaté que plus la visibilité est faible, plus les passagers préfèrent des distances importantes entre les véhicules. De plus, la vitesse a un impact direct sur le confort perçu par les passagers.

Voß et al. (2018) ont étudié les trajectoires de conduite et ont montré que l'optimisation des trajectoires n'est pas toujours alignée avec les préférences des passagers. En particulier, c'est la distance latérale par rapport aux autres véhicules qui semble exercer la plus grande influence sur ces préférences.

Ces résultats constituent des bases solides pour ajuster les comportements de conduite. Le développement de stratégies adaptées à différentes situations permettra de déterminer de nouveaux paramètres influençant l'acceptabilité des véhicules autonomes et d'approfondir leur étude.

1.3.3 Limites

Nous avons étudié des comportements liés au respect du Code de la route, mais il serait pertinent de prendre en compte d'autres types de comportements, notamment ceux liés aux aspects sociaux de la conduite. Nos études se sont limitées à l'observation du comportement d'un véhicule parmi d'autres véhicules, sans tenir compte des interactions ou des réactions des autres usagers de la route. Il serait intéressant d'explorer les ajustements comportementaux qui surviennent en présence de piétons, de cyclistes ou d'autres usagers vulnérables. Nos expérimentations ont d'ailleurs révélé des différences dans les résultats lorsque des cyclistes ou des motards, considérés comme plus vulnérables que les voitures, étaient intégrés à nos simulations (voir section 3.1.3). Dans ces situations, les résultats obtenus étaient moins prononcés : nous n'avons par exemple pas observé de variation significative de l'acceptabilité *a priori*, ni d'effet d'amorçage de sécurité, contrairement à ce que nous avons constaté dans les précédentes expérimentations. La question des interactions entre les véhicules autonomes de niveau 5 et les usagers vulnérables constitue un enjeu majeur. En effet, des études ont montré que les piétons hésitent davantage à traverser devant un véhicule autonome (Lagström & Lundgren, 2016). Dans ce contexte, il sera nécessaire de développer des substituts à l'interaction directe entre conducteur et piéton (Löcken et al., 2019), et plus largement, entre conducteur et autres usagers de la route. Une réflexion s'impose quant aux types de comportements que les véhicules autonomes devront adopter. À ce jour, les comportements de conduite humains sont étudiés dans le but de réduire les accidents, en les classifiant selon les risques encourus ou leur agressivité envers les autres usagers ou la loi (Hong et al., 2014 ;

Taubman-Ben-Ari et al., 2004). Il existe tout de même des études s'intéressant à d'autres types de comportements. Kaye et al. (2022) ont étudié les comportements altruistes et pro-sociaux sur la route visant à protéger ou à améliorer le bien-être des autres usagers de la route. L'altruisme est défini comme un comportement qui se concentre sur les besoins d'autrui, même au détriment de soi-même. Par exemple, céder une place de stationnement à un autre conducteur, bien que vous en ayez également besoin. Le comportement pro-social, quant à lui, est un acte qui bénéficie à une autre personne, comme ralentir pour permettre à un autre véhicule de s'insérer dans la circulation, améliorant ainsi la sécurité et la fluidité du trafic. Dans le cadre des véhicules autonomes, ces comportements pourraient se traduire par des décisions de conduite qui priorisent la sécurité et le confort des autres usagers, tels que laisser passer un piéton, maintenir une distance sécuritaire ou adapter la vitesse pour réduire les risques de collision. Un véhicule autonome pourrait être programmé pour imiter ces comportements altruistes et pro-sociaux, augmentant ainsi la perception de sécurité et l'acceptabilité du public.

On peut donc se poser une question : les futurs véhicules autonomes devront-ils imiter l'agressivité de certains comportements humains pour s'adapter à la circulation, ou au contraire, opter pour une conduite plus altruiste ?

La réponse se trouve probablement quelque part entre les deux, et le véhicule devra adapter son comportement en fonction des situations qui se présentent à lui. Il devra faire preuve d'adaptation.

Enfin, bien que nous ayons étudié le temps d'attente, il serait intéressant d'examiner d'autres stratégies de conception opérationnelle, ce qui ouvrirait la voie à l'identification de nouveaux paramètres comportementaux à explorer comme par exemple :

- la distance d'arrêt ;
- la distance aux autres véhicules ;
- l'accélération ;
- etc.

1.4 Comment les constructeurs de véhicules autonomes peuvent-ils améliorer ou maintenir l'acceptabilité de leurs véhicules à travers des ajustements d'algorithmes et d'interfaces utilisateurs ?

L'identification de leviers permettant d'influencer l'acceptabilité *in situ* ouvre des perspectives intéressantes pour répondre à cette problématique. Dans ce cadre, nous avons exploré deux approches complémentaires :

- La possibilité de modéliser mathématiquement les variations des paramètres comportementaux influençant l'acceptabilité, observés expérimentalement. L'objectif est de fournir aux développeurs des outils pour concevoir des algorithmes générant un comportement du véhicule perçu comme acceptable.
- L'exploration d'un levier à l'interface entre le véhicule et le passager. Nous nous sommes penchés sur la qualité et la quantité des informations que le véhicule pourrait transmettre en temps réel dans des situations perçues comme inacceptables, afin de réduire le risque de rejet de la technologie par les passagers.

1.4.1 Une méthodologie d'intégration : de l'humain vers la machine

Nous proposons une approche qui accorde une place centrale au facteur humain dans le processus de maturation technologique. En effet, l'objectif est le transfert des résultats des mesures subjectives vers un module algorithmique. Ainsi, nous avons développé une méthodologie s'appuyant sur les niveaux de maturation industrielle (TRL) pour aider les constructeurs automobiles à intégrer les paramètres d'acceptabilité dans le développement de leurs systèmes.

Cette méthodologie s'articule autour de cinq étapes.

Étape 1. Identification des paramètres

Lors de cette première phase, il s'agit d'identifier les domaines de conception opérationnelle (Operational Design Domains, ODD), qui décrivent les conditions spécifiques dans lesquelles un véhicule autonome évolue. Cette analyse permet de développer des stratégies adaptées à ces situations. Une fois ces stratégies définies, les paramètres comportementaux correspondants sont sélectionnés pour une étude approfondie.

Application dans le cadre de la thèse

Dans cette thèse, nous avons exploré les stratégies pour aborder les intersections, telles que les ronds-points et les carrefours avec signalisation de type STOP. Nous avons choisi d'étudier l'effet des variations du temps d'attente avant que le véhicule ne s'engage dans l'intersection sur l'acceptabilité *in situ*.

Étape 2. Analyse empirique

Les paramètres définis à l'étape précédente sont testés dans un environnement contrôlé, en laboratoire, afin d'évaluer leur impact sur l'acceptabilité *in situ* des comportements observés. Cette phase vise à collecter des données quantitatives reflétant les variations des paramètres dans des situations simulées.

Application dans le cadre de la thèse

Dans cette thèse, nous avons testé différentes variations du temps d'attente dans diverses situations et mesuré l'acceptabilité *in situ* auprès de passagers en simulateur. Ces tests nous ont permis de recueillir des données quantitatives sur ce paramètre spécifique.

Étape 3. Création ou adaptation du modèle

Cette étape consiste à développer des modèles décrivant l'influence des variations des paramètres comportementaux sur l'acceptabilité des utilisateurs dans des situations réelles. Ces modèles mathématiques cherchent à capturer la relation entre les ajustements des comportements du véhicule et leur perception par les usagers, dans le but de les intégrer aux algorithmes de contrôle des véhicules autonomes.

Application dans le cadre de la thèse

Nous avons modélisé les variations du temps d'attente à l'aide de deux approches :

- Une approche déterministe : régression polynomiale ;
- Une approche probabiliste : ajustement à une loi bêta.

Étape 4. Intégration du modèle

Les modèles développés sont ensuite intégrés aux algorithmes régissant le comportement des véhicules autonomes, soit via un module spécifique dédié à la gestion de l'acceptabilité, soit en les incorporant directement dans les stratégies globales de contrôle du véhicule. Ce processus permet de proposer des comportements adaptés et acceptables pour les passagers, améliorant ainsi l'expérience utilisateur et facilitant l'adoption des véhicules autonomes.

Application dans le cadre de la thèse

Nous avons proposé une méthode d'intégration des modèles développés dans les architectures des véhicules autonomes. Ces recommandations s'adressent aux développeurs d'algorithmes, et Stellantis les a déjà utilisés dans le cadre de premiers pré-tests sur simulateur industriel (Stellantis, 2024).

Étape 5. Tests du modèle

Pour justifier une montée en maturité des fonctionnalités développées (montée en TRL), il est nécessaire de procéder à des validations selon des processus industriels. Les tests doivent être réalisés en conditions réelles et sur des systèmes opérationnels pour valider leur utilisation sur route.

Application dans le cadre de la thèse

Dans cette thèse, nous n'avons pas encore testé les modèles en conditions réelles. Cela constitue une prochaine étape pour valider pleinement la méthodologie.

Ce travail représente une preuve de concept initiale, testée sur un premier paramètre, mais dont l'application peut être étendue à tout paramètre comportemental étudié. L'approche proposée intègre les besoins et attentes des futurs passagers dans la conception des algorithmes régissant le comportement des véhicules autonomes, assurant ainsi une meilleure acceptabilité des systèmes automatisés.

Limites

Actuellement, la méthodologie proposée atteint un niveau de maturité technologique (TRL) de 3 (Mankins, 1995; Stellantis, 2021), ce qui correspond à une validation expérimentale en environnement contrôlé, mais sans avoir encore été testée et validée dans un contexte industriel. Pour avancer vers des niveaux de maturité plus élevés, il sera crucial de réaliser des tests supplémentaires en laboratoire, puis en conditions réelles, afin de valider la fiabilité et la robustesse des résultats dans des situations plus variées et complexes.

Pour atteindre le niveau 4, des tests fonctionnels en environnement contrôlé seront nécessaires, impliquant des scénarios réalistes et des simulations plus poussées. Passer au niveau 5 nécessitera des essais sur le terrain avec des véhicules autonomes en conditions réelles, en intégrant des interactions avec d'autres usagers de la route (piétons, cyclistes, etc.) et des conditions environnementales variées.

1.4.2 Prise en compte des interfaces entre le véhicule et le passager

On peut envisager qu'un comportement optimal du véhicule ne soit pas perçu comme acceptable dans certaines situations, soit pour des raisons de sécurité (par exemple, un freinage d'urgence), soit en raison d'un manque d'informations disponibles pour le passager (celui-ci n'ayant pas vu un obstacle qui a poussé le véhicule à ne pas s'arrêter à un feu récemment passé au rouge). Dans ces cas, l'algorithme a pris la décision optimale au regard de la situation, mais n'a pas pu rendre ce comportement plus acceptable pour le passager.

Afin d'explorer cette problématique, nous avons mis en place deux protocoles expérimentaux pour étudier la communication entre le véhicule et le passager, et évaluer dans quelle mesure l'acceptabilité *in situ* d'un comportement jugé inacceptable pourrait être améliorée grâce à une interface d'explication.

Dans le premier protocole, les participants ont été soumis à une simulation incluant plusieurs situations conflictuelles. Nous avons fait varier le niveau d'explicabilité du comportement du véhicule, c'est-à-dire la quantité et la clarté des explications fournies aux passagers sur les décisions prises par le véhicule. Les résultats ont montré que :

- l'ajout de plusieurs modalités sensorielles augmente l'explicabilité. Une interface combinant des signaux sonores et visuels rendait les explications plus claires que l'usage de la seule modalité visuelle ;
- le niveau d'explicabilité a un impact direct sur l'acceptabilité *in situ*. Lorsque le véhicule expliquait son comportement, les passagers étaient plus enclins à accepter la situation, et cette acceptabilité augmente à mesure que le niveau d'explicabilité augmente.

Ces résultats sont cohérents avec la littérature sur la multimodalité, qui montre que la combinaison de plusieurs modalités, notamment verbales et visuelles, favorise l'apprentissage (Paivio, 1990), en optimisant les ressources attentionnelles disponibles (Mayer & Moreno, 1998). Cette optimisation des ressources attentionnelles pourrait également améliorer la conscience situationnelle, renforçant ainsi l'idée d'intégrer une dimension de conscience situationnelle dans les modèles psychologiques d'acceptabilité des véhicules autonomes, comme celui proposé par (Stanton & Young, 2000). De plus, ces résultats confirment que l'explication peut influencer l'acceptabilité, de la même manière qu'elle peut renforcer la confiance (Atakishiyev et al., 2023 ; Lee et al., 2015).

Dans le second protocole, les participants ont été confrontés à des situations conflictuelles où le niveau de transparence des informations transmises par le véhicule était modulé (Winfield et al., 2021). Contrairement à la première expérience, aucune différence significative en termes d'acceptabilité n'a été observée en fonction du degré de transparence.

Cela souligne l'importance de la manière dont l'information est présentée. Les premières recherches sur les systèmes autonomes de niveau 3, où le conducteur peut reprendre le contrôle du véhicule, avaient déjà mis en avant la nécessité de fournir des explications dans certaines situations, en particulier lorsque le conducteur cherche activement à comprendre le contexte avant de reprendre la main (Techer et al., 2017). Une interface bien conçue, capable de communiquer clairement les décisions du véhicule, peut améliorer l'acceptabilité *in situ*, notamment dans des situations perçues comme conflictuelles ou inattendues.

Dans le cadre des véhicules entièrement autonomes, des études ont également montré l'importance de la communication entre le véhicule et les passagers. Par exemple, (Wintersberger et al., 2019) ont observé que l'augmentation de la visibilité de l'environnement pour les passagers, ainsi que l'ajout d'informations sur ce que le véhicule perçoit, contribuent à accroître l'acceptabilité.

Limites

La communication étudiée dans ces expériences est unilatérale, allant uniquement du véhicule vers le passager. Il sera intéressant d'étudier une communication bilatérale, dans laquelle le passager interagirait activement avec le véhicule autonome. Ce type d'échange pourrait jouer un rôle crucial dans l'acceptabilité du véhicule autonome. Ainsi, la tâche de conduite serait entièrement automatisée, mais il pourrait exister un mode d'autonomie collaboratif, tel que décrit par Sheridan et al. (1978) et Hoc et al. (2009) dans lequel le passager pour avoir une influence sur le comportement sans toutefois le contrôler ni avoir à en comprendre le fonctionnement.

1.5 Ce qu'il faut retenir

La figure III.99 récapitule les résultats de la thèse au regard des problématiques et objectifs posés.



Figure III.99 – Travaux menés dans le contexte des problématiques posées.

Chapitre 2

Perspectives

Les problématiques abordées dans ce travail nous ont permis de répondre à plusieurs questions, tout en révélant de nouveaux questionnements à explorer. Le développement des véhicules totalement autonomes soulève un grand nombre de perspectives, et de nombreuses interrogations restent en suspens.

2.1 La place de l'humain dans le véhicule autonome

Il y aura un avant et un après l'introduction du véhicule autonome de niveau 5. L'automatisation complète de la tâche de conduite va profondément transformer la place de l'humain au sein du véhicule.

2.1.1 De conducteur à passager

Le conducteur, jusqu'à présent acteur principal dans la tâche de conduite, devient simple passager dans le véhicule autonome. Alors qu'il était utilisateur du véhicule comme d'un outil lui servant à accomplir une tâche de conduite, il devient usager d'un service (voir figure III.100).

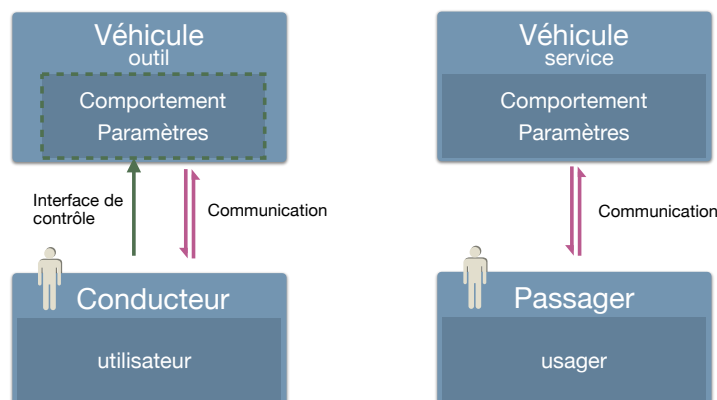


Figure III.100 – L'humain dans un véhicule autonome passe de conducteur à passager.

Auparavant, le conducteur devait comprendre le fonctionnement du véhicule, apprendre les règles du Code de la route et obtenir un permis lui autorisant la conduite

d'un véhicule. Le passager d'un véhicule autonome, à l'instar du passager d'un véhicule "classique", n'a pas besoin de ces compétences. C'est ce qui modifie l'expérience du transport, et transforme l'outil en service.

Cette transition pose une première question, peut-on comparer le passager d'un véhicule autonome au passager d'un véhicule "classique"? À travers le prisme de l'acceptabilité, cette question équivaut à se demander si on accepte de la même façon le comportement d'un conducteur humain et le comportement d'un conducteur machine (ou algorithme).

On peut supposer que la présence d'un conducteur humain offrirait un cadre rassurant. Quand c'est un humain qui me conduit, je suis capable de l'empathie nécessaire pour me mettre à sa place et comprendre ses actes (et ses erreurs potentielles). Face à une machine, cette empathie disparaît, et les utilisateurs peuvent ressentir un manque de contrôle. Les passagers ont plus de difficultés à accepter un comportement imprévisible ou non expliqué d'une machine, même si celle-ci est statistiquement plus fiable qu'un humain (Mindfoundry, 2021). Cependant, des études montrent que l'on aurait tendance à blâmer davantage un conducteur humain qu'un véhicule autonome en cas d'accident (Awad et al., 2019)

2.1.2 De véhicule autonome à véhicule... intelligent

Le domaine de l'intelligence artificielle pourrait répondre à ces enjeux de confiance. On définit souvent l'intelligence artificielle comme la capacité d'une machine à résoudre des problèmes complexes de manière autonome (Russell & Norvig, 2021), et certains la perçoivent comme une tentative de reproduire l'intelligence humaine (Turing, 1950). Si on pouvait véritablement copier l'intelligence humaine, cela pourrait rassurer les usagers en créant des systèmes dont les décisions sont compréhensibles. Toutefois, la question du "dilemme de la boîte noire" persiste : comment anticiper ou comprendre des décisions prises par des algorithmes dont le fonctionnement interne reste opaque même pour leurs créateurs ?

Il est intéressant de noter que, bien que l'industrie parle souvent de "véhicules autonomes", le terme "véhicule intelligent" n'est pas utilisé dans le contexte de l'automatisation de la conduite. Le Cerema (2019) définit le véhicule autonome comme un "véhicule équipé d'un système de pilotage automatique qui lui permet de rouler sans l'intervention d'un être humain". L'accent est mis sur l'automatisation, c'est-à-dire un système prédictible et contrôlable, plutôt que sur une véritable intelligence dotée d'une capacité de décision autonome.

2.1.3 Responsabilité et éthique

La question de la responsabilité est centrale lorsqu'il s'agit d'accidents impliquant des véhicules autonomes. Traditionnellement, un accident est attribué à la faute du

conducteur. Mais dans un véhicule autonome, où la prise de décision est entièrement déléguée à une machine, qui doit assumer la responsabilité en cas de défaillance ?

- Le propriétaire du véhicule ?
- Le constructeur ?
- Le développeur de l'algorithme ?

Ce déplacement de la responsabilité soulève des dilemmes éthiques complexes. Par exemple, dans une situation où un accident est inévitable, l'algorithme doit-il privilégier la survie des occupants du véhicule ou celle des piétons ? Cette question pose un problème de responsabilité morale : est-il éthique de coder une machine pour prendre des décisions qui privilégient certaines vies au détriment d'autres ? Selon des chercheurs de MIT qui ont exploré ce dilemme à travers le projet "Moral Machine" (Awad et al., 2020 ; Bonnefon et al., 2016), les réponses à ces questions varient considérablement selon les cultures et soulignent la difficulté de standardiser des décisions éthiques pour une machine.

Par ailleurs, faut-il autoriser un véhicule autonome à transgresser certaines règles (par exemple, pour éviter un accident) ? Si oui, comment encadrer légalement ce type de décision ? Laisser la possibilité à un algorithme de prendre une décision pouvant "probablement" engendrer un accident. Ce serait contrevenir à la première loi de la robotique : "Un robot ne peut porter atteinte à un être humain ni, restant passif, laisser cet être humain exposé au danger"(Asimov, 1950).

2.2 La place du véhicule dans la société

2.2.1 Véhicule personnel vs. véhicule partagé

L'adoption des véhicules autonomes soulève des questions sur leur mode d'utilisation : possession personnelle ou service partagé (par exemple, robotaxis). Ces deux modèles présentent des défis et des opportunités distincts :

- Véhicule personnel : Permet une plus grande flexibilité et autonomie, mais soulève des questions de responsabilité et de coût.
- Véhicule partagé : Favorise une utilisation optimisée des ressources et une réduction des coûts pour les utilisateurs, mais pose des problèmes d'infrastructure et de gestion des flottes.

2.2.2 Inégalités géographiques et sociales

La transition vers les véhicules autonomes risque d'accentuer certaines inégalités :

- Régionales : Les zones urbaines, dotées d'infrastructures connectées, seront plus à même d'accueillir les premiers véhicules autonomes. À l'inverse, dans les zones

rurales, où l'infrastructure est moins développée, l'autonomie complète des véhicules sera plus difficile à implémenter.

- Sociales : L'accès à cette technologie risque d'être limité aux populations aisées en raison du coût initial élevé, tandis que les populations à revenus plus modestes pourraient être laissées de côté.

2.2.3 Vers des déplacements plus inclusifs

Les véhicules autonomes peuvent offrir une solution aux personnes à mobilité réduite en leur permettant de retrouver une certaine autonomie dans leurs déplacements. Cependant, il est essentiel de garantir l'accessibilité de ces véhicules à tous, tant sur le plan technologique que financier. Les véhicules autonomes disposant de fonctionnalités de niveau 5 présentent des avantages pour les personnes âgées et les personnes en situation de handicap, en éliminant la nécessité de conduire et d'interagir avec les commandes du véhicule. Contrairement aux véhicules de niveau 3, qui nécessitent que le conducteur reprenne le contrôle en cas de situation imprévue, le niveau 5 rend une autonomie totale dans le déplacement. Cela permet aux personnes âgées, qui peuvent avoir des temps de réaction plus longs ou des capacités cognitives réduites, de bénéficier d'une mobilité continue en toute sécurité (Gasne et al., 2022). Pour les personnes en situation de handicap, ces véhicules permettent une plus grande indépendance en évitant les obstacles liés à la conduite, tout en offrant des services personnalisés pour répondre à leurs besoins spécifiques, comme des systèmes d'assistance à bord et des aménagements adaptés (Zare et al., 2022). Les personnes en situation de handicap moteur ont une confiance élevée dans les systèmes de transport autonome, les navettes disposant de fonctionnalité de niveau 5 seraient préférées aux bus traditionnels (Zare et al., 2022). Cependant, malgré ces avantages, certains inconvénients persistent. Les coûts élevés de développement et d'intégration des technologies de niveau 5 peuvent limiter leur accessibilité financière. De plus, bien que la technologie soit prometteuse, la confiance totale dans les véhicules autonomes n'est pas encore acquise pour tous les utilisateurs, en particulier pour ceux qui sont peu familiers avec les nouvelles technologies (Zare et al., 2022).

2.3 Acceptabilité

2.3.1 L'acceptabilité *a priori*

Le modèle UTAUT semble adapté pour comprendre l'acceptabilité *a priori* des véhicules autonomes. Avant l'utilisation concrète de cette technologie, des facteurs tels que l'influence sociale ou la perception de la performance sont déterminants. Toutefois, l'accent mis par les médias sur les accidents impliquant des véhicules autonomes, même s'ils sont statistiquement rares, peut nuire à l'acceptabilité en créant une perception négative et une méfiance sociale.

2.3.2 L'acceptabilité *in situ*

2.3.2.1 Le modèle UX

Au moment de la confrontation à une technologie, l'étude de l'expérience utilisateur offre un point de vue intéressant sur l'acceptabilité *in situ* de celle-ci. Hassenzahl (2005), a proposé un modèle qui étudie les attributs pragmatiques (instrumentaux) et hédoniques de l'expérience d'un utilisateur en interaction avec un produit. Les conséquences en termes de plaisir, de satisfaction et de comportement offrent un bon aperçu de l'acceptation du produit (voir figure III.101).

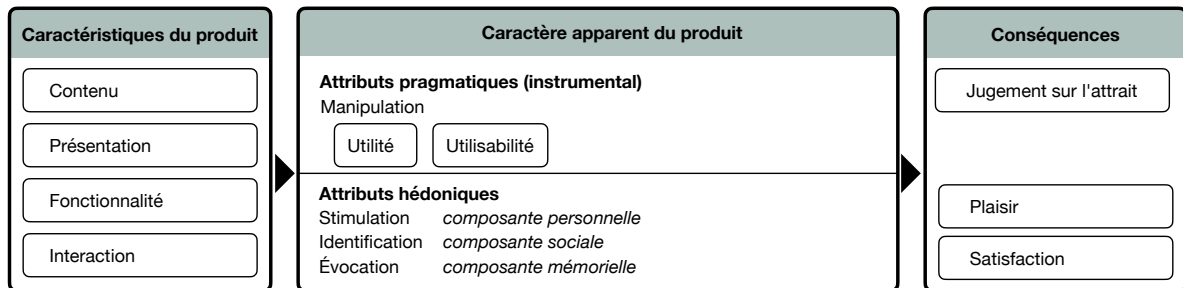


Figure III.101 – Le modèle UX (Hassenzahl, 2005)

Toutefois, dans le contexte de la conduite, le conducteur était en interaction avec le véhicule. Dans les niveaux 2 à 3 d'automatisation de la conduite, on peut même parler de coopération avec le véhicule. Mais dans les niveaux 4 et 5, l'interaction pour la conduite disparaît, la coopération n'existe plus (Navarro, 2008). L'utilisateur, étant devenu usager, on peut se demander si la notion d'expérience utilisateur est similaire à celle d'expérience usager ?

Il peut être intéressant de questionner le modèle UX en ce sens.

Caractéristiques du service

Si l'utilisateur n'a plus à interagir avec le système, quelles dimensions devaient être prises en compte dans l'évaluation de son expérience ?

Caractère apparent du service

Le modèle UX étudie l'utilité et l'utilisabilité d'un produit.

- utilité : Dans le cadre d'un service, il faudra se demander si le service continue à répondre efficacement aux besoins de l'utilisateur. Dans ce contexte, le besoin est d'effectuer un trajet. Il sera donc nécessaire de déterminer les paramètres influençant l'efficacité du trajet.
- Utilisabilité : Dans le cadre d'un service, il faudra se demander si le service reste accessible et compréhensible, même si l'utilisateur n'interagit plus directement avec lui.

Ces éléments soulignent l'importance d'adapter le modèle UX au contexte des véhicules autonomes de niveau 5. Mais également de placer l'acceptabilité pratique pendant les phases de développement (Boutrouille et al., 2024). En effet, bien que l'interaction directe soit limitée, il reste essentiel de concevoir des systèmes intuitifs qui favorisent une expérience usager positive.

Cela suggère également qu'il serait bénéfique d'introduire des moyens d'interaction qui permettent aux usagers de configurer et d'ajuster le véhicule en temps réel selon leurs préférences. Cela pourrait aider à rétablir une forme de collaboration entre l'humain et la machine, favorisant ainsi un sentiment de confiance et de sécurité.

L'automatisation ne doit pas être guidée uniquement par des impératifs technologiques. Au contraire, il est préférable de considérer des modes de coopération entre l'humain et la machine pour orienter les développements technologiques, comme le suggère Navarro et al. (2018).

La redéfinition du modèle UX dans le cadre des véhicules autonomes offre une opportunité d'explorer comment des interactions significatives peuvent être intégrées dans un environnement de conduite de plus en plus automatisé, garantissant ainsi une expérience usager enrichissante et sécurisée.

2.3.2.2 Expérience multi-utilisateurs (usagers)

Par ailleurs, il pourrait être intéressant d'explorer des cadres d'analyse multi-utilisateurs. La présence de plusieurs passagers dans un véhicule autonome pourrait en effet avoir un impact sur l'acceptabilité globale du système. Comment l'acceptabilité d'un individu influence-t-elle celle des autres passagers ? Existe-t-il une acceptabilité collective, et si oui, comment se construit-elle ? Par exemple, un passager particulièrement confiant dans la technologie pourrait influencer positivement les perceptions des autres, ou au contraire, des divergences d'opinions pourraient générer des tensions ou de l'inconfort. L'introduction de véhicules autonomes modifiera également les interactions entre ces véhicules et les autres usagers de la route. Les piétons, cyclistes ou conducteurs de véhicules non autonomes devront eux aussi s'adapter à ces nouveaux acteurs, créant un nouvel écosystème d'interactions routières. Ces changements nécessitent d'examiner comment les comportements et les attentes des usagers externes influencent les interactions avec les véhicules autonomes, ainsi que la manière dont ces interactions impactent à leur tour l'expérience des passagers. Cela ouvre la voie à une réflexion sur l'acceptabilité à la fois interne (passagers) et externe (autres usagers) dans un contexte d'intégration des véhicules autonomes.

Fleury et Chaniaud (2024) proposent une réflexion innovante visant à intégrer l'influence des autres utilisateurs sur les intentions d'usage d'une technologie. À travers leur modèle d'acceptabilité multi-utilisateur (MUX), ils soulèvent des questions essentielles sur la manière de concevoir des technologies en prenant en compte les interactions et les dynamiques entre plusieurs utilisateurs. Ce modèle explore

comment les perceptions, les attentes et les comportements des uns peuvent affecter ceux des autres, posant ainsi les bases d'une approche collaborative de l'acceptabilité technologique.

2.3.3 L'acceptabilité dynamique

L'acceptabilité évolue sur un continuum (Bobillier-Chaumon & Dubois, 2010), un concept qui souligne son caractère dynamique et changeant au fil du temps. Plusieurs auteurs ont mis en évidence les boucles et les interactions entre les différentes phases de l'acceptabilité (Bauchet et al., 2020 ; Boutrouille et al., 2024), montrant ainsi que ce processus n'est pas linéaire, mais repose sur des ajustements constants.

Ce caractère dynamique représente un enjeu majeur pour l'intégration des véhicules totalement autonomes dans la société. En effet, l'acceptabilité évolue en fonction des interactions avec la technologie, des expériences d'usage, et du contexte dans lequel elle est adoptée.

Dans le cadre d'une expérience réelle avec un véhicule autonome, on peut supposer que l'acceptabilité suit une évolution similaire à celle décrite par Unrein (2023) concernant la confiance. Ce modèle propose un cycle dans lequel la confiance fluctue en fonction de la conformité du système aux attentes initiales. Ces variations dépendent notamment du niveau de confiance de départ et de l'inertie liée à cette confiance, ce qui pourrait également s'appliquer à l'acceptabilité : une acceptabilité initialement forte peut résister à certaines déconvenues, tandis qu'une acceptabilité fragile pourrait s'effondrer plus rapidement en cas de non-conformité. Ce modèle éclaire les mécanismes subtils par lesquels l'acceptabilité d'une technologie telle qu'un véhicule autonome se construit, évolue, et parfois se fragilise (voir figure III.102).

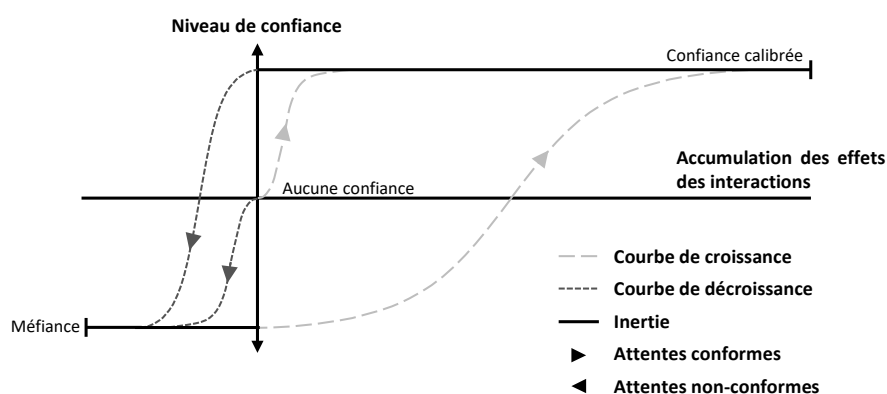


Figure III.102 – Modélisation de la confiance proposée par Unrein (2023)

2.4 Conclusion

Les véhicules autonomes promettent des avantages considérables, tant en matière de fluidité des transports que de réduction des embouteillages, tout en offrant des

solutions de mobilité plus inclusives. Cependant, ces innovations s'accompagnent de défis complexes, tant sur les plans industriels, social que technologique. La transition vers un réseau routier mêlant véhicules autonomes et non autonomes sera délicate, nécessitant une gestion minutieuse pour éviter les frictions entre ces deux types de conduite. En effet, une cohabitation harmonieuse devra être assurée pour prévenir une "guerre" sur les routes, grâce à une intégration progressive et des régulations adaptées. Une coopération internationale est indispensable pour surmonter ces obstacles. L'établissement de standards communs, à l'image de l'industrie aéronautique, permettra aux constructeurs de partager leurs connaissances et leurs bonnes pratiques. Une telle approche collaborative sera essentielle pour garantir une transition harmonieuse vers un écosystème de mobilité autonome. Enfin, il est impératif que cette transition prenne en compte non seulement les aspects technologiques, mais aussi les réalités économiques et sociales, afin que tous puissent bénéficier des avantages promis par cette révolution. Comme le soulignait Sénèque : *"Il n'y a pas de vent favorable pour celui qui ne sait pas où il va."* Cette citation rappelle l'importance de définir une direction claire dans cette transition technologique.

"l'intelligence artificielle est capable de faire des choses incroyables, mais elle ne peut pas remplacer la créativité humaine."
Fei-Fei Li

Bibliographie

- Académie Française. (2023a). Acceptabilité - Dictionnaire de l'Académie française.
- Académie Française. (2023b). Acceptable - Dictionnaire de l'Académie française.
- Académie Française. (2023c). Usager - Dictionnaire de l'Académie française.
- Académie Française. (2024a). Expliquer - Dictionnaire de l'Académie française.
- Académie Française. (2024b). Interface - Dictionnaire de l'Académie française.
- Académie Nationale de Médecine. (2023). Cinétose. *Dictionnaire de l'académie nationale de medecine*.
- Acheampong, R., & Cugurullo, F. (2019). Capturing the Behavioural Determinants behind the Adoption of Autonomous Vehicles : Conceptual Frameworks and Measurement Models to Predict Public Transport, Sharing and Ownership Trends of Self-Driving Cars. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 62, 349-375. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.01.009>
- Adell, E. (2010). Acceptance of Driver Support Systems. In *Proceedings of the European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems* (p. 475-486, T. 2).
- Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail. (2021). *Expositions Aux Technologies de Réalité Virtuelle et/Ou Augmentée* (rapp. tech.). Anses.
- Ajzen, I. (1991). The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 50(2), 179-211. [https://doi.org/10.1016/0749-5978\(91\)90020-T](https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T)
- Alharbi, S. T. (2014). Trust and Acceptance of Cloud Computing : A Revised UTAUT Model. *2014 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence*, 131-134. <https://doi.org/10.1109/CSCI.2014.107>
- Ammenwerth, E. (2019). Technology Acceptance Models in Health Informatics : TAM and UTAUT. *Studies in health technology and informatics*, 263, 64-71. <https://doi.org/10.3233/SHTI190111>
- An, F., Xi, L., Yu, J., & Zhang, M. (2022). Relationship between Technology Acceptance and Self-Directed Learning : Mediation Role of Positive Emotions and Technological Self-Efficacy. *Sustainability*, 14(16), 10390. <https://doi.org/10.3390/su141610390>

- Anderson, J. M., Kalra, N., Stanley, K. D., Sorensen, P., Samaras, C., & Oluwatola, O. A. (2016). *Autonomous Vehicle Technology : A Guide for Policymakers*. RAND Corporation.
- Asimov, I. (1950). *Les Robots*. Doubleday.
- Atakishiyev, S., Salameh, M., Yao, H., & Goebel, R. (2023, février). Explainable Artificial Intelligence for Autonomous Driving : A Comprehensive Overview and Field Guide for Future Research Directions.
- Audi. (2017). TechDay Conduite Pilotée – Le trafic jam pilot dans la nouvelle Audi A8.
- Awad, E., Dsouza, S., Shariff, A., Rahwan, I., & Bonnefon, J.-F. (2020). Universals and variations in moral decisions made in 42 countries by 70,000 participants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(5), 2332-2337. <https://doi.org/10.1073/pnas.1911517117>
- Awad, E., Levine, S., Kleiman-Weiner, M., Dsouza, S., Tenenbaum, J., Shariff, A., Bonnefon, J.-F., & Rahwan, I. (2019). Drivers Are Blamed More than Their Automated Cars When Both Make Mistakes. *Nature Human Behaviour*, 3(10), 920-926.
- Bandura, A. (1977a). Self-efficacy : Toward a unifying theory of behavioral change. *Psychological Review*, 84(2), 191-215. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.84.2.191>
- Bandura, A. (1977b). *Social Learning Theory*. Prentice-Hall.
- Bandura, A. (1986). *Social Foundations of Thought and Action : A Social Cognitive Theory*. Prentice-Hall.
- Banks, V. A., Plant, K. L., & Stanton, N. A. (2019). Driving aviation forward ; contrasting driving automation and aviation automation. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 20(3), 250-264. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2018.1432716>
- Banks, V. A., Stanton, N. A., Burnett, G., & Hermawati, S. (2018). Distributed Cognition on the road : Using EAST to explore future road transportation systems. *Applied Ergonomics*, 68, 258-266. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.11.013>
- Bansal, M., Krizhevsky, A., & Ogale, A. (2018). ChauffeurNet : Learning to Drive by Imitating the Best and Synthesizing the Worst. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1812.03079>
- Bansal, P., & Kockelman, K. M. (2017). Forecasting Americans' long-term adoption of connected and autonomous vehicle technologies. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 95, 49-63. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.10.013>
- Bansal, P., Kockelman, K. M., & Singh, A. (2017). Collaborative Automation : Realizing the Benefits of Autonomous Driving. *Transportation research part C : emerging technologies*, 77, 182-196. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.01.014>
- Barcenilla, J., & Bastien, C. (2010). L'acceptabilité Des Nouvelles Technologies : Quelles Relations Avec l'ergonomie, l'utilisabilité et l'expérience Utilisateur ? : *Le travail humain*, Vol. 72(4), 311-331. <https://doi.org/10.3917/th.724.0311>

- Bargh, J. A., Gollwitzer, P. M., Lee-Chai, A., Barndollar, K., & Trötschel, R. (2001). The automated will : nonconscious activation and pursuit of behavioral goals. *Journal of Personality and Social Psychology*, 81(6), 1014-1027.
- Bauchet, C., Hubert, B., & Dinet, J. (2020). Entre Acceptabilité et Appropriation Des Outils Numériques Intégrés Dans Le Système Éducatif : Le Modèle Des 4A. *13ème Colloque International RIPSYDEVE " La Psychologie Du Développement et de l'éducation Pour Le 21ème Siècle : Nouveaux Objets, Espaces et Temporalités "*, 158-161.
- Baumann, M., Krems, J., & Heinrich, L. K. (2022). Automation, Situation Awareness and Mental Workload. In A. Riener, M. Jeon & I. Alvarez (éd.), *User Experience Design in the Era of Automated Driving* (p. 3-27, T. 980). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77726-5_1
- Bayouth, M., Nourbakhsh, I. R., & Thorpe, C. E. (1998). A Hybrid Human-Computer Autonomous Vehicle Architecture. *Third ECPD International Conference on Advanced Robotics, Intelligent Automation and Control*.
- Bazilinskyy, P., & de Winter, J. (2015). Auditory Interfaces in Automated Driving : An International Survey. *PeerJ Computer Science*, e13. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.13>
- Behere, S., & Törngren, M. (2015). A Functional Architecture for Autonomous Driving. *Proceedings of the First International Workshop on Automotive Software Architecture*, 3-10. <https://doi.org/10.1145/2752489.2752491>
- Bel, M., & Kraiem, S. (2018). From Autonomous Driving Acceptability to Autonomous Vehicles' Functions Acceptability : A Questionnaire Study among 2708 Participants. *ICAP*.
- Bel, M. (2016). *Prédire l'utilisation d'une Nouvelle Technologie : Le Cas Des Systèmes de Transports Intelligents Coopératifs* [thèse de doct., Université de Grenoble Alpes (ComUE)].
- Bel, M., Coeugnet, S., & Watteau, P. (2019). Acceptabilité Du Véhicule Autonome. *Institut VEDECOM*.
- Bellem, H., Thiel, B., Schrauf, M., & Krems, J. F. (2018). 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. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.02.036>
- Berger, C., & Rumpe, B. (2014). Autonomous Driving - 5 Years after the Urban Challenge : The Anticipatory Vehicle as a Cyber-Physical System. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1409.0413>
- Bernard, J.-B., Anne-Catherine, S., & Eric, C. (2007). Page Mode Reading with Simulated Scotomas : A Modest Effect of Interline Spacing on Reading Speed. *Vision Research*, 47(28), 3447-3459. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2007.10.005>

- Bimbraw, K. (2015). Autonomous Cars : Past, Present and Future—A Review of the Developments in the Last Century, the Present Scenario, and the Expected Future of Autonomous Vehicle Technology. *Proceedings of the 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*, 1, 191-198.
- Bin-Nun, A. Y., Derler, P., Mehdipour, N., & Tebbens, R. D. (2022). How should autonomous vehicles drive ? Policy, methodological, and social considerations for designing a driver. *Humanities and Social Sciences Communications*, 9(1), 299. <https://doi.org/10.1057/s41599-022-01286-2>
- Blut, M., Chong, A., Tsigna, Z., & Venkatesh, V. (2022). Meta-Analysis of the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) : Challenging Its Validity and Charting a Research Agenda in the Red Ocean. *Journal of the Association for Information Systems*, 23(1), 13-95. <https://doi.org/10.17705/1jais.00719>
- BMW. (2024). BMW 7er Limousine (G70) : Modelle, technische Daten, Hybrid & Preise | BMW.de.
- Bobillier Chaumon, M.-E. (2016). L'acceptation située des technologies dans et par l'activité : premiers étayages pour une clinique de l'usage. *Psychologie du Travail et des Organisations*, 22(1), 4-21. <https://doi.org/10.1016/j.pto.2016.01.001>
- Bobillier-Chaumon, M.-É., & Dubois, M. (2010). L'adoption Des Technologies En Situation Professionnelle : Quelles Articulations Possibles Entre Acceptabilité et Acceptation ? : *Le travail humain*, Vol. 72(4), 355-382. <https://doi.org/10.3917/th.724.0355>
- Bojarski, M., Del Testa, D., Dworakowski, D., Firner, B., Flepp, B., Goyal, P., Jackel, L. D., Monfort, M., Muller, U., Zhang, J., Zhang, X., Zhao, J., & Zieba, K. (2016). End to End Learning for Self-Driving Cars. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1604.07316>
- Bojarski, M., Yeres, P., Choromanska, A., Choromanski, K., Firner, B., Jackel, L., & Muller, U. (2017). Explaining How a Deep Neural Network Trained with End-to-End Learning Steers a Car. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1704.07911>
- Bonnefon, J.-F., Shariff, A., & Rahwan, I. (2016). The social dilemma of autonomous vehicles. *Science*, 352(6293), 1573-1576. <https://doi.org/10.1126/science.aaf2654>
- Bouchard, S., Robillard, G., Renaud, P., et al. (2007). Revising the Factor Structure of the Simulator Sickness Questionnaire. *Annual review of cybertherapy and telemedicine*, 5(Summer), 128-137.
- Boutrouille, M., Sagnier, C., & Loup-Escande, É. (2024). Acceptabilité d'un système logiciel robotique/cobot : une étude exploratoire en industrie. *Psychologie du Travail et des Organisations*, S1420253024000621. <https://doi.org/10.1016/j.pto.2024.08.002>

- Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1994). Measuring emotion : The self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 25(1), 49-59. [https://doi.org/10.1016/0005-7916\(94\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0005-7916(94)90063-9)
- Brell, T., Philipsen, R., & Ziefle, M. (2019). Suspicious Minds? - Users' Perceptions of Autonomous and Connected Driving. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 20(3), 301-331. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2018.1485985>
- Broggi, A., Cerri, P., Debattisti, S., Laghi, M. C., Medici, P., Molinari, D., Panciroli, M., & Prioletti, A. (2015). PROUD—Public Road Urban Driverless-Car Test. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(6), 3508-3519. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2477556>
- Carteni, A. (2020). The acceptability value of autonomous vehicles : A quantitative analysis of the willingness to pay for shared autonomous vehicles (SAVs) mobility services. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 8, 100224. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100224>
- Cegarra, J., Unrein, H., André, J.-M., & Navarro, J. (2023). Conduire Parmi Des Véhicules Autonomes : Effet de La Confiance Initiale Sur Le Comportement de Conduite. *12ème Colloque de Psychologie Ergonomique - EPIQUE 2023*, 252-259.
- Cerema. (2019, avril). *Véhicule Autonome* (rapp. tech.).
- Chakir, J., Diez, J., Lanaud, E., & De Saint-Denis, M. (2021). *Revue Bibliographique Des Travaux 2021* (rapp. tech.). Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (DGITM). Paris.
- Chatila, R., Firth-Butterfield, K., Havens, J. C., & Karachalios, K. (2017). The IEEE Global Initiative for Ethical Considerations in Artificial Intelligence and Autonomous Systems [Standards]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 24(1), 110-110. <https://doi.org/10.1109/MRA.2017.2670225>
- Chen, J. Y. C., Lakhmani, S. G., Stowers, K., Selkowitz, A. R., Wright, J. L., & Barnes, M. (2018). Situation awareness-based agent transparency and human-autonomy teaming effectiveness. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 19(3), 259-282. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2017.1315750>
- Chevet, C. (2017). La Voix de Synthèse : De La Communication de Masse à l'interaction Homme-Machine. *Communication & langages*, 193(3), 63-78. <https://doi.org/10.3917/comla.193.0063>
- Choi, J. K., & Ji, Y. G. (2015). Investigating the Importance of Trust on Adopting an Autonomous Vehicle. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 31(10), 692-702. <https://doi.org/10.1080/10447318.2015.1070549>
- Christophersen, T., & Konradt, U. (2011). Reliability, validity, and sensitivity of a single-item measure of online store usability. *International Journal of Human-Computer Studies*, 69(4), 269-280. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2010.10.005>
- Clapp, J. D., Olsen, S. A., Beck, J. G., Palyo, S. A., Grant, D. M., Gudmundsdottir, B., & Marques, L. (2011). The Driving Behavior Survey : Scale construction and

- validation. *Journal of Anxiety Disorders*, 25(1), 96-105.
<https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2010.08.008>
- Clare, A. S., Cummings, M. L., & Repenning, N. P. (2015). Influencing Trust for Human–Automation Collaborative Scheduling of Multiple Unmanned Vehicles. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 57(7), 1208-1218. <https://doi.org/10.1177/0018720815587803>
- Codevilla, F., Muller, M., Lopez, A., Koltun, V., & Dosovitskiy, A. (2018). End-to-End Driving Via Conditional Imitation Learning. *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 4693-4700.
<https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460487>
- Cody-Allen, E., & Kishore, R. (2006). An extension of the UTAUT model with e-quality, trust, and satisfaction constructs. *Proceedings of the 2006 ACM SIGMIS CPR Conference on Computer Personnel Research : Forty Four Years of Computer Personnel Research : Achievements, Challenges & the Future*, 82-89.
<https://doi.org/10.1145/1125170.1125196>
- Cohen, M. S., Parasuraman, R., & Freeman, J. T. (1998). Trust in Decision Aids : A Model and Its Training Implications.
- Cohen, S., Kamarck, T., & Mermelstein, R. (1983). A Global Measure of Perceived Stress. *Journal of Health and Social Behavior*, 24(4), 385.
<https://doi.org/10.2307/2136404>
- Compeau, D. R., & Higgins, C. A. (1995). Computer Self-Efficacy : Development of a Measure and Initial Test. *MIS Quarterly*, 19(2), 189.
<https://doi.org/10.2307/249688>
- Comte, A. (1830). *Cours de Philosophie Positive*. Bachelier.
- Cruise. (2024). Cruise Driverless Rides | Autonomous Vehicles | Self-Driving Cars.
- Csikszentmihalyi, M. (1975). *Beyond boredom and anxiety*. Jossey-Bass Publishers.
OCLC : 565395946.
- Da Lio, M., Plebe, A., Bortoluzzi, D., Rosati Papini, G. P., & Donà, R. (2018). Autonomous Vehicle Architecture Inspired by the Neurocognition of Human Driving : *Proceedings of the 4th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, 507-513.
<https://doi.org/10.5220/0006785605070513>
- Dahlberg, T., Mallat, N., & Öörni, A. (2003). Trust enhanced technology acceptance model - consumer acceptance of mobile payment solutions. *Mobility Roundtable, Stockholm, Sweden, May 22-23, 2003*.
- Dai, Q., Yao, L., Yu, Y., Wu, Q., Yang, J., Takahashi, S., Ejima, Y., & Wu, J. (2020). Improving the accuracy and speed of choice in human-computer interactions via a subliminal priming effect. *International Journal of Mechatronics and Automation*, 7(2), 105. <https://doi.org/10.1504/IJMA.2020.108795>
- Davis, F. D. (1985). *A technology acceptance model for empirically testing new end-user*

information systems : theory and results [Thesis]. Massachusetts Institute of Technology.

Accepted : 2005-08-08T16 :11 :32Z.

Davis, F. D. (1989). Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319.

<https://doi.org/10.2307/249008>

Davis, F. D., Bagozzi, R. P., & Warshaw, P. R. (1992). Extrinsic and Intrinsic Motivation to Use Computers in the Workplace. *Journal of Applied Social Psychology*, 22(14), 1111-1132. <https://doi.org/10.1111/j.1559-1816.1992.tb00945.x>

Davis, W. (2024, juillet). Police Pulled over a Waymo Car for Driving in the Oncoming Lane.

de Leeuw, R. (2010). Special Font for Dyslexia ?

de Miguel, M. Á., Moreno, F. M., García, F., Armingol, J. M., & Martin, R. E. (2020). Autonomous Vehicle Architecture for High Automation. In R. Moreno-Díaz, F. Pichler & A. Quesada-Arencibia (éd.), *Computer Aided Systems Theory - EUROCAST 2019* (p. 145-152). Springer International Publishing.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-45096-0_18

Deb, S., Strawderman, L., Carruth, D., DuBien, J., Smith, B., & Garrison, T. (2017). Development and Validation of a Questionnaire to Assess Pedestrian Receptivity toward Fully Autonomous Vehicles. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 84, 178-195. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.08.029>

Dettmann, A., Hartwich, F., Roßner, P., Beggiato, M., Felbel, K., Krems, J., & Bullinger, A. C. (2021). Comfort or Not? Automated Driving Style and User Characteristics Causing Human Discomfort in Automated Driving. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 37(4), 331-339.

<https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1860518>

Diebold, J. (1960). Life under Automation. *Challenge*, 9(3), 20-25.

<https://doi.org/10.1080/05775132.1960.11469199>

Dolins, S., Strömberg, H., Wong, Y. Z., & Karlsson, M. (2021). Sharing Anxiety Is in the Driver's Seat : Analyzing User Acceptance of Dynamic Ridepooling and Its Implications for Shared Autonomous Mobility. *Sustainability*, 13(14), 7828.

<https://doi.org/10.3390/su13147828>

Dow, S., Mehta, M., Harmon, E., MacIntyre, B., & Mateas, M. (2007). Presence and engagement in an interactive drama. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1475-1484.

<https://doi.org/10.1145/1240624.1240847>

Doyen, S., Klein, O., Pichon, C.-L., & Cleeremans, A. (2012). Behavioral Priming : It's All in the Mind, but Whose Mind? (J. Lauwereyns, éd.). *PLoS ONE*, 7(1), e29081.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029081>

Draper, N. R., & Smith, H. (1998). *Applied Regression Analysis* (3rd ed). Wiley.

- Duarte, F., & Ratti, C. (2018). The Impact of Autonomous Vehicles on Cities : A Review. *Journal of Urban Technology*, 25(4), 3-18.
<https://doi.org/10.1080/10630732.2018.1493883>
- Dubois, M., & Bobillier-Chaumon, M.-É. (2009). L'acceptabilité des technologies : bilans et nouvelles perspectives. *Le travail humain*, 72(4), 305-310
 Bibliographie_available : 1
 Cairndomain : www.cairn.info
 Cite Par_available : 1.
- Dunn, O. J. (1964). Multiple Comparisons Using Rank Sums. *Technometrics : a journal of statistics for the physical, chemical, and engineering sciences*, 6(3), 241-252.
<https://doi.org/10.1080/00401706.1964.10490181>
- Durkheim, É. (1893). *De La Division Du Travail Social*. Félix Alcan.
- Ebnali, M., Lamb, R., & Fathi, R. (2020, février). Familiarization Tours for First-Time Users of Highly Automated Cars : Comparing the Effects of Virtual Environments with Different Levels of Interaction Fidelity.
 Éditions Larousse. (2023a). Définitions : acceptabilité - Dictionnaire de français Larousse.
- Éditions Larousse. (2023b). Définitions : usager - Dictionnaire de français Larousse.
- Éditions Larousse. (2023c). Définitions : Utilisateur - Dictionnaire de Français Larousse.
- Éditions Larousse. (2024a). Définitions : automate - Dictionnaire de français Larousse.
- Éditions Larousse. (2024b). Définitions : automatisation - Dictionnaire de français Larousse.
- Éditions Larousse. (2024c). Définitions : autonome - Dictionnaire de français Larousse.
- Ekman, P. (1992). Facial Expressions of Emotion : New Findings, New Questions. *Psychological Science*, 3(1), 34-38.
- Ernout, A., Meillet, A., & André, J. (2001). *Dictionnaire étymologique de la langue latine : histoire des mots* (4e éd). Klincksieck.
- Fagnant, D. J., & Kockelman, K. (2015). Preparing a nation for autonomous vehicles : opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 77, 167-181.
<https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.003>
- Feinauer, S., Groh, I., & Petzoldt, T. (2024). The Impact of a Priori Information on Drivers' Mental Models, Attitudes, and Behavior in Interaction with Partial and Conditional Driving Automation. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 1-13. <https://doi.org/10.1080/10447318.2024.2341190>
- Felber, N. A., Lipworth, W., Tian, Y. J., Roulet Schwab, D., & Wangmo, T. (2024). Informing existing technology acceptance models : a qualitative study with older persons and caregivers. *European Journal of Ageing*, 21(1), 12.
<https://doi.org/10.1007/s10433-024-00801-5>

- Feyerabend, M., Tscharn, R., & Russwinkel, N. (2019). Social Interaction with Self-Driving Cars. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-6. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300471>
- Feys, M., Rombaut, E., & Vanhaverbeke, L. (2020). Experience and Acceptance of Autonomous Shuttles in the Brussels Capital Region. *Sustainability*, 12(20), 8403. <https://doi.org/10.3390/su12208403>
- Fishbein, M., & Ajzen, I. (1975). *Belief, Attitude, Intention and Behavior : An Introduction to Theory and Research*.
- Fleury, S., & Chaniaud, N. (2024). Multi-user centered design : acceptance, user experience, user research and user testing. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 25(2), 209-224. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2023.2166623>
- Fodor, J. (1975). *The Language of Thought*. Harvard University Press.
- Fortunati, L., Lugano, G., & Manganelli, A. (2019). European Perceptions of Autonomous and Robotized Cars. *International Journal of Communication*, 13, 2728-2747.
- Freiwald, J. P., Göbel, Y., Mostajeran, F., & Steinicke, F. (2020). The cybersickness susceptibility questionnaire : predicting virtual reality tolerance. *Proceedings of the Conference on Mensch Und Computer*, 115-118. <https://doi.org/10.1145/3404983.3410022>
- Friedman, M. (1937). The Use of Ranks to Avoid the Assumption of Normality Implicit in the Analysis of Variance. *Journal of the American Statistical Association*, 32(200), 675-701.
- Galliussi, J., Perondi, L., Chia, G., Gerbino, W., & Bernardis, P. (2020). Inter-Letter Spacing, Inter-Word Spacing, and Font with Dyslexia-Friendly Features : Testing Text Readability in People with and without Dyslexia. *Annals of Dyslexia*, 70(1), 141-152. <https://doi.org/10.1007/s11881-020-00194-x>
- Gao, F., Lee, J. D., & Rizzo, M. (2019). Adaptive Interfaces for Personalized Driving Experiences in Autonomous Vehicles. *International Journal of Human-Computer Studies*, 125, 58-67. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2018.12.007>
- Gasne, C., Paire-Ficout, L., Bordel, S., Lafont, S., & Ranchet, M. (2022). Takeover performance of older drivers in automated driving : A review. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 87, 347-364. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2022.04.015>
- Gelman, A. (2014). *Bayesian Data Analysis* (Third edition). CRC Press.
- General Motors. (2024). Super Cruise Driver Assistance - Hands-Free Driving.
- Gentiletti, M. G., & Cahour, B. (2024). Le Sentiment d'(in)Sécurité Dans Les Transports Partagés Autonomes : Revue de Littérature. *RTS. Recherche, transports, sécurité*, 16p.
- Ghazizadeh, M., Lee, J. D., & Boyle, L. N. (2012). Extending the Technology Acceptance Model to assess automation. *Cognition, Technology & Work*, 14(1), 39-49. <https://doi.org/10.1007/s10111-011-0194-3>

- Gomant, F., & Moizo, M. (2018). L'attitude des Français face à la voiture autonome.
- Gonzalez, D., Perez, J., Milanés, V., & Nashashibi, F. (2016). A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 17(4), 1135-1145.
<https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2498841>
- Goodall, N. J. (2014). Machine Ethics and Autonomous Vehicles. In *In Road Vehicle Automation* (p. 93-102). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-05990-7_9
- Grand dictionnaire terminologique. (2023a). usager.
- Grand dictionnaire terminologique. (2023b). utilisateur.
- Greene, J. D. (2016). Our driverless dilemma. *Science*, 352(6293), 1514-1515.
<https://doi.org/10.1126/science.aaf9534>
- Guého, L., Granié, M.-A., & Abric, J.-C. (2014). French validation of a new version of the Driver Behavior Questionnaire (DBQ) for drivers of all ages and level of experiences. *Accident Analysis & Prevention*, 63, 41-48.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.10.024>
- Hancock, P. A., Billings, D. R., Schaefer, K. E., Chen, J. Y. C., De Visser, E. J., & Parasuraman, R. (2011). A Meta-Analysis of Factors Affecting Trust in Human-Robot Interaction. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 53(5), 517-527.
<https://doi.org/10.1177/0018720811417254>
- Harper, C. D., Hendrickson, C. T., Mangones, S., & Samaras, C. (2016). 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.
- Harvey, C., Stanton, N. A., Pickering, C. A., McDonald, M., & Zheng, P. (2011). A usability evaluation toolkit for In-Vehicle Information Systems (IVISs). *Applied Ergonomics*, 42(4), 563-574. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2010.09.013>
- Hassenzahl, M. (2005, janvier). The Thing and I : Understanding the Relationship between User and Product. In *Funology : From Usability to Enjoyment* (p. 31-42). Kluwer Academic Publishers.
- Heikoop, D. D., De Winter, J. C., Van Arem, B., & Stanton, N. A. (2016). Psychological constructs in driving automation : a consensus model and critical comment on construct proliferation. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 17(3), 284-303.
<https://doi.org/10.1080/1463922X.2015.1101507>
- Hengstler, M., Enkel, E., & Duelli, S. (2016). Applied artificial intelligence and trust—The case of autonomous vehicles and medical assistance devices. *Technological Forecasting and Social Change*, 105, 105-120.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.12.014>

- Heutte, J., & Fenouillet, F. (2010). Propositions pour une mesure de l'expérience optimale (état de flow) en contexte éducatif. *Proceedings of the 26e Congrès International D'actualité de la Recherche en Éducation et en Formation*.
- Hilgarter, K., & Granig, P. (2020). Public perception of autonomous vehicles : A qualitative study based on interviews after riding an autonomous shuttle. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 72, 226-243. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2020.05.012>
- Hoc, J.-M., Young, M. S., & Blosseville, J.-M. (2009). Cooperation between drivers and automation : implications for safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10(2), 135-160. <https://doi.org/10.1080/14639220802368856>
- Hoff, K. A., & Bashir, M. (2015). Trust in Automation : Integrating Empirical Evidence on Factors That Influence Trust. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 57(3), 407-434. <https://doi.org/10.1177/0018720814547570>
- Hoffman, R. R., Mueller, S. T., Klein, G., & Litman, J. (2018). Metrics for Explainable AI : Challenges and Prospects. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1812.04608>
- Holthausen, B. E., Stuck, R. E., & Walker, B. N. (2022). Trust in Automated Vehicles. In A. Riener, M. Jeon & I. Alvarez (éd.), *User Experience Design in the Era of Automated Driving* (p. 29-49, T. 980). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77726-5_2
- Hong, J.-H., Margines, B., & Dey, A. K. (2014). A smartphone-based sensing platform to model aggressive driving behaviors. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 4047-4056. <https://doi.org/10.1145/2556288.2557321>
- Hoque, R., & Sorwar, G. (2017). Understanding factors influencing the adoption of mHealth by the elderly : An extension of the UTAUT model. *International Journal of Medical Informatics*, 101, 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2017.02.002>
- Hsu, H.-h. (2012). The Acceptance of Moodle : An Empirical Study Based on UTAUT. *Creative Education*, 03(08), 44-46. <https://doi.org/10.4236/ce.2012.38B010>
- Hulse, L., Xie, H., & Galea, E. (2018). Perceptions of Autonomous Vehicles : Relationships with Road Users, Risk, Gender and Age. *Safety Science*, 102, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.001>
- Husson, R., & Graf, F. (1965). *Manuel de Biologie Générale : à l'usage Des Travaux Pratiques*. Gauthier-Villars.
- Hyde, S., Dalton, P., & Stevens, A. (2017). *Attitudes to Autonomous Vehicles (TRL Report PPR823)* (rapp. tech.). TRL Limited. Berkshire, UK.
- Institut National de Sécurité Routière et de Recherches. (2003, juin). *Dossier de Presse - Vitesse et Distnaces de Sécurité* (rapp. tech.).

- International Organization for Standardization. (2018). Ergonomie de l'interaction Homme-Système – Partie 11 : Utilisabilité – Définitions et Concepts (ISO Standard No. 9841-11 :2018).
- Janssen, W. H. (1979). Routeplanning En Geleiding : Een Literatuurstudie. In *Institute for Perception TNO (Cité Dans Michon, 2985)*.
- Jenkins, R., Cerný, D., & Hřibek, T. ( d.). (2022, novembre). *Autonomous Vehicle Ethics : The Trolley Problem and Beyond* (1^{re}  d.). Oxford University Press New York. <https://doi.org/10.1093/oso/9780197639191.001.0001>
- Jochem, T., Pomerleau, D., Kumar, B., & Armstrong, J. (1995). PANS : A Portable Navigation Platform. *Proceedings of the Intelligent Vehicles '95. Symposium*, 107-112. <https://doi.org/10.1109/IVS.1995.528266>
- Journal Officiel. (2001, juin). Article R415-5 Du Code de La Route.
- Journal Officiel. (2003, avril). Article R412-12 Du Code de La Route.
- Journal Officiel. (2018, juin). Article R415-11 Du Code de La Route.
- Journal Officiel. (2022, janvier). Article R311-1 Du Code Des Transports.
- Journal Officiel de l'Union Européenne. (2016, mai). Règlement (UE) 2016/679 Du Parlement Européen et Du Conseil Du 27 Avril 2016, Relatif   La Protection Des Personnes Physiques à l'égard Du Traitement Des Données   Caractère Personnel et à La Libre Circulation de Ces Données, et Abrogeant La Directive 95/46/CE (Règlement Général Sur La Protection Des Données).
- Kaur, K., & Rampersad, G. (2018). Trust in driverless cars : Investigating key factors influencing the adoption of driverless cars. *Journal of Engineering and Technology Management*, 48, 87-96. <https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2018.04.006>
- Kaye, S.-A., Rodwell, D., Watson-Brown, N., Rose, C., & Buckley, L. (2022). Road users' engagement in prosocial and altruistic behaviors : A systematic review. *Journal of Safety Research*, 82, 342-351. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.06.010>
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire : An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3
- Khogali, H. O., & Mekid, S. (2023). The blended future of automation and AI : Examining some long-term societal and ethical impact features. *Technology in Society*, 73, 102232. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102232>
- Kim, H., & Fesenmaier, D. R. (2008). Persuasive Design of Destination Web Sites : An Analysis of First Impression. *Journal of Travel Research*, 47(1), 3-13. <https://doi.org/10.1177/0047287507312405>
- Kohl, C., Knigge, M., Baader, G., Böhm, M., & Krcmar, H. (2018). Anticipating acceptance of emerging technologies using twitter : the case of self-driving cars. *Journal of Business Economics*, 88(5), 617-642. <https://doi.org/10.1007/s11573-018-0897-5>
- Kolb, B. (2019). *An Introduction to Brain and Behavior* (6th edition). Worth Publishers.

- König, M., & Neumayr, L. (2017). Users' resistance towards radical innovations : The case of the self-driving car. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 44, 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.10.013>
- Koul, S., & Eydgahi, A. (2018). Utilizing Technology Acceptance Model (Tam) for Driverless Car Technology Adoption. *Journal of Technology Management and Innovation*, 13(4), 37-46. <https://doi.org/10.4067/S0718-27242018000400037>
- Koul, S., & Eydgahi, A. (2019). The Impact of Social Influence, Technophobia, and Perceived Safety on Autonomous Vehicle Technology Adoption. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. <https://doi.org/10.3311/PPtr.11332>
- Krueger, R. A., & Casey, M. A. (2015). *Focus groups : a practical guide for applied research* (5th edition). SAGE.
- Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583-621.
- Kyriakidis, M., Happee, R., & De Winter, J. (2015). Public opinion on automated driving : Results of an international questionnaire among 5000 respondents. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 32, 127-140. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.04.014>
- Lagström, T., & Lundgren, V. M. (2016). AVIP - Autonomous Vehicles' Interaction with Pedestrians - An Investigation of Pedestrian-Driver Communication and Development of a Vehicle External Interface.
- Lallemand, C., Gronier, G., & Dugué, M. (2018). *Méthodes de design UX : 30 méthodes fondamentales pour concevoir des expériences optimales* (2e éd). Eyrolles.
- Lavieri, P., Garikapati, V., Bhat, C., Pendyala, R., Astroza, S., & Dias, F. (2017). Modeling Individual Preferences for Ownership and Sharing of Autonomous Vehicle Technologies. *Transportation Research Record*, 2665, 1-10. <https://doi.org/10.3141/2665-01>
- Ledger, S., Cunningham, M., & Regan, M. (2018). *Public Opinion about Automated and Connected Vehicles in Australia and New Zealand : Results from the 2nd ADVI Public Opinion Survey* (rapp. tech.). ADVI Australia and New Zealand Driverless Vehicle Initiative project.
- Lee, J., & Kolodge, K. (2019). Exploring Trust in Self-Driving Vehicles through Text Analysis. *Human Factors*, 62(2), 260-277. <https://doi.org/10.1177/0018720819872672>
- Lee, J. D., & See, K. A. (2004). Trust in Automation : Designing for Appropriate Reliance. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 46(1), 50-80. https://doi.org/10.1518/hfes.46.1.50_30392
- Lee, J.-G., Kim, K. J., Lee, S., & Shin, D.-H. (2015). Can Autonomous Vehicles Be Safe and Trustworthy? Effects of Appearance and Autonomy of Unmanned Driving Systems. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 31(10), 682-691. <https://doi.org/10.1080/10447318.2015.1070547>

- Lee, Y. M., Madigan, R., Louw, T., Lehtonen, E., & Merat, N. (2023). Does users' experience and evaluation of level 3 automated driving functions predict willingness to use : Results from an on-road study. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 99, 473-484.
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2023.11.004>
- Leicht, T., Chtourou, A., & Ben Youssef, K. (2018). Consumer Innovativeness and Intentioned Autonomous Car Adoption. *Journal of High Technology Management Research*, 29(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.hitech.2018.04.001>
- Lemonnier, A., Adélé, S., & Dionisio, C. (2020). The determinants of acceptability and behavioural intention of automated vehicles – a review. *Le travail humain*, 83(4), 297-342
 Bibliographie_available : 0
 Cairndomain : www.cairn.info
 Cite Par_available : 0.
- Lévy, J.-D. (2019). Les Français et la voiture autonome.
- Lin, P. (2016). Why Ethics Matters for Autonomous Cars. In *Autonomes Fahren* (p. 69-85). Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-48847-8_4
- Litman, T. (2020). Autonomous Vehicle Implementation Predictions : Implications for Transport Planning.
- Liu, P., Du, Y., & Xu, Z. (2019a). Machines versus Humans : People's Biased Responses to Traffic Accidents Involving Self-Driving Vehicles. *Accident Analysis and Prevention*, 125, 232-240. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.02.012>
- Liu, P., Ma, Y., & Zuo, Y. (2019b). Self-Driving Vehicles : Are People Willing to Trade Risks for Environmental Benefits ? *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 125, 139-149. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.05.014>
- Liu, P., Yang, R., & Xu, Z. (2019c). Public Acceptance of Fully Automated Driving : Effects of Social Trust and Risk/Benefit Perceptions. *Risk Analysis*, 39(2), 326-341. <https://doi.org/10.1111/risa.13143>
- Liu, P., Zhang, Y., & He, Z. (2019d). The Effect of Population Age on the Acceptable Safety of Self-Driving Vehicles. *Reliability Engineering & System Safety*, 185, 341-347. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.01.003>
- Löcken, A., Golling, C., & Riener, A. (2019). How Should Automated Vehicles Interact with Pedestrians ? : A Comparative Analysis of Interaction Concepts in Virtual Reality. *Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 262-274.
<https://doi.org/10.1145/3342197.3344544>
- Lombard, M., & Ditton, T. (2006). At the Heart of It All : The Concept of Presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2).
<https://doi.org/10.1111/j.1083-6101.1997.tb00072.x>

- Luger-Bazinger, C., Zankl, C., Klieber, K., Hornung-Prähauser, V., & Rehrl, K. (2021). Factors Influencing and Contributing to Perceived Safety of Passengers during Driverless Shuttle Rides. *Future Transportation*, 1(3), 657-671.
<https://doi.org/10.3390/futuretransp1030035>
- Madigan, R., Louw, T., Dziennus, M., Graindorge, T., Ortega, E., Graindorge, M., & Merat, N. (2016). Acceptance of Automated Road Transport Systems (ARTS) : An Adaptation of the UTAUT Model. *Transportation Research Procedia*, 14, 2217-2226. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.237>
- Mankins, J. C. (1995). Technology Readiness Levels. *National Aeronautics and Space Administration, Advanced Concepts Office, Office of Space Access and Technology*.
- Mara, M., & Meyer, K. (2022). Acceptance of Autonomous Vehicles : An Overview of User-Specific, Car-Specific and Contextual Determinants. In A. Riener, M. Jeon & I. Alvarez (éd.), *User Experience Design in the Era of Automated Driving* (p. 51-83, T. 980). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-77726-5_3
- Marx, K., & Engels, F. (1848). *Manifeste Du Parti Communiste*. German Communist League.
- Marzano, M. (2010). Qu'est-ce que la confiance ? *Etudes*, 412(1), 53-63
 Bibliographie_available : 0
 Cairndomain : www.cairn.info
 Cite Par_available : 0.
- Mathôt, S. (2018). Pupillometry : Psychology, Physiology, and Function. *Journal of Cognition*, 1(1), 16. <https://doi.org/10.5334/joc.18>
- Mayer, R. E., & Moreno, R. (1998). A split-attention effect in multimedia learning : Evidence for dual processing systems in working memory. *Journal of Educational Psychology*, 90(2), 312-320. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.90.2.312>
- Mayer, R. C., Davis, J. H., & Schoorman, F. D. (1995). An Integrative Model of Organizational Trust. *The Academy of Management Review*, 20(3), 709.
<https://doi.org/10.2307/258792>
- Mercedes-Benz Group. (2023, janvier). Mercedes-Benz world's first automotive company to certify SAE Level 3 system for U.S. market.
- Michon, J. A. (1971). *Psychonomie Onderweg. Inaugural Lecture*.
- Michon, J. A. (1985). A Critical View of Driver Behavior Models : What Do We Know, What Should We Do ? In L. Evans & R. C. Schwing (éd.), *Human Behavior and Traffic Safety* (p. 485-524). Springer US.
https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2173-6_19
- Mindfoundry. (2021). Humans vs AI : The Trust Paradox.
- Ministère de l'Intérieur français. (2021, novembre). Bases de Données Annuelles Des Accidents Corporels de La Circulation Routière - Années de 2005 à 2020.

- Molich, R., & Nielsen, J. (1990). Improving a human-computer dialogue. *Communications of the ACM*, 33(3), 338-348. <https://doi.org/10.1145/77481.77486>
- Mollo, V., & Falzon, P. (2004). Auto- and allo-confrontation as tools for reflective activities. *Applied Ergonomics*, 35(6), 531-540. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2004.06.003>
- Monéger, F., Coutarel, F., Moták, L., Chambres, P., Izaute, M., & Dhome, M. (2018). L'expérience Vécue et Les Valeurs En Acte Des Accompagnants Pour La Conception d'un Service de Transport Par Navettes Destinées à Être Autonome. *Activités*, 15(1). <https://doi.org/10.4000/activites.3077>
- Morales-Alvarez, W., Certad, N., Tadjine, H. H., & Olaverri-Monreal, C. (2022). Automated Driving Systems : Impact of Haptic Guidance on Driving Performance after a Take Over Request. *2022 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 1817-1823. <https://doi.org/10.1109/IV51971.2022.9827419>
- Moscovici, S. (1961). *La Psychanalyse, Son Image et Son Public*. Presses universitaires de France.
- Moták, L., Neuville, E., Chambres, P., Marmoiton, F., Monéger, F., Coutarel, F., & Izaute, M. (2017). Antecedent Variables of Intentions to Use an Autonomous Shuttle : Moving beyond TAM and TPB? [Les Variables Prédicatives Des Intentions d'utilisation d'une Navette Autonome : Aller Au-Delà Du MAT et de La TCP?] *European Review of Applied Psychology /Revue Europeenne de Psychologie Appliquee*, 67(5), 269-278. <https://doi.org/10.1016/j.erap.2017.06.001>
- Mühl, K., Strauch, C., Grabmaier, C., Reithinger, S., Huckauf, A., & Baumann, M. (2020). Get Ready for Being Chauffeured : Passenger's Preferences and Trust While Being Driven by Human and Automation. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 62(8), 1322-1338. <https://doi.org/10.1177/0018720819872893>
- Nativel-Fontaine, G., & Lespinet-Najib, V. (2023). Exploration of the acceptability of different behaviors of an autonomous vehicle in so-called conflict situations. *Accident Analysis & Prevention*, 186. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2023.107041>
- Nativel-Fontaine, G., Lespinet-Najib, V., Chevrie, M., Aïoun, F., & Luciano, O. (2023). Effet d'une Phase de Familiarisation Sur Les Mesures Subjectives Dans Une Simulation de Véhicule Autonome En Réalité Virtuelle. *12ème Colloque de Psychologie Ergonomique - EPIQUE 2023, Paris, France*, 286-290.
- Nativel-Fontaine, G., Lespinet-Najib, V., Chevrie, M., Aïoun, F., & Luciano, O. (2024a). Effect of Safety Instructions on the Acceptability of the Autonomous Vehicle in a Virtual Reality. *33rd International Congress of Psychology, Pragues, Czech Republic*.

- Nativel-Fontaine, G., Lespinet-Najib, V., Chevrie, M., Aïoun, F., & Ojeda, L. (2024b). *Examining the influence of wait times, traffic and a safety prompt on the acceptability of fully autonomous vehicles* (Soumis).
- Navarro, J. (2008, septembre). *Coopération Homme-Machine En Conduite Automobile Assistée : Contrôle Cognitif et Contrôle de La Trajectoire* [thèse de doct., Université de Nantes].
- Navarro, J., Heuveline, L., Avril, E., & Cegarra, J. (2018). Influence of human-machine interactions and task demand on automation selection and use. *Ergonomics*, 61(12), 1601-1612. <https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1501517>
- Navarro, J., Mars, F., & Hoc, J.-M. (2007). Lateral Control Assistance for Car Drivers : A Comparison of Motor Priming and Warning Systems. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 49(5), 950-960. <https://doi.org/10.1518/001872007X230280>
- Nees, M. A. (2016). Acceptance of Self-driving Cars : An Examination of Idealized versus Realistic Portrayals with a Self- driving Car Acceptance Scale. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 60(1), 1449-1453. <https://doi.org/10.1177/1541931213601332>
- Nielsen, J. (1987). Classification of dialog techniques. *ACM SIGCHI Bulletin*, 19(2), 30-35. <https://doi.org/10.1145/36111.36115>
- Nielsen, J., & Molich, R. (1990). Heuristic evaluation of user interfaces. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems Empowering People - CHI '90*, 249-256. <https://doi.org/10.1145/97243.97281>
- Nikolopoulou, K., Gialamas, V., & Lavidas, K. (2020). Acceptance of mobile phone by university students for their studies : an investigation applying UTAUT2 model. *Education and Information Technologies*, 25(5), 4139-4155. <https://doi.org/10.1007/s10639-020-10157-9>
- Nof, S. Y. (2009). Automation : What It Means to Us Around the World. In S. Y. Nof (éd.), *Springer Handbook of Automation* (p. 13-52). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-78831-7_3
- Nordhoff, S., De Winter, J., Kyriakidis, M., Van Arem, B., & Happee, R. (2018a). Acceptance of Driverless Vehicles : Results from a Large Cross-National Questionnaire Study. *Journal of Advanced Transportation*, 2018, 1-22. <https://doi.org/10.1155/2018/5382192>
- Nordhoff, S., De Winter, J., Madigan, R., Merat, N., Van Arem, B., & Happee, R. (2018b). User acceptance of automated shuttles in Berlin-Schöneberg : A questionnaire study. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 58, 843-854. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.06.024>
- O'Cass, A., & Carlson, J. (2012). An empirical assessment of consumers' evaluations of web site service quality : conceptualizing and testing a formative model. *Journal of Services Marketing*, 26(6), 419-434. <https://doi.org/10.1108/08876041211257909>

- Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). (2005, octobre). Déclaration Universelle Sur La Bioéthique et Les Droits de l'homme.
- Ortega Egea, J. M., & Román González, M. V. (2011). Explaining physicians' acceptance of EHCR systems : An extension of TAM with trust and risk factors. *Computers in Human Behavior*, 27(1), 319-332. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2010.08.010>
- Osswald, S., Wurhofer, D., Trösterer, S., Beck, E., & Tscheligi, M. (2012). Predicting Information Technology Usage in the Car : Towards a Car Technology Acceptance Model. *Proceedings of the 4th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 51-58. <https://doi.org/10.1145/2390256.2390264>
- Paivio, A. (1990, septembre). *Mental Representations*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195066661.001.0001>
- Partala, T., & Kallinen, A. (2012). Understanding the most satisfying and unsatisfying user experiences : Emotions, psychological needs, and context. *Interacting with Computers*, 24(1), 25-34. <https://doi.org/10.1016/j.intcom.2011.10.001>
- Pataranutaporn, P., Liu, R., Finn, E., & Maes, P. (2023). Influencing human-AI interaction by priming beliefs about AI can increase perceived trustworthiness, empathy and effectiveness. *Nature Machine Intelligence*, 5(10), 1076-1086. <https://doi.org/10.1038/s42256-023-00720-7>
- Patil, P., Tamilmani, K., Rana, N. P., & Raghavan, V. (2020). Understanding consumer adoption of mobile payment in India : Extending Meta-UTAUT model with personal innovativeness, anxiety, trust, and grievance redressal. *International Journal of Information Management*, 54, 102144. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102144>
- Payre, W. (2015). *Conduite Complètement Automatisée : Acceptabilité, Confiance et Apprentissage de La Reprise de Contrôle Manuel* [thèse de doct.].
- Petit, J. (2022, mai). *Évaluation Du Risque Ressenti Par Un Passager de Véhicule Autonome Naviguant Parmi Des Piétons* [Theses]. Université de Nantes.
- Piao, J., McDonald, M., Hounsell, N., Graindorge, M., Graindorge, T., & Malhene, N. (2016). Public Views towards Implementation of Automated Vehicles in Urban Areas. *Transportation Research Procedia*, 14, 2168-2177. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.232>
- Picard, D., & Marc, E. (2012). *La notion de conflit*. Presses Universitaires de France.
- Pigeon, C., Alauzet, A., & Paire-Ficout, L. (2021). Factors of acceptability, acceptance and usage for non-rail autonomous public transport vehicles : A systematic literature review. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 81, 251-270. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2021.06.008>
- Piolat, A., & Bannour, R. (2008). Emotions et Affects : Contribution de La Psychologie Cognitive. In P. Nagy & D. Boquet (éd.), *Le Sujet Des Émotions Au Moyen Age* (p. 53-84). Beauchesne Editeur.

- Pottier, G. (2020). Rôle de l'acceptabilité dans l'interaction entre un véhicule conventionnel et un véhicule automatisé, 215.
- Rabardel, P. (1995). *Les Hommes et Les Technologies ; Approche Cognitive Des Instruments Contemporains*. Armand Colin.
- Reason, J., Manstead, A., Stradling, S., Baxter, J., & Campbell, K. (1990). Errors and violations on the roads : a real distinction? *Ergonomics*, 33(10-11), 1315-1332. <https://doi.org/10.1080/00140139008925335>
- Rello, L., & Baeza-Yates, R. (2016). The Effect of Font Type on Screen Readability by People with Dyslexia. *ACM Transactions on Accessible Computing*, 8(4), 1-33. <https://doi.org/10.1145/2897736>
- Rello, L., & Baeza-Yates, R. (2017). How to present more readable text for people with dyslexia. *Universal Access in the Information Society*, 16(1), 29-49. <https://doi.org/10.1007/s10209-015-0438-8>
- Rhiu, I., Kim, Y. M., Kim, W., & Yun, M. H. (2020). The evaluation of user experience of a human walking and a driving simulation in the virtual reality. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 79, 103002. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2020.103002>
- Ribeiro, M. T., Singh, S., & Guestrin, C. (2016). "Why Should I Trust You?" : Explaining the Predictions of Any Classifier. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1602.04938>
- Riener, A., Jeon, M., & Alvarez, I. (éd.). (2022). *User experience design in the era of automated driving*. Springer.
- Rimé, B. (2009). *Le partage social des émotions*. Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.mosco.2009.01>
- Rödel, C., Stadler, S., Meschtscherjakov, A., & Tscheligi, M. (2014). Towards Autonomous Cars : The Effect of Autonomy Levels on Acceptance and User Experience. *Proceedings of the 6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 1-8. <https://doi.org/10.1145/2667317.2667330>
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of Innovations* (Free Press, T. 5th Edition).
- Russell, S., & Norvig, P. (2021). *Artificial Intelligence : A Modern Approach* (4^e éd.). Pearson.
- Rybizki, A., Ihme, K., Nguyen, H. P., Onnasch, L., & Bosch, E. (2022). Acceptance of Automated Shuttles—Application and Extension of the UTAUT-2 Model to Wizard-of-Oz Automated Driving in Real-Life Traffic. *Future Transportation*, 2(4), 1010-1027. <https://doi.org/10.3390/futuretransp2040056>
- SAE International. (2021, avril). Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles.
- Sagnier, C., Loup-Escande, É., & Valléry, G. (2019). Acceptabilité de la réalité virtuelle : une revue de la littérature. *Le travail humain*, 82(3), 183-212
- Bibliographie_available : 0
Cairndomain : www.cairn.info

Cite Par_available : 1.

- Sanbonmatsu, D., Strayer, D., Yu, Z., Biondi, F., & Cooper, J. (2018). Cognitive Underpinnings of Beliefs and Confidence in Beliefs about Fully Automated Vehicles. *Transportation research part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 55, 114-122. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.02.029>
- Scherer, K. R. (2005). What are emotions? And how can they be measured? *Social Science Information*, 44(4), 695-729. <https://doi.org/10.1177/0539018405058216>
- Schmitz, A., Díaz-Martín, A. M., & Yagüe Guillén, M. J. (2022). Modifying UTAUT2 for a cross-country comparison of telemedicine adoption. *Computers in Human Behavior*, 130, 107183. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107183>
- Shackel, B. (2009). Usability – Context, framework, definition, design and evaluation. *Interacting with Computers*, 21(5-6), 339-346. <https://doi.org/10.1016/j.intcom.2009.04.007>
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591-611.
- Sheridan, T. B. (1994). Further Musings on the Psychophysics of Presence. *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2, 1073-1077. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.1994.399986>
- Sheridan, T. B., Verplank, W. L., & Brooks, T. L. (1978). Human/Computer Control of Undersea Teleoperators. NASA. Ames Res. Center *The 14th Ann. Conf. on Manual Control*.
- Shin, K., Tada, N., & Managi, S. (2019). Consumer Demand for Fully Automated Driving Technology. *Economic analysis and Policy*, 61, 16-28. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2018.10.002>
- Shuman, V., Scherer, K., Fontaine, J., & Soriano, C. (2015, août). *The GRID Meets the Wheel : Assessing Emotional Feeling via Self-Report* (rapp. tech.). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2694.6406>
- Siebert, F. W., & Wallis, F. L. (2019). How speed and visibility influence preferred headway distances in highly automated driving. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 64, 485-494. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.06.009>
- Simmel, G. (1908). *Soziologie : Untersuchungen Über Die Formen Der Vergesellschaftung*. Duncker & Humblot.
- Slater, M. (2009). Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 364(1535), 3549-3557. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0138>
- Sokal, R. R., & Michener, C. D. (1958). A Statistical Method for Evaluating Systematic Relationships. *University of Kansas scientific bulletin*, 38, 1409-1438.

- Souche, S., Crispim-Junior, C. F., & Laroche, F. (2023). Véhicule Autonome : L'essayer, Ce n'est Pas Vraiment l'adopter... *The Conversation France*.
- Souders, D., & Charness, N. (2016). Challenges of Older Drivers' Adoption of Advanced Driver Assistance Systems and Autonomous Vehicles. In J. Zhou & G. Salvendy (éd.), *Human Aspects of IT for the Aged Population. Healthy and Active Aging* (p. 428-440). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-39949-2_41
- Spagnolli, A., Frank, L. E., Haselager, P., & Kirsh, D. (2018). Transparency as an Ethical Safeguard. In J. Ham, A. Spagnolli, B. Blankertz, L. Gamberini & G. Jacucci (éd.), *Symbiotic Interaction* (p. 1-6, T. 10727). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-91593-7_1
- Stanton, N. A., & Young, M. S. (2000). A proposed psychological model of driving automation. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 1(4), 315-331.
<https://doi.org/10.1080/14639220052399131>
- Stellantis. (2021, décembre). *TRL Definitions Assessment Template* (rapp. tech.).
- Stellantis. (2024). *Rapport de Stage de Fin d'études - Application of Acceptability Criteria to Urban Autonomous Driving Algorithms in Potentially Conflicting Situations*. (rapp. tech.).
- Šumak, B., Polancic, G., & Hericko, M. (2010). An Empirical Study of Virtual Learning Environment Adoption Using UTAUT. *2010 Second International Conference on Mobile, Hybrid, and On-Line Learning*, 17-22.
<https://doi.org/10.1109/eLmL.2010.11>
- Tan, H., Zhao, X., & Yang, J. (2022). Exploring the influence of anxiety, pleasure and subjective knowledge on public acceptance of fully autonomous vehicles. *Computers in Human Behavior*, 131, 107187.
<https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107187>
- Tas, O. S., Kuhnt, F., Zollner, J. M., & Stiller, C. (2016). Functional System Architectures towards Fully Automated Driving. *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 304-309. <https://doi.org/10.1109/IVS.2016.7535402>
- Taubman-Ben-Ari, O., Mikulincer, M., & Gillath, O. (2004). The multidimensional driving style inventory—scale construct and validation. *Accident Analysis & Prevention*, 36(3), 323-332. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(03\)00010-1](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(03)00010-1)
- Taubman-Ben-Ari, O., & Skvirsky, V. (2016). The multidimensional driving style inventory a decade later : Review of the literature and re-evaluation of the scale. *Accident Analysis & Prevention*, 93, 179-188.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.04.038>
- Taubman-Ben-Ari, O., & Yehiel, D. (2012). Driving styles and their associations with personality and motivation. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 416-422.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.08.007>
- Taylor, S., & Todd, P. (1995). Assessing IT Usage : The Role of Prior Experience. *MIS Quarterly*, 19(4), 561-570. <https://doi.org/10.2307/249633>

- Techer, F., Bueno-Garcia, M., & Dogan, E. (2017). Evaluation of a Human Machine Interface of a Highly Automated Vehicle (Level 4) Operating in Urban Road Context - Protocol.
- Tesla. (2024). Autopilot and Full Self-Driving Capability | Tesla Support France.
- Thompson, R. L., Higgins, C. A., & Howell, J. M. (1991). Personal Computing : Toward a Conceptual Model of Utilization. *MIS Quarterly*, 15(1), 125-143.
<https://doi.org/10.2307/249443>
- Thüring, M., & Mahlke, S. (2007). Usability, aesthetics and emotions in human-technology interaction. *International Journal of Psychology*, 42(4), 253-264. <https://doi.org/10.1080/00207590701396674>
- Tomasevic, N., Young, K. L., Horberry, T., & Fildes, B. (2022). A Path towards Sustainable Vehicle Automation : Willingness to Engage in Level 3 Automated Driving. *Sustainability*, 14(8), 4602. <https://doi.org/10.3390/su14084602>
- Trésor de la Langue Française. (1994a). Usager - Trésor de La Langue Française Informatisé.
- Trésor de la Langue Française. (1994b). Utilisateur - Trésor de La Langue Française Informatisé.
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley.
- Turing, A. M. (1950). Computing Machinery and Intelligence. *Mind; a quarterly review of psychology and philosophy*, 59(236), 433-460.
<https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433>
- Unrein, H. (2023). *Évolution Des Systèmes Autonomes : De l'outil Au Coéquipier Dans Les Équipes HAT* [Theses]. Université de Bordeaux.
- Venkatesh, V., & Bala, H. (2008). Technology Acceptance Model 3 and a Research Agenda on Interventions. *Decision Sciences*, 39(2), 273-315.
<https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2008.00192.x>
- Venkatesh, V., Brown, S. A., & Bala, H. (2013). Bridging the Qualitative-Quantitative Divide : Guidelines for Conducting Mixed Methods Research in Information Systems. *MIS Quarterly*, 37(1), 21-54.
<https://doi.org/10.25300/MISQ/2013/37.1.02>
- Venkatesh, V., & Davis, F. D. (2000). A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model : Four Longitudinal Field Studies. *Management Science*, 46(2), 186-204. <https://doi.org/10.1287/mnsc.46.2.186.11926>
- Venkatesh, V., Morris, Davis, F. D., & Davis, F. D. (2003). User Acceptance of Information Technology : Toward a Unified View. *MIS Quarterly*, 27(3), 425.
<https://doi.org/10.2307/30036540>
- Venkatesh, V., Thong & Xu. (2012). Consumer Acceptance and Use of Information Technology : Extending the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology. *MIS Quarterly*, 36(1), 157. <https://doi.org/10.2307/41410412>
- Verberne, F. M. F., Ham, J., & Midden, C. J. H. (2015). Trusting a Virtual Driver That Looks, Acts, and Thinks Like You. *Human Factors : The Journal of the Human*

- Factors and Ergonomics Society*, 57(5), 895-909.
<https://doi.org/10.1177/0018720815580749>
- Vermersch, P. (1991). L'entretien d'explicitation. In *Les Cahiers de Beaumont* (p. 52-53, 63-70).
- Voß, G. M., Keck, C. M., & Schwalm, M. (2018). Investigation of drivers' thresholds of a subjectively accepted driving performance with a focus on automated driving. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 56, 280-292.
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.04.024>
- Walker, F., Wang, J., Martens, M., & Verwey, W. (2019). Gaze Behaviour and Electrodermal Activity : Objective Measures of Drivers' Trust in Automated Vehicles. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 64, 401-412. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.05.021>
- Waymo. (2024). Waymo - Self-Driving Cars - Autonomous Vehicles - Ride-Hail.
- Waytz, A., Heafner, J., & Epley, N. (2014). The Mind in the Machine : Anthropomorphism Increases Trust in an Autonomous Vehicle. *Journal of Experimental Social Psychology*, 52, 113-117.
<https://doi.org/10.1016/j.jesp.2014.01.005>
- Weber, H., Hiller, J., Eckstein, L., Metz, B., Landau, A., Lee, Y. M., Louw, T., Madigan, R., Merat, N., Lehtonen, E., Sintonen, H., Innamaa, S., Streubel, T., Pipkorn, L., Svanberg, E., van Weperen, M., Hogema, J., Bolovinou, A., Rigos, A., ... Zlocki, A. (2021, septembre). *L3Pilot Driving Automation - Pilot Evaluation Results* (rapp. tech.). L3Pilot consortium.
- Weingarten, E., Chen, Q., McAdams, M., Yi, J., Hepler, J., & Albarracin, D. (2016). On priming action : conclusions from a meta-analysis of the behavioral effects of incidentally-presented words. *Current Opinion in Psychology*, 12, 53-57.
<https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2016.04.015>
- Wicki, M., & Bernauer, T. (2018). Public Opinion on Route 12 : Interim Report on the First Survey on the Pilot Experiment of an Automated Bus Service in Neuhausen Am Rhein (IST Paper No. 3).
<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000282577>
- Wien, J. (2019). *An Assessment of the Willingness to Choose a Self-Driving Bus for an Urban Trip : A Public Transport User's Perspective* [thèse de doct., Delft University of Technology].
- Wilcoxon, F. (1945). Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin*, 1(6), 80. <https://doi.org/10.2307/3001968>
- Wills, M., El-Gayar, O., & Bennett, D. (2008). Examining Healthcare Professionals' Acceptance of Electronic Medical Records Using UTAUT. *Research & Publications*.
- Winfield, A. F. T., Booth, S., Dennis, L. A., Egawa, T., Hastie, H., Jacobs, N., Muttram, R. I., Olszewska, J. I., Rajabiyazdi, F., Theodorou, A., Underwood, M. A., Wortham, R. H., & Watson, E. (2021). IEEE P7001 : A Proposed Standard on

- Transparency. *Frontiers in Robotics and AI*, 8, 665729.
<https://doi.org/10.3389/frobt.2021.665729>
- Wintersberger, P., Frison, A.-K., Riener, A., & von Sawitzky, T. (2019). Fostering User Acceptance and Trust in Fully Automated Vehicles : Evaluating the Potential of Augmented Reality. *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, 27(1), 46-62. https://doi.org/10.1162/PRES_a_00320
- Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring Presence in Virtual Environments : A Presence Questionnaire. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3), 225-240. <https://doi.org/10.1162/1054746985656686>
- Wortham, R. H., Theodorou, A., & Bryson, J. J. (2017). Robot Transparency : Improving Understanding of Intelligent Behaviour for Designers and Users. In Y. Gao, S. Fallah, Y. Jin & C. Lekakou (éd.), *Towards Autonomous Robotic Systems* (p. 274-289, T. 10454). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-64107-2_22
- Yurtsever, E., Lambert, J., Carballo, A., & Takeda, K. (2020). A Survey of Autonomous Driving : *Common Practices and Emerging Technologies*. *IEEE Access*, 8, 58443-58469. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2983149>
- Zare, M., Bert, M., N. Larique, & Sagot, J. (2022). Le Véhicule Autonome : Un Mode de Transport Urbain Acceptable Pour Les Personnes En Situation de Handicap Moteur? *Actes Du 56ème Congrès de La SELF, Vulnérabilités et Risques Émergents : Penser et Agir Ensemble Pour Transformer Durablement*.
- Ziefle, M. Z., & Wilkowska, W. (2010). Technology acceptability for medical assistance. *Proceedings of the 4th International ICST Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare*.
<https://doi.org/10.4108/ICST.PERVASIVEHEALTH2010.8859>
- Ziegler, J., Bender, P., Schreiber, M., Lategahn, H., Strauss, T., Stiller, C., Thao Dang, Franke, U., Appenrodt, N., Keller, C. G., Kaus, E., Herrtwich, R. G., Rabe, C., Pfeiffer, D., Lindner, F., Stein, F., Erbs, F., Enzweiler, M., Knoppel, C., ... Zeeb, E. (2014). Making Bertha Drive—An Autonomous Journey on a Historic Route. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 6(2), 8-20.
<https://doi.org/10.1109/MITS.2014.2306552>
- Zou, X., O'Hern, S., Ens, B., Coxon, S., Mater, P., Chow, R., Neylan, M., & Vu, H. L. (2021). On-road virtual reality autonomous vehicle (VRAV) simulator : An empirical study on user experience. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 126, 103090. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103090>

Annexes

Annexe A

**Questionnaires utilisés dans plusieurs
expérimentations**

A.1 Questionnaire UTAUT

1. Un véhicule automatisé simplifiera mes déplacements quotidiens
 1 2 3 4 5
2. Un véhicule automatisé me permettra de me déplacer en toute sécurité.
 1 2 3 4 5
3. Un véhicule automatisé me fera gagner du temps.
 1 2 3 4 5
4. Un véhicule automatisé optimisera mes déplacements.
 1 2 3 4 5
5. Il me sera facile de prendre en main un véhicule automatisé.
 1 2 3 4 5
6. Apprendre à utiliser un véhicule automatisé sera facile pour moi.
 1 2 3 4 5
7. J'apprendrai rapidement à utiliser un véhicule automatisé.
 1 2 3 4 5
8. Je serai capable de maîtriser les fonctionnalités d'un véhicule automatisé.
 1 2 3 4 5
9. Mon entourage va me pousser à utiliser un véhicule automatisé.
 1 2 3 4 5
10. Mes proches utiliseront un véhicule automatisé.
 1 2 3 4 5
11. Les politiques inciteront les gens à utiliser un véhicule automatisé.
 1 2 3 4 5
12. Je serai capable de prendre en main un véhicule automatisé.
 1 2 3 4 5
13. Je serai capable de maîtriser un véhicule automatisé.
 1 2 3 4 5
14. J'aurai les compétences pour utiliser un véhicule automatisé.
 1 2 3 4 5
15. Les véhicules automatisés sont compatibles avec les autres technologies que j'utilise.
 1 2 3 4 5
16. Je peux être aidé si j'ai des difficultés dans mon utilisation des véhicules automatisés.
 1 2 3 4 5
17. Utiliser un véhicule automatisé sera une bonne idée.
 1 2 3 4 5

18. Un véhicule automatisé rendra mes déplacements agréables.
 1 2 3 4 5
19. Le déplacement à bord d'un véhicule automatisé sera plaisant.
 1 2 3 4 5
20. J'aimerais utiliser un véhicule automatisé.
 1 2 3 4 5
21. J'ai l'intention d'utiliser un véhicule automatisé dans les années à venir.
 1 2 3 4 5
22. Je pense me servir d'un véhicule automatisé dans les années à venir.
 1 2 3 4 5
23. Je projette d'utiliser un véhicule automatisé dans les années à venir.
 1 2 3 4 5

A.2 Questionnaire Driving Behavior Questionnaire (DBQ)

1. Vous vous rendez compte que vous roulez en 4ème alors que vous roulez à une allure suffisante pour être en 5ème
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
2. Vous ne remarquez pas que le feu de signalisation est passé au vert
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
3. Vous ajustez votre vitesse pour faciliter la tâche du conducteur qui vous double
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
4. Vous ne suivez pas la voiture devant vous de trop près afin de ne pas perturber le conducteur
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
5. Vous oubliez de desserrer le frein à main avant de démarrer
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
6. Vous démarrez en trombe quand le feu passe au vert pour laisser sur place le conducteur à côté de vous
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
7. Vous vous trompez en changeant de vitesse sur la route
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
8. En tournant à gauche, vous évaluez mal la distance entre vous et le véhicule arrivant en face, obligeant l'autre véhicule à freiner brusquement
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
9. Vous traversez un carrefour en sachant que le feu est déjà passé au rouge
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
10. Vous ne prenez pas en compte un nouveau panneau de signalisation parce que vous ne l'aviez pas remarqué avant
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
11. Vous évitez d'éclabousser les piétons ou les autres usagers quand vous rencontrez une flaqué d'eau
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
12. Vous vous mettez en colère contre un autre conducteur et vous le poursuivez pour lui faire savoir ce que vous pensez de lui
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
13. Lorsque vous doublez, vous sous-estimez la vitesse du véhicule arrivant en face
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
14. Vous doublez un conducteur plus lent par la droite
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)

15. Vous évaluez mal la distance entre vous et le véhicule arrivant en face et vous êtes obligé de vous rabattre très vite devant le véhicule que vous êtes en train de doubler
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
16. Vous prenez le volant même si vous pensez avoir dépassé le taux limite d'alcoolémie
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
17. Vous utilisez peu les feux de route afin de ne pas gêner les conducteurs arrivant en face
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
18. Vous ne remarquez pas la "flèche verte" vous autorisant à tourner à un feu
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
19. Vous restez dans une voie que vous savez fermée plus loin et vous attendez la dernière minute avant de forcer le passage pour rejoindre l'autre voie
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
20. Vous évaluez mal votre vitesse à la sortie d'une route principale et vous êtes obligé de freiner brusquement
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
21. Vous tournez à gauche sur une route principale devant un véhicule qui arrive et que vous n'avez pas vu ou dont vous avez mal estimé la vitesse
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
22. Vous cherchez à passer à la vitesse supérieure quand vous y êtes déjà
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
23. Vous vous rangez afin de ne pas bloquer une voiture qui arrive derrière vous
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
24. Vous lisez mal les panneaux de signalisation et vous vous perdez
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
25. Vous refusez la priorité à une intersection si bien que le conducteur prioritaire est obligé de s'arrêter et de vous laisser passer
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
26. Vous coupez trop les virages et, dans les zones rurales, vous vous retrouvez parfois à conduire dans la voie de gauche bien que votre distance de visibilité soit réduite
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
27. Vous voulez reculer et la voiture part vers l'avant parce que vous vous êtes trompé de vitesse
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
28. Vous tournez délibérément pour prendre une route principale juste devant un véhicule qui arrive alors qu'il n'y a aucun véhicule après lui

- 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
29. Vous ne klaxonnez pas afin d'éviter de faire du bruit
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
30. Vous ratez votre sortie sur l'autoroute, vous obligeant à faire un long détour
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
31. Pour vous garer, vous prenez en compte les autres utilisateurs de la route afin de ne pas gêner leur libre circulation
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
32. Vous conduisez tellement près de la voiture devant vous que vous auriez du mal à vous arrêter en cas d'urgence
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
33. Vous ne tenez pas compte de la limitation de vitesse sur une zone d'habitation
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
34. Vous évitez l'utilisation de la voie de gauche afin de faciliter la circulation
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
35. Vous vous mettez en colère contre un certain type de conducteur et vous lui montrez votre hostilité par tous les moyens disponibles
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
36. Vous klaxonnez pour montrer votre agacement à un autre conducteur
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
37. Vous ne tenez pas compte de la limitation de vitesse sur autoroute
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
38. Vous vous dirigez vers la destination A, et vous vous "réveillez" sur le chemin de la destination B, peut-être parce que vous êtes plus habitué à vous y rendre
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
39. Vous oubliez en quel rapport de vitesse vous roulez et vous devez vérifier avec votre main
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)
40. Vous laissez les piétons traverser, même si vous avez la priorité
 1 (jamais) 2 3 4 5 (tout le temps)

A.3 Questionnaire sur les cybermalaises

Consignes : Sélectionnez à quel point chaque symptôme ci-dessous vous affecte actuellement.

1. Inconfort
 Pas du tout Un peu Modérément Sévèrement
2. Fatigue
 Pas du tout Un peu Modérément Sévèrement
3. Mal de tête
 Pas du tout Un peu Modérément Sévèrement
4. Fatigue des yeux
 Pas du tout Un peu Modérément Sévèrement
5. Difficulté à faire le focus
 Pas du tout Un peu Modérément Sévèrement
6. Augmentation de la salivation
 Pas du tout Un peu Modérément Sévèrement
7. Transpiration
 Pas du tout Un peu Modérément Sévèrement
8. Nausées
 Pas du tout Un peu Modérément Sévèrement
9. Difficultés à se concentrer
 Pas du tout Un peu Modérément Sévèrement
10. Impression de lourdeur dans la tête
 Pas du tout Un peu Modérément Sévèrement
11. Vision embrouillée
 Pas du tout Un peu Modérément Sévèrement
12. Étourdissement les yeux ouverts
 Pas du tout Un peu Modérément Sévèrement
13. Étourdissement les yeux fermés
 Pas du tout Un peu Modérément Sévèrement
14. Vertiges (perte de l'orientation par rapport à la position verticale)
 Pas du tout Un peu Modérément Sévèrement
15. Conscience de l'estomac (Inconfort sans nausée)
 Pas du tout Un peu Modérément Sévèrement
16. Rots
 Pas du tout Un peu Modérément Sévèrement

Annexe B

**Expérimentation 1 : Étude des effets
du mode de conduite d'un véhicule
autonome sur l'acceptabilité**

B.1 Formulaire de consentement libre et éclairé



Formulaire de consentement

Responsable de l'étude (contact) : gabriel.nativel-fontaine@ensc.fr ;
veronique.lespinet@ensc.fr

Description de l'étude :

Titre : Étude de l'acceptabilité du véhicule autonome face à des situations conflictuelles

Objectif : Identifier les facteurs d'acceptabilité à prendre en compte lors de la conception des IHM et algorithmes des futurs véhicules autonomes

Protocole : Visualisation de courts extraits vidéo et questionnaires à remplir

Durée : 1 heure

Risques : Mal des transports / Cybersickness

Bénéfices : Participation à l'avancée scientifique dans le domaine du véhicule autonome

Destination des informations : Recherche scientifique

J'ai répondu au questionnaire relatif aux contre-indications de l'expérience, si nécessaire. J'ai noté que les données recueillies lors de cette recherche demeureront strictement confidentielles. J'accepte le traitement informatisé des données nominatives qui me concernent en conformité avec les dispositions de la loi n°2004-801 du 6 août 2004 relative à la protection des personnes et la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés. J'ai noté que je pourrai exercer mon droit d'accès et de rectification garanti par les articles 39 et 40 de cette loi en m'adressant auprès du responsable de l'étude.

J'ai pris connaissance de la description de l'étude. J'ai pu poser toutes les questions que je voulais, j'ai reçu des réponses claires et adaptées et j'ai pu disposer d'un temps de réflexion suffisant entre l'information et ma décision de participer à cette étude. Ma participation à cette étude est une décision qui m'appartient en toute liberté et j'ai été informé(e) de mon droit de refuser de participer à cette recherche et de retirer mon consentement à tout moment, sans avoir à me justifier, sans encourir aucune responsabilité ni aucun préjudice de ce fait.

J'ai bien noté que pour participer à cette recherche, je dois être affilié(e) à, ou bénéficier d'un régime de Sécurité Sociale. Je confirme que c'est bien le cas.

Compte tenu des informations qui m'ont été transmises, je soussigné(e) accepte librement et volontairement par la présente, conformément aux dispositions relatives du Code de la Santé Publique (articles L1121-1 et suivants) de participer cette étude.

Mon consentement ne décharge pas l'investigateur et le promoteur de leurs responsabilités à mon égard et je conserve tous mes droits garantis par la loi.

Fait à, le.....

Participant à l'étude (Nom Prénom Signature) :

Responsables de l'étude (Nom Prénom Signature) :

Fait en deux exemplaires : un exemplaire est remis à la personne, un exemplaire est conservé par l'investigateur.

B.2 Driving Behavior Survey (DBS)

Il arrive souvent que des situations se produisent pendant la conduite et qui rendent les gens nerveux (par exemple les conditions météorologiques, la circulation dense, les accidents évités de justesse, etc.). Vous trouverez ci-dessous une liste de comportements qui peuvent ou non vous concerner dans ces situations. Sur la base de votre expérience personnelle, veuillez indiquer la fréquence à laquelle vous adoptez chacun de ces comportements lorsqu'une situation de conduite stressante se produit et vous rend nerveux, anxieux, tendu ou mal à l'aise. Veuillez indiquer ce que vous faites généralement, et non pas ce que vous pensez que vous devriez faire.

1. Je ne sais plus où je vais (1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7
2. Je crie sur le ou les conducteurs qui me rendent nerveux (1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7
3. Je ralentis à l'approche des intersections, même lorsque le feu est vert
(1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7
4. J'ai du mal à rester dans la bonne voie (1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7
5. Je dévie sur les autres voies (1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7
6. J'oublie de faire les ajustements appropriés de la vitesse (1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7
7. Je fais savoir au conducteur qui m'a rendu nerveux que je suis contrarié
(1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7
8. Je maintiens une grande distance entre moi et le conducteur de devant
(1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7
9. J'oublie ma destination (1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7
10. Je fais des gestes envers le ou les conducteurs qui me rendent nerveux
(1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7
11. J'essaie de mettre de la distance entre moi et les autres voitures
(1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7
12. Je maintiens ma vitesse afin de me calmer (1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7

13. J'essaie de rester à l'écart des autres voitures (1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7
14. J'ai du mal à trouver la bonne voie (1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7
15. Je tape sur le volant quand je suis nerveux (1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7
16. Je diminue ma vitesse jusqu'à ce que je me sente à l'aise (1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7
17. Je klaxonne le conducteur qui me rend nerveux (1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7
18. J'essaie de trouver des moyens de faire savoir aux autres conducteurs qu'ils me rendent nerveux (1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7
19. Par mauvais temps, je conduis plus prudemment que les autres véhicules sur la route (1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7
20. Je jure/utilise des grossièretés pendant que je conduis (1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7
21. J'ai des difficultés à m'insérer dans la circulation (1=jamais|5=toujours)
 1 2 3 4 5 6 7

Sous-échelles :

- Déficits de performance basés sur l'anxiété : 1, 4, 5, 6, 9, 14, 21.
- Comportement de sécurité/prudence exagéré : 3, 8, 11, 12, 13, 16, 19.
- Comportements hostiles/agressifs : 2, 7, 10, 15, 17, 18, 20.

B.3 STAI-Y

Ce test permet d'évaluer le niveau d'anxiété sur les dernières semaines écoulées. Si vous le repassez dans quelques mois, il sera probablement différent : moins bon si la vie vous a amené plus de soucis, ou meilleur s'il y en a eu moins et/ou si votre démarche de développement personnel porte ses fruits. Ce test ne permet aucun diagnostic ni pronostic, que seul un professionnel de santé est autorisé à effectuer : il ne donne qu'une estimation ponctuelle. Un certain nombre de phrases que l'on utilise pour décrire son humeur sont données ci-dessous. Lisez chaque phrase, puis marquez d'une croix, dans les 4 colonnes à droite, ce qui correspond le mieux à ce que vous ressentez généralement. Il n'y a pas de bonnes ni de mauvaises réponses. Ne passez pas trop de temps sur l'une ou l'autre de ces propositions et indiquez la réponse qui décrit le mieux vos sentiments habituels.

1. Je me sens de bonne humeur, aimable (1)
 Non Plutôt non Plutôt oui Oui
2. Je me sens nerveux (nerveuse) et agité(e) (0)
 Non Plutôt non Plutôt oui Oui
3. Je me sens content(e) de moi (1)
 Non Plutôt non Plutôt oui Oui
4. J'aimerais me sentir aussi heureux(se) que les autres le paraissent (0)
 Non Plutôt non Plutôt oui Oui
5. J'ai un sentiment d'échec (0)
 Non Plutôt non Plutôt oui Oui
6. Je me sens reposé(e) (1)
 Non Plutôt non Plutôt oui Oui
7. J'ai tout mon sang-froid (1)
 Non Plutôt non Plutôt oui Oui
8. J'ai l'impression que les difficultés s'accroissent à un tel point que je ne peux plus les surmonter (0)
 Non Plutôt non Plutôt oui Oui
9. Je m'inquiète à propos de choses sans importance (0)
 Non Plutôt non Plutôt oui Oui
10. Je suis heureux(se) (1)
 Non Plutôt non Plutôt oui Oui
11. J'ai des pensées qui me perturbent (0)
 Non Plutôt non Plutôt oui Oui
12. Je manque de confiance en moi (0)
 Non Plutôt non Plutôt oui Oui

13. Je me sens sans inquiétude, en sécurité, en sûreté (1)
 Non Plutôt non Plutôt oui Oui
14. Je prends facilement des décisions (1)
 Non Plutôt non Plutôt oui Oui
15. Je me sens incompetent(e), pas à la hauteur (0)
 Non Plutôt non Plutôt oui Oui
16. Je suis satisfait(e) (1)
 Non Plutôt non Plutôt oui Oui
17. Des idées sans importance trottant dans ma tête me dérangent (0)
 Non Plutôt non Plutôt oui Oui
18. Je prends les déceptions à cœur : je les oublie difficilement (0)
 Non Plutôt non Plutôt oui Oui
19. Je suis une personne posée, solide, stable (1)
 Non Plutôt non Plutôt oui Oui
20. Je deviens tendu(e) et agité(e) quand je réfléchis à mes soucis (0)
 Non Plutôt non Plutôt oui Oui

Calcul du total :

- Pour les lignes indiquées par 1, la réponse “non” est cotée 4, “plutôt non” = 3, “plutôt oui” = 2 et “oui” = 1.
- Pour les lignes indiquées par 0, le “non” est coté 1, “plutôt non” = 2, “plutôt oui” = 3, “oui” = 4.

Interprétation :

- En dessous de 35 : Votre niveau d’anxiété est minimal, vous êtes de nature sereine ;
- De 36 à 45 : Votre niveau d’anxiété est faible ;
- De 46 à 55 : Votre niveau d’anxiété est modéré, il pourra être utile de le prendre en charge afin de vivre de façon plus détendue. Le manuel Relaxation et principes d’équilibre associé au manuel Confiance et apaisement vous seront certainement utiles ;
- De 56 à 65 : Votre niveau d’anxiété est élevé, important, et l’aide complémentaire d’un professionnel se révélera très utile afin de vous aider à progresser ou à traverser ce mauvais passage ;
- Au-dessus de 66 : Votre niveau d’anxiété est très élevé. Nous vous conseillons de consulter rapidement votre médecin traitant afin de chercher avec lui la meilleure solution pour passer ce cap. Il vous proposera peut-être une aide médicamenteuse temporaire ;

B.4 Acceptabilité

1. Le comportement du véhicule autonome dans cette situation vous a-t-il paru acceptable ?

1 2 3 4 5 6

2. Si vous avez répondu "pas acceptable" (entre 1 et 3 sur l'échelle) à la question précédente, veuillez expliquer ce qui vous a dérangé (réponse ouverte)

3. Indiquez les états émotionnels que la situation vous a fait ressentir

sérénité indifférence stress confiance surprise

panique peur ravissement ennui crainte enthousiasme

Annexe C

**Expérimentation 2 : Étude des
paramètres liés au comportement du
véhicule autonome**

C.1 Formulaire de consentement libre et éclairé (expérimentation préliminaire)



Description de l'étude

Responsable de l'étude: Gabriel Nativel-Fontaine (gabriel.nativel-fontaine@u-bordeaux.fr)

Durée de l'étude: 1 heure.

Description:

Nos travaux de recherche s'intéressent à la notion d'acceptabilité des véhicules autonomes en milieu urbain. L'objectif principal est d'observer le comportement des passagers d'un véhicule totalement autonome (niveau 5) dans certaines situations de conduite. Pour cela nous utilisons un environnement développé en 2D pour proposer des simulations.

Données recueillies:

Tout au long de l'expérience, nous recueillons des données issues de réponses à des questionnaires, des entretiens ainsi que des enregistrements audio. Ces données restent confidentielles et sont anonymisées dès leur enregistrement.

Liste exhaustive des données recueillies :

- Son
- Réponses aux questionnaires
- Réponses aux entretiens

Formulaire de consentement libre et éclairé

J'ai noté que les données recueillies lors de cette recherche demeureront strictement confidentielles.

J'accepte le traitement informatisé des données nominatives qui me concernent en conformité avec les dispositions de la loi n°2004-801 du 6 août 2004 relative à la protection des personnes et la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés.

J'ai noté que je pourrai exercer mon droit d'accès et de rectification garanti par les articles 39 et 40 de cette loi en m'adressant auprès du responsable de l'étude via l'adresse suivante : gabriel.nativel-fontaine@u-bordeaux.fr en lui fournissant mon numéro d'anonymat.

J'ai pris connaissance de la description de l'étude.

J'ai pu poser toutes les questions que je voulais, j'ai reçu des réponses claires et adaptées et j'ai pu disposer d'un temps de réflexion suffisant entre l'information et ma décision de participer à cette étude.

Ma participation à cette étude est une décision qui m'appartient en toute liberté et j'ai été informé(e) de mon droit de refuser de participer à cette recherche et de retirer mon consentement à tout moment, sans avoir à me justifier, sans encourir aucune responsabilité ni aucun préjudice de ce fait.

J'accepte que les données nominatives me concernant, recueillies à l'occasion de cette étude, puissent faire l'objet d'un traitement automatisé par les organisateurs de la recherche.

J'ai bien noté que pour participer à cette recherche, je dois être affilié(e) à, ou bénéficier d'un régime de Sécurité Sociale. Je confirme que c'est bien le cas.

Compte tenu des informations qui m'ont été transmises, je soussigné(e)

..... accepte librement et volontairement par la présente, conformément aux dispositions relatives du Code de la Santé Publique (articles L1121-1 et suivants) de participer à cette étude.

Mon consentement ne décharge pas l'investigateur et le promoteur de leurs responsabilités à mon égard et je conserve tous mes droits garantis par la loi.

Fait à (ville), le (date) à (heure)

Numéro d'anonymat:

Signature du participant

Signature de l'expérimentateur

C.2 Questionnaire démographique (expérimentation préliminaire)

1. Sexe

Homme Femme Autre Ne souhaite pas répondre

2. Date de naissance

3. Année du permis de conduire

4. Taille (en cm)

5. À quelle fréquence utilisez-vous la réalité virtuelle (1=jamais|5=Tout le temps)

1 2 3 4 5

C.3 Questionnaire de susceptibilité au cybermalaise (expérimentation préliminaire)

1. À quelle fréquence souffrez-vous de maux de tête ? (1=jamais|5=Tout le temps)
 1 2 3 4 5
2. A quelle fréquence souffrez-vous de troubles de l'estomac ? (1=jamais|5=Tout le temps)
 1 2 3 4 5
3. Avez-vous consommé de l'alcool lors des dernières 24 heures ?
 Oui Non
4. Avez-vous consommé des drogues lors des dernières 24 heures ?
 Oui Non
5. Avez-vous consommé des médicaments lors des dernières 24 heures ?
 Oui Non
6. Souffrez-vous d'une infection auriculaire (au niveau de l'oreille)?
 Oui Non
7. Souffrez-vous d'un trouble ou d'une maladie respiratoire ??
 Oui Non
8. Êtes-vous actuellement en manque de sommeil ?
 Oui Non
9. Souffrez-vous d'un trouble ou d'une maladie oculaire (au niveau des yeux)?
 Oui Non
10. Avez-vous été récemment équipés de nouvelles lunettes ?
 Oui Non
11. Avez-vous un trouble du système vestibulaire (équilibre, vertiges, nausées...)?
 Oui Non
12. Avez-vous un trouble du système oculomoteur ?
 Oui Non
13. Je suis malade en voiture en tant que passager sur la banquette arrière
(1=jamais|5=Tout le temps)
 1 2 3 4 5
14. Lire en tant que passager me rend malade (1=jamais|5=Tout le temps)
 1 2 3 4 5
15. Je suis malade en bateau (1=jamais|5=Tout le temps)
 1 2 3 4 5
16. Je suis malade sur de petits bateaux ou sur de petites embarcations
(1=jamais|5=tout le temps)
 1 2 3 4 5

17. Je suis malade en train (1=jamais|5=Tout le temps)
 1 2 3 4 5
18. Je suis malade en train lorsque je voyage dans le sens inverse de la marche
(1=jamais|5=tout le temps)
 1 2 3 4 5
19. Je suis malade en bus ou sur le siège passager en voiture (1=jamais|5=tout le temps)
 1 2 3 4 5
20. Je suis malade en bus lorsque je voyage dans le sens inverse de la marche
(1=jamais|5=tout le temps)
 1 2 3 4 5
21. Je suis malade lorsque je prends l'avion (1=jamais|5=tout le temps)
 1 2 3 4 5
22. Je suis malade sur les chaises à dossier pivotant (1=jamais|5=tout le temps)
 1 2 3 4 5
23. Je suis malade dans les attractions (1=jamais|5=tout le temps)
 1 2 3 4 5
24. Je suis malade lorsque je fais de la balançoire (1=jamais|5=tout le temps)
 1 2 3 4 5

C.4 Questionnaire d'acceptabilité (expérimentation préliminaire)

1. Je me suis senti en sécurité dans le véhicule
 1 2 3 4 5
2. J'ai eu confiance dans les décisions prises par le véhicule
 1 2 3 4 5
3. J'ai trouvé le comportement du véhicule efficace
 1 2 3 4 5
4. Le déplacement à bord d'un véhicule autonome était plaisant
 1 2 3 4 5
5. Je serai capable de prendre en main un véhicule autonome
 1 2 3 4 5
6. Apprendre à utiliser un véhicule autonome sera facile pour moi
 1 2 3 4 5
7. J'ai l'intention d'utiliser un véhicule autonome dans les années à venir
 1 2 3 4 5
8. Les aspects visuels de l'environnement m'ont invité à m'y impliquer
 1 2 3 4 5
9. La sensation de déplacement à l'intérieur de l'environnement virtuel m'a semblé réaliste
 1 2 3 4 5
10. J'étais impliqué dans l'expérience vécue dans l'environnement virtuel
 1 2 3 4 5
11. Le temps m'a semblé s'écouler de façon différente que d'habitude
 1 2 3 4 5
12. J'ai eu l'impression que le temps est passé rapidement
 1 2 3 4 5
13. J'ai perdu ma notion habituelle du temps
 1 2 3 4 5

C.5 Formulaire de consentement libre et éclairé (expérimentation principale)



Description de l'étude

Responsable de l'étude: Gabriel Nativel-Fontaine (gabriel.nativel-fontaine@u-bordeaux.fr)

Durée de l'étude: 1 heure.

Description:

Nos travaux de recherche s'intéressent à la notion d'acceptabilité des véhicules autonomes en milieux urbains. L'objectif principal est d'observer le comportement des passagers d'un véhicule totalement autonome (niveau 5) dans certaines situations de conduite. Pour cela nous utilisons un environnement développé en 2D pour proposer des simulations.

Données recueillies:

Tout au long de l'expérience, nous recueillons des données issues de réponses à des questionnaires, des entretiens ainsi que des enregistrements audio. Ces données restent confidentielles et sont anonymisées dès leur enregistrement.

Liste exhaustive des données recueillies :

- Son
- Réponses aux questionnaires
- Réponses aux entretiens

Formulaire de consentement libre et éclairé

J'ai noté que les données recueillies lors de cette recherche demeureront strictement confidentielles.

J'accepte le traitement informatisé des données nominatives qui me concernent en conformité avec les dispositions de la loi n°2004-801 du 6 août 2004 relative à la protection des personnes et la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés.

J'ai noté que je pourrai exercer mon droit d'accès et de rectification garanti par les articles 39 et 40 de cette loi en m'adressant auprès du responsable de l'étude via l'adresse suivante : gabriel.nativel-fontaine@u-bordeaux.fr en lui fournissant mon numéro d'anonymat.

J'ai pris connaissance de la description de l'étude.

J'ai pu poser toutes les questions que je voulais, j'ai reçu des réponses claires et adaptées et j'ai pu disposer d'un temps de réflexion suffisant entre l'information et ma décision de participer à cette étude.

Ma participation à cette étude est une décision qui m'appartient en toute liberté et j'ai été informé(e) de mon droit de refuser de participer à cette recherche et de retirer mon consentement à tout moment, sans avoir à me justifier, sans encourir aucune responsabilité ni aucun préjudice de ce fait.

J'accepte que les données nominatives me concernant, recueillies à l'occasion de cette étude, puissent faire l'objet d'un traitement automatisé par les organisateurs de la recherche.

J'ai bien noté que pour participer à cette recherche, je dois être affilié(e) à, ou bénéficier d'un régime de Sécurité Sociale. Je confirme que c'est bien le cas.

Compte tenu des informations qui m'ont été transmises, je soussigné(e)

..... accepte librement et volontairement par la présente, conformément aux dispositions relatives du Code de la Santé Publique (articles L1121-1 et suivants) de participer à cette étude.

Mon consentement ne décharge pas l'investigateur et le promoteur de leurs responsabilités à mon égard et je conserve tous mes droits garantis par la loi.

Fait à (ville), le (date) à (heure)

Numéro d'anonymat:

Signature du participant

Signature de l'expérimentateur

C.6 Questionnaire Démographique

1. Quel est votre sexe?
 Homme Femme Autre Ne souhaite pas répondre
2. Quelle est votre année de naissance?

3. À quelle fréquence utilisez-vous la réalité virtuelle (1=jamais|5=tout le temps)
 1 2 3 4 5
4. A quel point êtes vous familier avec les véhicules autonomes? (1=pas du tout|5=totalement)
 1 2 3 4 5
5. A quelle fréquence suivez-vous l'évolution de l'automatisation des véhicules?
(1=jamais|5=tout le temps)
 1 2 3 4 5
6. A quelle fréquence utilisez-vous un véhicule en tant que conducteur?
(1=jamais|5=tout le temps)
 1 2 3 4 5
7. A quelle fréquence utilisez-vous un véhicule en tant que passager (hors transports en commun)? (1=jamais|5=tout le temps)
 1 2 3 4 5
8. Si vous êtes titulaire d'un permis B, en quelle année l'avez-vous passé?

9. Si vous êtes titulaire d'un permis A, en quelle année l'avez-vous passé?

10. Si vous êtes titulaire d'un permis C, en quelle année l'avez-vous passé?

11. Si vous êtes titulaire d'un permis D, en quelle année l'avez-vous passé?

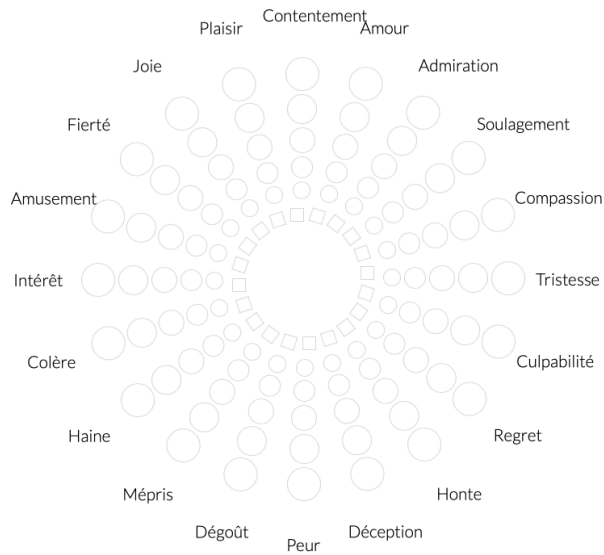
12. Quel est votre sexe?
 Oui Non
13. Quel est votre sexe?
 Oui Non

C.7 Échelle de stress perçu (PSS)

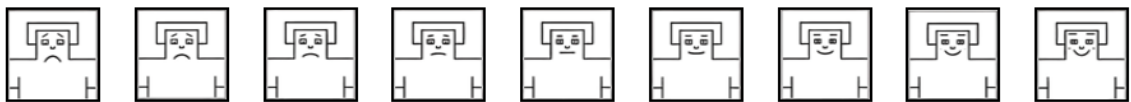
1. Au cours du dernier mois, à quelle fréquence avez-vous été bouleversé à cause d'un événement inattendu ?
 Jamais Presque jamais Parfois Assez souvent Souvent
2. Au cours du dernier mois, combien de fois avez-vous eu l'impression de ne pas pouvoir contrôler les choses importantes de votre vie ?
 Jamais Presque jamais Parfois Assez souvent Souvent
3. Au cours du dernier mois, à quelle fréquence vous êtes-vous senti nerveux et stressé ?
 Jamais Presque jamais Parfois Assez souvent Souvent
4. Au cours du dernier mois, à quelle fréquence vous êtes-vous senti confiant quant à votre capacité à gérer vos problèmes personnels ?
 Jamais Presque jamais Parfois Assez souvent Souvent
5. Au cours du dernier mois, à quelle fréquence avez-vous senti que les choses allaient dans votre sens ?
 Jamais Presque jamais Parfois Assez souvent Souvent
6. Au cours du dernier mois, combien de fois avez-vous constaté que vous ne pouviez pas faire face à toutes les choses que vous deviez faire ?
 Jamais Presque jamais Parfois Assez souvent Souvent
7. Au cours du dernier mois, à quelle fréquence avez-vous pu contrôler les irritations dans votre vie ?
 Jamais Presque jamais Parfois Assez souvent Souvent
8. Au cours du dernier mois, à quelle fréquence avez-vous senti que vous étiez au courant des choses ?
 Jamais Presque jamais Parfois Assez souvent Souvent
9. Au cours du dernier mois, à quelle fréquence avez-vous été irrité à cause de choses qui se sont déroulées hors de votre contrôle ?
 Jamais Presque jamais Parfois Assez souvent Souvent
10. Au cours du dernier mois, à quelle fréquence avez-vous senti que les difficultés s'accumulaient si haut que vous ne pouviez pas les surmonter ?
 Jamais Presque jamais Parfois Assez souvent Souvent

C.8 Questionnaire d'acceptabilité

1. Je me suis senti en sécurité dans le véhicule
 1 2 3 4 5
2. J'ai eu confiance dans les décisions prises par le véhicule
 1 2 3 4 5
3. J'ai trouvé le comportement du véhicule efficace
 1 2 3 4 5
4. Le déplacement à bord d'un véhicule autonome était plaisant
 1 2 3 4 5
5. Je serai capable de prendre en main un véhicule autonome
 1 2 3 4 5
6. Apprendre à utiliser un véhicule autonome sera facile pour moi
 1 2 3 4 5
7. J'ai l'intention d'utiliser un véhicule autonome dans les années à venir
 1 2 3 4 5
8. Les aspects visuels de l'environnement m'ont invité à m'y impliquer
 1 2 3 4 5
9. La sensation de déplacement à l'intérieur de l'environnement virtuel m'a semblé réaliste
 1 2 3 4 5
10. J'étais impliqué dans l'expérience vécue dans l'environnement virtuel
 1 2 3 4 5
11. Le temps m'a semblé s'écouler de façon différente que d'habitude
 1 2 3 4 5
12. J'ai eu l'impression que le temps est passé rapidement
 1 2 3 4 5
13. J'ai perdu ma notion habituelle du temps
 1 2 3 4 5
14. Sur chacune des deux échelles, sélectionnez le personnage dont l'expression correspond le plus à ce que vous auriez ressenti dans cette situation



15. Veuillez décrire ce que vous pensez que vous auriez ressenti dans cette situation en évaluant l'intensité de TOUTES les émotions dans la roue, même si certaines de ces intensités sont très basses. Si certaines émotions n'étaient pas du tout incluses dans votre réaction, veuillez cocher le petit carré à la base du rayon correspondant (sous le plus petit cercle).



Annexe D

IHM - Acceptabilité et explicabilité

D.1 Formulaire de consentement libre et éclairé



Description de l'étude

Responsable de l'étude: Gabriel Nativel-Fontaine (gabriel.nativel-fontaine@u-bordeaux.fr)

Durée de l'étude: 1 heure.

Description:

Nos travaux de recherche s'intéressent à la notion d'acceptabilité des véhicules autonomes en milieux urbains. L'objectif principal est d'observer le comportement des passagers d'un véhicule totalement autonome (niveau 5) dans certaines situations de conduite. Pour cela nous utilisons un environnement développé en 2D pour proposer des simulations.

Données recueillies:

Tout au long de l'expérience, nous recueillons des données issues de réponses à des questionnaires, des entretiens ainsi que des enregistrements audio. Ces données restent confidentielles et sont anonymisées dès leur enregistrement.

Liste exhaustive des données recueillies :

- Son
- Réponses aux questionnaires
- Réponses aux entretiens

Formulaire de consentement libre et éclairé

J'ai noté que les données recueillies lors de cette recherche demeureront strictement confidentielles.

J'accepte le traitement informatisé des données nominatives qui me concernent en conformité avec les dispositions de la loi n°2004-801 du 6 août 2004 relative à la protection des personnes et la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés.

J'ai noté que je pourrai exercer mon droit d'accès et de rectification garanti par les articles 39 et 40 de cette loi en m'adressant auprès du responsable de l'étude via l'adresse suivante : gabriel.nativel-fontaine@u-bordeaux.fr en lui fournissant mon numéro d'anonymat.

J'ai pris connaissance de la description de l'étude.

J'ai pu poser toutes les questions que je voulais, j'ai reçu des réponses claires et adaptées et j'ai pu disposer d'un temps de réflexion suffisant entre l'information et ma décision de participer à cette étude.

Ma participation à cette étude est une décision qui m'appartient en toute liberté et j'ai été informé(e) de mon droit de refuser de participer à cette recherche et de retirer mon consentement à tout moment, sans avoir à me justifier, sans encourir aucune responsabilité ni aucun préjudice de ce fait.

J'accepte que les données nominatives me concernant, recueillies à l'occasion de cette étude, puissent faire l'objet d'un traitement automatisé par les organisateurs de la recherche.

J'ai bien noté que pour participer à cette recherche, je dois être affilié(e) à, ou bénéficier d'un régime de Sécurité Sociale. Je confirme que c'est bien le cas.

Compte tenu des informations qui m'ont été transmises, je soussigné(e)

..... accepte librement et volontairement par la présente, conformément aux dispositions relatives du Code de la Santé Publique (articles L1121-1 et suivants) de participer à cette étude.

Mon consentement ne décharge pas l'investigateur et le promoteur de leurs responsabilités à mon égard et je conserve tous mes droits garantis par la loi.

Fait à (ville), le (date) à (heure)

Signature du participant

Signature de l'expérimentateur

D.2 Questionnaire démographique

1. Quel est votre sexe

Homme Femme Autre Ne souhaite pas répondre

2. Date de naissance

3. Si vous êtes titulaire d'un permis B, en quelle année l'avez-vous passé ?

4. Si vous êtes titulaire du Code de la route, en quelle année l'avez-vous passé ?

5. Si vous êtes titulaire d'un BSSR/permis 50, en quelle année l'avez-vous passé ?

6. Avez-vous déjà participé à une expérience concernant les voitures autonomes ?

7. Comment définiriez-vous une voiture autonome ?

D.3 Questionnaire d'explicabilité et d'acceptabilité

1. Le déplacement à bord d'un véhicule autonome était plaisant
 1 2 3 4 5
2. J'aimerais utiliser un véhicule automatisé dans cette situation.
 1 2 3 4 5
3. Je me suis senti en sécurité dans le véhicule automatisé dans cette situation.
 1 2 3 4 5
4. Le véhicule automatisé me permettra de me déplacer en toute sécurité dans cette situation.
 1 2 3 4 5
5. J'ai eu confiance dans les décisions prises par le véhicule automatisé dans cette situation.
 1 2 3 4 5
6. Plutôt que de superviser la conduite, je pourrais faire autre chose en toute confiance dans un véhicule automatisé dans cette situation.
 1 2 3 4 5
7. J'ai confiance dans la capacité du véhicule automatisé pour gérer cette situation.
 1 2 3 4 5
8. Je me sentirai en mesure de monter à bord d'un véhicule automatisé avec mes proches dans cette situation.
 1 2 3 4 5
9. Le véhicule automatisé me fait gagner du temps dans cette situation.
 1 2 3 4 5
10. Le déplacement du véhicule automatisé est optimisé dans cette situation.
 1 2 3 4 5
11. J'ai trouvé cette situation acceptable au regard de la norme sociale.
 1 2 3 4 5
12. J'ai trouvé cette situation acceptable au regard du Code de la route.
 1 2 3 4 5
13. J'ai trouvé cette situation acceptable au regard de ce que j'aurais fait.
 1 2 3 4 5
14. Grâce à l'explication, je sais comment fonctionne le système.
 1 2 3 4 5
15. Cette explication du fonctionnement du système était satisfaisante.
 1 2 3 4 5
16. Cette explication du fonctionnement du système était suffisamment détaillée.
 1 2 3 4 5

17. Cette explication du fonctionnement du système m'a semblé complète.
 1 2 3 4 5
18. Cette explication du fonctionnement du système m'a montré à quel point le système est précis et fiable.
 1 2 3 4 5
19. L'explication m'a permis de savoir si le système est digne de confiance.
 1 2 3 4 5

Annexe E

IHM - Acceptabilité et transparence

E.1 Formulaire de consentement libre et éclairé



Description de l'étude

Responsable de l'étude: Gabriel Nativel-Fontaine (gabriel.nativel-fontaine@u-bordeaux.fr)

Expérimentateur: Timothé GAURON

Durée de l'étude: 45 minutes.

Description:

Nos travaux de recherche s'intéressent à la notion d'acceptabilité des véhicules autonomes en milieu urbain. L'objectif principal est d'observer le comportement des passagers d'un véhicule totalement autonome (niveau 5) dans certaines situations de conduite. Pour cela nous utilisons un environnement développé en 3D pour proposer des simulations.

Données recueillies:

Tout au long de l'expérience, nous recueillons des données issues de réponses à des questionnaires ainsi que des entretiens. Ces données restent confidentielles, sont anonymisées dès leur enregistrement et ne seront utilisées que dans le cadre de cette expérimentation.

Liste exhaustive des données recueillies :

- Réponses aux questionnaires
- Réponses aux entretiens

Formulaire de consentement libre et éclairé

J'ai noté que les données recueillies lors de cette recherche demeureront strictement confidentielles.

J'accepte le traitement informatisé des données nominatives qui me concernent en conformité avec les dispositions de la loi n°2004-801 du 6 août 2004 relative à la protection des personnes et la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés.

J'ai noté que je pourrai exercer mon droit d'accès et de rectification garanti par les articles 39 et 40 de cette loi en m'adressant auprès du responsable de l'étude via l'adresse suivante : gabriel.nativel-fontaine@u-bordeaux.fr en lui fournissant mon numéro d'anonymat.

J'ai pris connaissance de la description de l'étude.

J'ai pu poser toutes les questions que je voulais, j'ai reçu des réponses claires et adaptées et j'ai pu disposer d'un temps de réflexion suffisant entre l'information et ma décision de participer à cette étude.

Ma participation à cette étude est une décision qui m'appartient en toute liberté et j'ai été informé(e) de mon droit de refuser de participer à cette recherche et de retirer mon consentement à tout moment, sans avoir à me justifier, sans encourir aucune responsabilité ni aucun préjudice de ce fait.

J'accepte que les données nominatives me concernant, recueillies à l'occasion de cette étude, puissent faire l'objet d'un traitement automatisé par les organisateurs de la recherche.

J'ai bien noté que pour participer à cette recherche, je dois être affilié(e) à, ou bénéficier d'un régime de Sécurité Sociale. Je confirme que c'est bien le cas.

Compte tenu des informations qui m'ont été transmises, je soussigné(e)

..... accepte librement et volontairement par la présente, conformément aux dispositions relatives du Code de la Santé Publique (articles L1121-1 et suivants) de participer à cette étude.

Mon consentement ne décharge pas l'investigateur et le promoteur de leurs responsabilités à mon égard et je conserve tous mes droits garantis par la loi.

Fait à (ville), le (date) à (heure)

Signature du participant

Signature de l'expérimentateur

E.2 Questionnaire démographique

1. À quel genre vous identifiez-vous ?

- Homme Femme Autre Ne souhaite pas répondre

2. Date de naissance

3. Si vous êtes titulaire d'un permis B, en quelle année l'avez-vous passé ?

4. Si vous êtes titulaire du Code de la route, en quelle année l'avez-vous passé ?

5. Si vous êtes titulaire d'un BSSR/permis 50, en quelle année l'avez-vous passé ?

6. Avez-vous déjà participé à une expérience concernant les voitures autonomes ?

- Oui Non

7. Si oui, avez vous participé à une expérience en rapport avec la thèse de Gabriel Nativel-Fontaine ?

- Oui Non

8. Combien de temps passez-vous à conduire par an ?

- Moins d'une heure Moins de 12h Moins de 48h Moins de 365h
 Plus de 365h

E.3 Questionnaire d'acceptabilité

1. Le déplacement à bord d'un véhicule autonome était plaisant
 1 2 3 4 5
2. J'aimerais utiliser un véhicule automatisé dans cette situation.
 1 2 3 4 5
3. Je me suis senti en sécurité dans le véhicule automatisé dans cette situation.
 1 2 3 4 5
4. Le véhicule automatisé me permettra de me déplacer en toute sécurité dans cette situation.
 1 2 3 4 5
5. J'ai eu confiance dans les décisions prises par le véhicule automatisé dans cette situation.
 1 2 3 4 5
6. Plutôt que de superviser la conduite, je pourrais faire autre chose en toute confiance dans un véhicule automatisé dans cette situation.
 1 2 3 4 5
7. J'ai confiance dans la capacité du véhicule automatisé pour gérer cette situation.
 1 2 3 4 5
8. Je me sentirai en mesure de monter à bord d'un véhicule automatisé avec mes proches dans cette situation.
 1 2 3 4 5
9. Le véhicule automatisé me fait gagner du temps dans cette situation.
 1 2 3 4 5
10. Le déplacement du véhicule automatisé est optimisé dans cette situation.
 1 2 3 4 5
11. J'ai trouvé cette situation acceptable au regard de la norme sociale.
 1 2 3 4 5
12. J'ai trouvé cette situation acceptable au regard du code de la route.
 1 2 3 4 5
13. J'ai trouvé cette situation acceptable au regard de ce que j'aurais fait.
 1 2 3 4 5