



HAL
open science

Assistant virtuel anthropomorphique pour la confiance dans la conduite automatisée

Clarisse Lawson-Guidigbe

► **To cite this version:**

Clarisse Lawson-Guidigbe. Assistant virtuel anthropomorphique pour la confiance dans la conduite automatisée. Automatique. Université de Bordeaux, 2022. Français. NNT : 2022BORD0189 . tel-03783465

HAL Id: tel-03783465

<https://theses.hal.science/tel-03783465>

Submitted on 22 Sep 2022

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

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

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR
SPÉCIALITÉ COGNITIVE

Par Clarisse LAWSON-GUIDIGBE

ASSISTANT VIRTUEL ANTHROPOMORPHIQUE POUR LA CONFIANCE
DANS LA CONDUITE AUTOMATISÉE

Sous la direction de : Jean-Marc ANDRE

Co-directeur : Benoit Leblanc et Nicolas Louveton

Soutenue le 08/06/2022

Membres du jury :

SEMAL Catherine	Professeur	Bordeaux INP	Président du Jury
NELSON, Julien	Maître de conférence	Université Paris Descartes	Rapporteur
LOURDEAUX, Domitille	Maître de conférence	Université de Technologie de Compiègne	Rapporteur
AMOKRANE-FERKA, Kahina	Ingénieur de recherche	IRT SystemX	Examineur
LEBLANC, Benoit	Professeur	Bordeaux INP	Examineur
LOUVETON Nicolas	Maître de conférence	Université de Poitiers	Invité
ANDRE, Jean-Marc	Professeur	Bordeaux INP	Directeur de thèse

ASSISTANT VIRTUEL ANTHROPOMORPHIQUE POUR LA CONFIANCE DANS LA CONDUITE AUTOMATISÉE

RESUME

Ce travail de thèse a été consacré à l'exploration de l'usage de deux technologies qui vont à terme transformer notre quotidien : les assistants virtuels et la voiture autonome.

Les assistants virtuels ont déjà une place importante dans nos vies et sont en train de révolutionner notre façon d'interagir avec les systèmes en nous proposant une interaction vocale. Nous pouvons désormais, par une simple phrase, obtenir des informations sur la météo ou mettre de la musique. Les voitures autonomes pour leur part, bien qu'elles ne soient pas encore accessibles au public, portent la promesse d'améliorer le confort de la conduite, de réduire les accidents et de fluidifier la circulation sur les routes. Cependant, l'adoption d'une telle technologie nécessite de la confiance de la part des utilisateurs. Il semble que les assistants virtuels, par la nature même de leur interface anthropomorphique, puissent jouer un rôle dans ce contexte. Nous explorons donc le potentiel des assistants virtuels pour augmenter la confiance dans la conduite autonome.

Les questions principales abordées dans ce travail concernent d'une part les choix adaptés pour concevoir un assistant virtuel afin que celui-ci soit perçu comme anthropomorphique et digne de confiance. D'autre part, elles concernent l'impact que peut avoir une telle interface dans un cockpit de véhicule autonome sur la perception d'anthropomorphisme et la confiance des utilisateurs. Pour répondre à ces questions, nous avons, dans un premier temps, choisi l'apparence visuelle de l'assistant en évaluant l'impact de différentes représentations visuelles sur la perception d'anthropomorphisme et de confiance. Notre choix s'est porté sur une représentation de type Automate-Humain. Puis, nous avons implémenté cette représentation en trois dimensions et intégré le résultat dans un simulateur de conduite sous la forme d'un hologramme. Pour évaluer l'assistant virtuel, nous avons conduit une expérimentation pour comparer une interface de référence sans assistant virtuel avec deux interfaces intégrant deux versions de l'assistant virtuel. Les résultats montrent que la perception d'anthropomorphisme ne s'accroît pas avec le niveau d'anthropomorphisme. Une corrélation significative vient confirmer l'impact de la perception d'anthropomorphisme sur la confiance. D'autres résultats plus surprenant concernant l'impact de l'assistant virtuel sur la performance ou encore l'impact de l'expérience acquise sur la confiance sont discutés.

Mots clés : Assistant virtuel ; Voiture autonome ; Anthropomorphisme ; Confiance.

ANTHROPOMORPHIC VIRTUAL ASSISTANT FOR TRUST IN AUTOMATED DRIVING

ABSTRACT

This thesis work was devoted to exploring the usage of two technologies that will eventually transform our daily lives: virtual assistants and autonomous cars.

Virtual assistants already have an important place in our lives and are revolutionizing the way we interact with systems through voice interaction. With a simple sentence, a virtual assistant can get us information about the weather or play music. Autonomous cars, although not yet available to the public, hold the promise of improving driving comfort, reducing accidents, and improving traffic flow on the roads. However, the adoption of such technology requires trust from users. It seems that virtual assistants, by the very nature of their anthropomorphic interface, can play a role in this context. We therefore explore the potential of virtual assistants to increase trust in autonomous driving.

The main questions addressed in this work concern, on one hand, the design choices for a virtual assistant so that it is perceived as anthropomorphic and trustworthy. On the other hand, we address the impact that such an interface can have on the perception of anthropomorphism and user trust when included in an autonomous car HMI. To answer these questions, we first chose the visual appearance of the assistant by evaluating the impact of different visual representations on the perception of anthropomorphism and trust. We chose a Mechanical-Human representation. Then, we implemented this representation in three dimensions and integrated the result in a driving simulator as a hologram. To evaluate the virtual assistant, we conducted an experiment which compared a baseline interface without virtual assistant with two interfaces integrating two versions of the virtual assistant. The results show that the perception of anthropomorphism does not increase with the level of anthropomorphism. A significant correlation confirms the impact of perceived anthropomorphism on trust. More surprising results concerning the influence of the virtual assistant on users' performance or the impact of acquired experience on trust are discussed.

Keywords: Virtual assistant; Autonomous Vehicle; Trust; Anthropomorphism.

Équipe Cognitive et Ingénierie Humaine

Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système

IMS – UMR CNRS 5218

Université de Bordeaux, ENSC-Bordeaux INP, 109 Avenue Roul, 33405 Talence.

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été pour moi une expérience aussi « challengeante » qu'enrichissante. Je veux remercier ici toutes les personnes sans qui je n'aurais pas mené cette tâche à son terme. Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse, Jean-Marc ANDRÉ pour sa patience, sa disponibilité et son pragmatisme. Plus qu'un directeur de thèse, il a été un vrai soutien et une source d'inspiration. Je remercie toute mon équipe d'encadrement qui a su m'accompagner et me guider dans mes choix tout au long de ce travail. Nicolas LOUVETON pour sa patience, sa rigueur et ses conseils. Kahina AMOKRANE FERKA pour son dévouement, sa présence et sa bienveillance. Je remercie Benoit Le Blanc d'avoir accepté d'encadrer ce travail. Je tiens également à remercier Domitile LOURDEAUX et Julien NELSON de me faire l'honneur de rapporter ma thèse. Je remercie l'IRT SystemX pour l'opportunité et la confiance qu'ils m'ont fait tout au long de ces trois années de thèse. Mention spéciale à Kristina PUZOVIC pour la bonne humeur, à Joanna Bussière pour sa bienveillance, Patrice AKNIN et Georges HEBRAIL pour leurs conseils. Je remercie également toute l'équipe du projet CMI. Sabine Langlois pour son intérêt et ses conseils, Virgil Rousseaux pour la bonne humeur et la bonne ambiance, Nicolas BRICE pour sa disponibilité tout au long du projet ainsi que tous les développeurs et designers ayant contribué à ce projet. Je remercie tout particulièrement Wissal Sahel, Martin Filosa, Hippolyte Caubet pour le travail accompli durant les missions de stage et de PFE qui leur ont été confiées dans le cadre de cette thèse. L'assistant virtuel Antoine n'aurait pas vu le jour sans eux. Je remercie toute la communauté de doctorants à SystemX, notamment les membres de l'association DOCSX. Votre présence, votre bonne humeur et votre soutien m'ont permis de traverser ces années de thèse (et de confinement) avec beaucoup plus d'aisance et d'espoir. Je remercie également les doctorants de l'équipe CIH Bordeaux. Malgré la rareté des moments que nous avons pu partager, votre accueil chaleureux, votre soutien et votre bonne humeur m'ont donné du courage. Je remercie mes parents pour leur soutien et leurs encouragements malgré la distance. Je remercie mes amis pour les moments de fous rires et de partage qui ont rendu cette expérience plus légère. Enfin, j'aimerais me remercier... pour avoir tenu jusqu'au bout, pour la résilience et l'attachement à faire de mon mieux chaque jour.

TABLE DES MATIERES

Introduction Generale	13
PARTIE I : CONTEXTE THÉORIQUE	15
Chapitre 1 : Introduction	16
I. Contexte	16
II. Objectifs et Contributions	17
III. Domaine de la recherche	18
IV. Publications	23
Chapitre 2: Etat de l'art	23
I. Les véhicules automatisés	24
II. La Confiance	26
1. Définition	27
2. Confiance Homme-Machine	28
2.1 Modèles de la confiance Humain-Machine.	29
2.2 Confiance dans la conduite automatisée	36
2.3 Mesures de la confiance.	38
3. L' Anthropomorphisme	41
3.1 Définition	41
3.2 Design anthropomorphique et conduite automatisée.	42
III. Les assistants virtuels	46
1. Définition	46
2. Assistants virtuels dans l'industrie automobile	48
3. Perception et interactions	50
3.1 Représentation visuelle d'un agent virtuel	52
3.2 Communication verbale et non verbale d'un agent virtuel	58
IV. Résumé de l'état de l'art	60
PARTIE II : APPROCHE EXPERIMENTALE	62
INTRODUCTION	63
Chapitre 3 : Représentation visuelle d'un assistant virtuel	63
I. Introduction	64
Clarisse Lawson-G	p. 7

II. Principe de l'expérimentation	65
III. Protocole expérimental	67
1. Participants	67
2. Matériel	67
2.1 Procédure du tri d'images	68
2.1.1 Matériel	69
2.1.2 Participants	70
2.1.3 Déroulement du tri d'images	70
2.1.4 Résultats du tri d'images	72
Conclusion	72
3. Procédure du questionnaire	72
IV. Résultats	75
V. Discussion et Conclusion	81
Chapitre 4 : Conception, implémentation et intégration de l'assistant virtuel	83
I. Conception du personnage de l'assistant virtuel	84
1- Définition du rôle de l'assistant virtuel	84
2 - Cas d'usage	84
3 - Messages vocaux associés	86
4 - Animations associées	88
II. Modélisation	90
1. Première modélisation de l'assistant virtuel	90
2. Seconde modélisation de l'assistant virtuel	93
III. Animation	96
Animation du buste de l'assistant virtuel	96
Animation du visage de l'assistant virtuel	98
IV. Intégration au cockpit de simulation du projet CMI	100
1. Intégration Hardware	100
2. Intégration Software	101
Conclusion	103
Chapitre 5 : Evaluation de l'assistant virtuel : Expérimentation au sein d'un simulateur de conduite	103

I. Introduction	104
II. Principe de l'expérimentation	104
III. Questions de recherche et Hypothèses	107
IV. Protocole expérimental	108
1. Matériel	108
1.1. L'environnement de simulation	108
2. Participants	109
3. Déroulement de l'expérimentation	109
3.1. Procédure	110
3.2 Mesures	113
V. Résultats	113
1. Perception d'anthropomorphisme	113
2. Confiance	114
3. Performances et Expérience (selon les scénario de conduite)	118
Discussion et conclusion	131
Discussion Générale	135
Conclusion Generale	143
Bibliographie	145
Webographie	162
ANNEXES	163

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 – Les domaines d'études de l'ingénierie cognitive.	18
Figure 1.2 – Représentation des trois concepts UX, KX, HX (Blanc, 2018)	20
Figure 1.3 – Illustrations des activités de conception centrées sur les utilisateurs finaux (ISO 13407, 1999)	22
Figure 2.1: Description des différents niveaux d'automatisation d'une voiture - Proposition de la SAE International (Version 2021)	26
Figure 2.2: Facteurs qui influencent la confiance à priori, extrait du modèle Hoff & Bashir, 2015	30
Figure 2.3: Facteurs d'apprentissage qui influencent la confiance à priori, extrait du modèle Hoff & Bashir, 2015	31
Figure 2.4 : Modèle d'évolution de la confiance proposé par Rajaonah B., (2006)	33
Figure 2.5: Modèle Lee & See (2004) (extrait de French et al., 2018)	34
Figure 2.6: Modèle de Hancock et al., 2011 (extrait de French et al., 2018)	35
Figure 2.7: Modèle de Schaefer et al., 2014 (extrait de French et al., 2018)	35
Figure 2.8 : Modèle de Bindewald, Rusnock, & Miller, 2018. (KSA = knowledge, skills, and abilities).	36
Figure 2.9: Modèle de conception d'une interface basée sur la confiance dans une voiture autonome (Ekman et al., 2018)	38
Figure 2.10: Interfaces de visualisation anthropomorphique et non anthropomorphiques pour la voiture autonome (extrait de Häuslschmid et al., 2017)	43
Figure 2.11 Interface symbolique sur les informations de conduite. (extrait de Niu et al., 2017)	44
Figure 2.12 Interface symbolique et anthropomorphique sur les informations de conduite.(extrait de Niu et al., 2017)	44
Figure 2.13: Concept "Carvatar": Avatar utilisant les stimuli sociaux pour mimer le comportement humain en conduite. (extrait de Zihlsler et al., 2016)	45
Figure 2.14: Échantillon de robots utilisés dans le premier questionnaire (Image extraite de Kalegina et al., 2018)	53
Figure 2.15: Échantillon de robots pour le second questionnaire (Image extraite de Kalegina et al., 2018)	55
Figure 2.16 : Correspondance des attributs du visages des robots avec des rôles spécifiques (Kalegina et al., 2018).	57
Figure 3.1: Pedagogical embodied agents design framework (Haake & Gulz,2009)	Erreur ! Signet non défini.
Figure 3.2 : Mise en place des images et des catégories	70
Figure 3.3: Résultat d'un tri effectué par un participant (avant débriefing)	71
Figure 3.4 : Image immersive pour illustrer une situation de conduite non risquée.	73
Figure 3.5: Image immersive pour illustrer une situation de conduite risquée	73
Figure 3.6 : Exemple d'illustration d'un modèle de base dans le questionnaire.	74
Figure 3.7 : Diagramme empilé divergent représentant les scores de confiance	77
Figure 3.8 : Diagramme empilé divergent représentant les scores d'appréciation	78
Figure 3.9 : Diagramme empilé divergent représentant les scores d'anthropomorphisme	80
Figure 4.1 : Représentation visuelle choisie sur la base des résultats du questionnaire	91
Figure 4.2 : Structure de modélisation de visage utilisé (à gauche) et son résultat sur l'assistant (à droite)	92
Figure 4.3: Résultat de la première modélisation de l'assistant virtuel	93
Figure 4.4 : Première modélisation de l'assistant virtuel	93
Clarisse Lawson-G	p. 10

Figure 4.5 : Seconde modélisation de l'assistant virtuel	94
Figure 4.6 : Visage de l'assistant – Yeux ouverts et fermés	94
Figure 4.7 : Bras, mains et oreilles de l'avatar	95
Figure 4.8: Point central d'attention	95
Figure 4.9: Le biped utilisé pour l'assistant virtuel	97
Figure 4.10 : Attribution des zones affectées par le mouvement des os	97
Figure 4.11 : Exemple de résultats de combinaison de morphing target	98
Figure 4.12 : Exemple des gestuels déictiques et iconiques :	99
Figure 4.13 : Exemples de gestes emblèmes et métaphoriques	100
Figure 4.14 : L'assistant intervenant pendant la conduite autonome	101
Figure 4.15 : L'environnement de l'application Unity	101
Figure 4.16 : Sortie de l'application affichée sur la tablette	102
Figure 4.17 : Animator de l'assistant	102
Figure 5.1: Interface CMI, elle sert de référence dans cette expérimentation (Baseline)	105
Figure 5.2 : Interface Baseline enrichie par un assistant vocal (Assistant Vocal)	106
Figure 5.3 : Interface Assistant vocal enrichie d'une représentation visuelle de l'assistant (Assistant Visuel)	106
Figure 5.8: Graphique de corrélation ($\rho= 0.5$, $p\text{-value} = 0.002$) entre l'anthropomorphisme perçu	118
Figure 5.9 : Temps de réaction dans le scénario TOR 60 s	120
Figure 5.10 : Diagnostic et évaluation de la situation dans le cas du scénario TOR 60s	121
Figure 5.11: Expression des sujets concernant leur expérience dans le cadre du scénario TOR 60s	121
Figure 5.12 : Expression des participants concernant l'utilité du message vocal dans le cadre du scénario TOR 60s.	122
Figure 5.13 : Temps de réaction dans le scénario TOR 10 s	123
Figure 5.14: Diagnostic et compréhension de la situation dans le cas du scénario TOR 10	124
Figure 5.15: Expression des participants concernant l'utilité du message vocal dans le cadre du scénario TOR 10s.	124
Figure 5.16: Expression des participants concernant la reprise en main urgente dans le cadre du scénario TOR 10s	125
Figure 5.17 : Expression des sujets concernant l'évaluation de la réactivité du système dans le cadre du scénario TOR 10s	126
Figure 5.18 : Diagnostic et évaluation de la situation dans le cas du scénario de brouillard, pour chaque groupe de participants	127
Figure 5.19: Attitude pendant le freinage au cours du scénario de brouillard pour chaque groupe de participants.	128
Figure 5.20: Expression des sujets pendant le freinage pour les 3 groupes de participants, au cours du scénario de brouillard.	129
Figure 5.21 : Perception des actions du système au cours du scénario de brouillard	130
Figure 5.22 : Perception du message vocal de réassurance au cours du scénario de brouillard.	130

GLOSSAIRE

MD : (Manual Driving) Conduite en mode manuelle sans aucune aide à la conduite

AD : (Automated Driving) Conduite en mode automatisé de niveau 3; le système a la charge de toute la tâche de conduite

TOR : (Take Over Request) Demande de reprise de contrôle formulée par le système à destination du conducteur

TOR 60: Demande de reprise de contrôle en 60s

TOR 10: Demande de reprise de contrôle en 10s

MRM: Minimum Risk Manoeuver (Manoeuvre de risque minimum - Cette manœuvre consiste à arrêter complètement le véhicule dans sa voie de circulation. Elle est réalisée par le système de conduite automatisé à la fin d'une demande de reprise de contrôle et en l'absence de réaction de la part du conducteur.)

TCP/IP : Transmission Control Protocol/Internet Protocol : Il s'agit donc d'une suite de protocoles associée au domaine d'Internet pour lequel elle facilite le transfert de données.

DLL (Dynamic Link Library) : Il s'agit d'une bibliothèque logicielle dont les fonctions sont chargées en mémoire par un programme, au besoin, lors de son exécution.

Animator : Outil du logiciel Unity qui permet d'organiser et de gérer un ensemble de clips d'animation et les transitions d'animation associées pour un personnage ou un objet.

Trigger: Un paramètre booléen qui est réinitialisé par le contrôleur lorsqu'il est consommé par une transition.

Script: Programme codé dans le langage C Sharp sur Unity

INTRODUCTION GENERALE

L'automatisation est une avancée dans la technologie qui a permis de soustraire l'humain à des tâches répétitives et difficiles à maintenir dans la durée pour les déléguer à une machine. Depuis l'invention des premières machines qui ont porté la révolution industrielle, l'automatisation s'est intégrée dans tous les aspects et toutes les formes d'activité humaine et d'impressionnants progrès ont été réalisés. Les usines autonomes en sont l'exemple le plus frappant. A mesure que la technologie avance, les machines qui nous entourent au quotidien vont au-delà de la simple automatisation. Elles sont désormais "smart" et pour certaines dotées d'intelligence artificielle. Cela signifie qu'elles sont capables d'analyser, de comprendre l'environnement et le contexte et de prendre des décisions. L'humain peut donc en plus de déléguer la force de travail, il peut déléguer sa capacité d'analyse et de décision et se retrouver dans un rôle de pure supervision.

Cependant, l'interaction avec des machines pourvues de technologies aussi sophistiquées est souvent teintée de problèmes de mauvais usage ou de non-usage (misuse, disuse) Parasuraman & Riley, 1997). Ces problématiques trouvent leur cause dans le manque de confiance ou l'excès de confiance dans les capacités du système. Le cas des voitures autonomes ne fait pas exception. La promesse d'une conduite autonome apportant plus de confort, plus de sécurité sur les routes et une libération de la tâche de conduite lorsque le conducteur le désire, est attractive. Pourtant, de récentes études révèlent que les potentiels futures utilisateurs manquent de confiance dans les capacités du système automatisé à gérer la tâche de conduite (Schoettle & Sivak, 2014 ; Kyriakidis et al., 2015; Fraedrich et al., 2016; AAA,2017) qui pourrait empêcher l'utilisateur de le laisser en charge de la tâche de conduite. En clair, les problèmes de transparence et de confiance posent des questions incontournables auxquelles il faut s'attaquer pour assurer l'acceptabilité des voitures autonomes lorsque celles-ci seront mises sur le marché.

L'une des pistes explorées dans la résolution des problèmes de confiance et de transparence dans les interactions homme-machine est "l'humanisation" de l'Interface et des interactions (Waytz et al., 2014 ; de Visser et al., 2016; Häuslschmid et al., 2017; Forster et al., 2017; Kulms & Kopp, 2019). Autrement dit, une interface est conçue pour interagir avec son utilisateur de la même manière que le ferait un autre humain. Les agents virtuels incarnés apparaissent comme un type d'interface approprié à évaluer pour répondre à ces problématiques. En effet, la recherche dans le domaine de la confiance humain-système nous apprend qu'utiliser des agents virtuels influe sur la confiance de l'utilisateur à travers le facteur d'anthropomorphisme. Cela permet de rendre

l'automate plus "transparent", notamment en ce qui concerne ses intentions et les méthodes employées pour réaliser ses tâches. Un agent virtuel est un produit logiciel conçu pour interagir avec l'utilisateur, le plus souvent par le moyen du langage naturel. Il peut être intelligent (doté d'une capacité d'analyse et de prise de décision), autonome et pour les plus évolués être doté d'une intelligence artificielle (Franklin & Graesser, 1996 ; Luger & Sellen, 2016). De même, il peut être dédié à une tâche spécifique ou avoir des domaines d'intervention variés. La constante est qu'il assiste son utilisateur dans la réalisation d'une tâche et accomplit cette mission de manière plus ou moins autonome ou en collaboration avec l'utilisateur.

Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi d'explorer le potentiel d'un assistant virtuel en tant qu'interface anthropomorphique pour augmenter le niveau de confiance des utilisateurs dans la conduite autonome. Ce document est donc structuré comme suit :

En premier lieu, l'état de l'art permettra de nous familiariser avec les concepts de véhicule autonome, de confiance, d'anthropomorphisme et d'assistant virtuel (Chapitre 2). Par la suite, notre approche exploratoire nous amènera à explorer la représentation visuelle d'un assistant virtuel qui puisse inspirer la confiance dans sa capacité à prendre en charge la tâche de conduite (chapitre 3). L'étape suivante conduit la modélisation, l'animation, puis l'intégration dans le cockpit de simulation de conduite autonome CMI (Chapitre 4). Cette implémentation permet la matérialisation de l'assistant virtuel afin d'en permettre l'évaluation. Dans la dernière partie de notre travail (Chapitre 5), nous tenterons de comprendre si des messages vocaux ajoutés une interface de référence ou encore la représentation visuelle ajoutée à l'interface Assistant Vocal pour obtenir une interface Assistant Visuel ont un impact sur la perception d'anthropomorphisme, la confiance, la performance et l'expérience des participants.

PARTIE I : CONTEXTE THÉORIQUE

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

I. Contexte

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse s'inscrivent dans un projet de recherche plus global (le projet CMI) porté par l'Institut de recherche technologique (IRT) SystemX. Depuis sa création en 2012 dans le cadre du programme des investissements d'avenir, l'IRT SystemX est un institut interdisciplinaire qui s'attache à réunir des acteurs industriels et académiques autour des enjeux de transformation numérique de l'Industrie, des services et des territoires. Le projet CMI (Cockpit Multimodal Interactif) est donc le fruit d'une collaboration entre les industriels Renault, Valéo, Saint-Gobain et Arkamys et les laboratoires académiques IMS-ENSC et le Cerca de Poitiers (pour cette thèse). Lancé en 2018 pour une durée de trois ans, ce projet est consacré à l'exploration des problématiques de facteurs humains dans un cockpit du véhicule autonome. Il s'attache à définir une interface multimodale (visuelle, auditive et haptique) pour accompagner le conducteur dans les cas d'usages spécifiques du transfert de contrôle et de la réassurance. L'objectif est de déterminer si cette interface multimodale permet au conducteur de reprendre efficacement le contrôle du véhicule tout en ayant une expérience positive avec le système automatisé. De même, cette interface est conçue pour rassurer le conducteur dans les situations incertaines où le système automatisé prend des décisions de façon autonome.

Si les sujets de l'expérience, de l'utilisabilité et de la multimodalité sont les thématiques principales du projet CMI, les partenaires s'intéressent également au sujet de la confiance. L'idée est de comprendre comment encourager la confiance des conducteurs en utilisant l'interface qui leur est proposée. C'est le sujet que nous avons choisi d'explorer dans cette thèse. Notre travail porte particulièrement sur l'exploration du potentiel d'un assistant virtuel en tant qu'interface anthropomorphique. Concrètement, il s'agit de concevoir, d'intégrer cet assistant virtuel dans l'interface multimodale développée au sein le projet CMI afin de mesurer son impact sur la confiance de l'utilisateur.

II. Objectifs et Contributions

L'objectif principal de ce travail de thèse est d'explorer le potentiel d'un assistant virtuel en tant qu'interface anthropomorphique pour augmenter le niveau de confiance des utilisateurs dans la conduite autonome. En effet, de précédentes études ont montré que l'intégration d'un élément anthropomorphique dans l'interface d'un système automatisé contribue à augmenter le niveau de confiance des utilisateurs dans ce système. Cependant, en examinant ces différentes études, on se rend compte que les éléments anthropomorphiques utilisés dans la conception des interfaces varient d'une étude à l'autre. Par exemple, certaines études utilisent une simple émoticône au sein de l'interface quand d'autres implémentent des représentations visuelles plus abouties. De plus, les outils utilisés pour mesurer l'anthropomorphisme perçu sont également variables. Il se pose alors la question d'avoir une vue d'ensemble sous forme de correspondance entre les caractéristiques anthropomorphiques, le degré d'anthropomorphisme qu'elles peuvent susciter ainsi que l'impact sur l'augmentation de la confiance.

Dans le cadre de cette thèse, différentes contributions ont été apportées à ce domaine de la recherche :

- 1) D'abord, par l'état de l'art en clarifiant le niveau des connaissances actuelles en ce qui concerne l'anthropomorphisme, la confiance et l'interaction entre ces deux concepts en général mais aussi dans le domaine de la conduite automatisée.
- 2) Ensuite, nous nous sommes intéressés au design anthropomorphique et à la manière d'intégrer des caractéristiques anthropomorphiques au sein d'une interface de véhicule automatisé. Notre travail a porté spécifiquement sur la représentation visuelle, les différentes façons de la réaliser ainsi que l'impact sur la perception des utilisateurs et leur confiance.
- 3) Enfin, nous avons tenté de déterminer l'impact de nos différents choix de conception sur le degré d'anthropomorphisme perçu et la confiance dans le cadre d'une expérimentation. Cette expérimentation a permis d'aborder la question des outils de mesure de l'anthropomorphisme perçu et de la confiance. Nous avons proposé une méthodologie de mesure de la confiance en suivant son évolution tout au long de l'expérimentation. Des outils de mesures validés au sein de la littérature ont été sélectionnés et adaptés à chaque étape de l'expérimentation. Le manque de consensus sur les outils de mesure de l'anthropomorphisme dans la littérature et le résultat des différents outils utilisés dans cette thèse est également discuté.

III. Domaine de la recherche

Nos travaux s'inscrivent dans un domaine scientifique et d'ingénierie relativement récent, la cognitique. La cognitique est une démarche d'ingénierie visant à une meilleure performance, une meilleure sécurité et un meilleur confort d'usage des systèmes complexes, notamment numériques. Elle s'inspire notamment (mais non exclusivement) des sciences cognitives, avec une visée et une intention applicative et industrielle. Son objet est le facteur humain et l'usage des technologies.

Le champ de recherche concerné par la démarche d'ingénierie cognitique est relativement large. Il fait appel à des méthodes extrêmement diverses et à une multitude d'applications possibles dans le cadre de domaines industriels variés. Ainsi, la vision proposée en Figure 1.1 n'est donc qu'une proposition de synthèse et de formalisation des différents thèmes de recherche et d'applications les plus communs dans le domaine de la cognitique. Elle ne peut en aucun cas être considérée comme figée, ou exacte, et devra être revue en fonction des évolutions à venir. Trois grands domaines peuvent être identifiés (Le Blanc, 2018) (Figure 1.1).

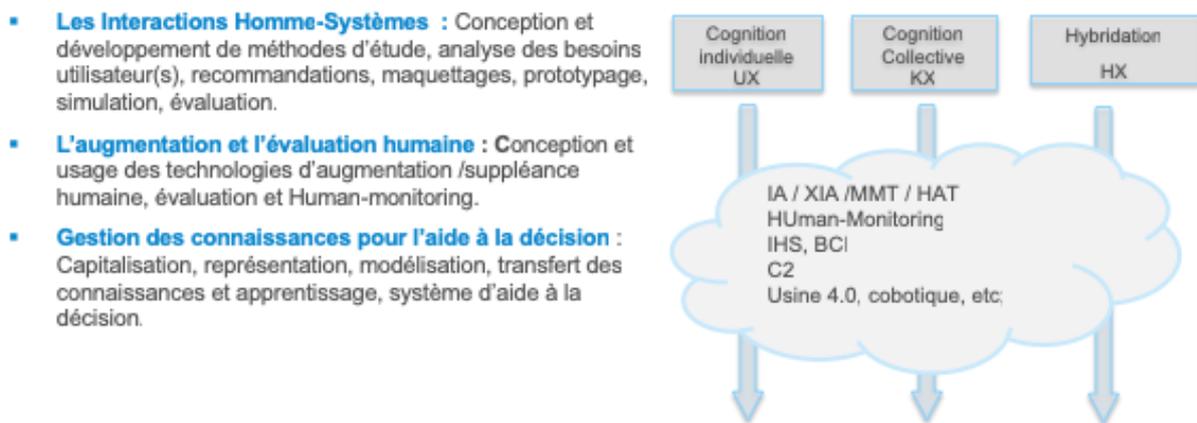


Figure 1.1 – Les domaines d'études de l'ingénierie cognitique.

Les Interactions Homme-Systèmes. L'Homme moderne est confronté de façon quasi permanente à des systèmes technologiques plus ou moins complexes : électroménager, informatique, téléphone, automobile, cockpit, etc. La démarche d'ingénierie cognitique doit permettre de prendre en compte les exigences en matière d'adéquation aux besoins, de performance et de facilité d'usage. La démarche d'ingénierie cognitique s'attachera notamment à la conception et au développement

de méthodes, à l'analyse des besoins utilisateur(s), aux recommandations, au maquettage, au prototypage, à la simulation et à l'évaluation. L'ensemble de cette démarche doit garantir un optimum en termes d'utilisabilité, d'affordance et d'accessibilité.

L'augmentation et l'évaluation humaine. Ce domaine est historiquement lié à celui de la suppléance, plus particulièrement en ce qui concerne les personnes vieillissantes ou en situation de handicap. Les progrès en biologie humaine, neurobiologie et biomécanique (entre autres) alliés à l'augmentation de la puissance de traitement des données et de la miniaturisation permettent aujourd'hui de pallier nombre de déficiences. Cet essor technologique laisse envisager la possibilité de dépasser la problématique de l'homme « réparé » pour aborder celle de l'homme « augmenté ». Nous nous référons à la conception centrée utilisateur (CCU), le « design pour tous » ou « universel ». Ces méthodes se définissent généralement comme visant à concevoir, développer et mettre sur le marché des produits, des services, des systèmes ou des environnements qui soient accessibles et utilisables par le plus large éventail possible d'utilisateurs, sans recourir à l'adaptation ou à la conception spécialisée (Choi, 2005). Comme pour le domaine précédent, la démarche d'ingénierie cognitive s'intéresse à l'analyse du besoin, la spécification et la conception de systèmes d'aide et de suppléance pour la compensation du handicap, l'accessibilité, les interactions avec la robotique et l'Intelligence Artificielle pour une adaptation de ces technologies aux usages (cybersécurité notamment).

Gestion des connaissances pour l'aide à la décision. Ces dernières décennies, la gestion des connaissances est devenue un axe majeur de performance pour les organisations. Les études sur le sujet démontrent que l'utilisation des pratiques de gestion des connaissances est un moteur important de l'innovation (Inkinen, 2016). En outre, les caractéristiques de leadership et les facteurs organisationnels sont susceptibles de soutenir la performance de l'entreprise grâce à une gestion plus efficiente et efficace des ressources en connaissances. Dans ce cadre, les méthodes de l'ingénierie cognitive se sont d'abord attachées à la capitalisation des connaissances, leur représentation et leur modélisation. Mais ces dernières années, le développement de l'Intelligence Artificielle apporte des méthodes et outils spécifiques qui permettent de franchir de nouvelles étapes vers le transfert des connaissances, les apprentissages et le développement de systèmes d'aide à la décision : deep learning, machine learning, réseaux de neurones, etc. (Sen et al., 2018).

Le modèle proposé en Figure 1.2, illustre les activités génériques en matière d'ingénierie cognitive à ce jour. Il correspond aussi, bien évidemment, à l'approche développée au sein de l'ENSC-IMS Cognitive en matière de formation, recherche et valorisation. Par ailleurs, en ce qui

nous concerne, cela se traduit par la mise en œuvre de méthodes et outils autour de thématiques comme l'eXplainable AI (XAI), le Human Autonomous Teaming (HAT), le Biomonitoring, les BCI, le command and control, la Cobotique et l'usine 4.0, etc.

La spécificité de l'orientation IMS_ENSC

Ces dernières années, l'ENSC-IMS Cognitive développe une grille de lecture des relations entretenues par la technologie et le facteur humain à travers la simplification des technologies (UX, pour User eXperience) et la contextualisation de la complexité (KX, pour Knowledge eXchange) (Figure 1.2).

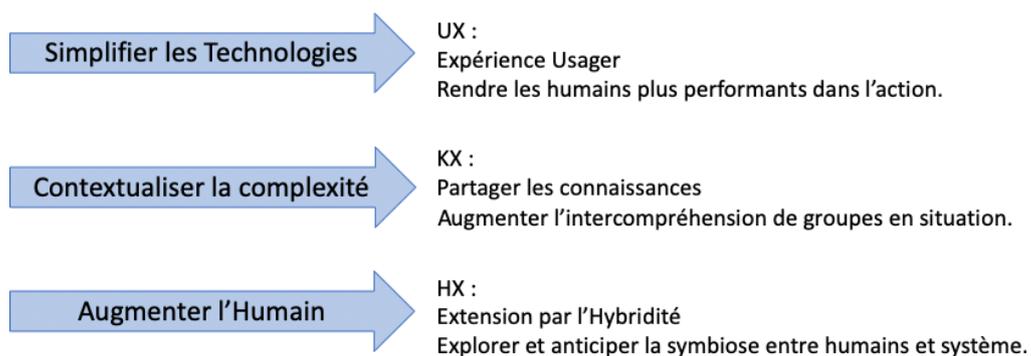


Figure 1.2 – Représentation des trois concepts UX, KX, HX (Blanc, 2018)

L'UX porte une attention particulière sur la facilité d'usage, la compréhension immédiate ou encore l'utilisation intuitive d'un produit, d'un système ou d'un service. Pour cela, les processus de conception mettent l'accent sur l'utilisateur, en faisant en sorte que les produits, systèmes ou services puissent être qualifiés d'utiles, utilisables, trouvables, navigables, accessibles, efficaces, désirables, agréables, crédibles, etc.

Mais si tous les produits, systèmes et services en viennent à donner un tel confort à l'utilisateur, de nouveaux problèmes sont susceptibles de se poser dès lors que cet utilisateur sera impliqué dans un collectif. En effet, il lui deviendra de plus en plus difficile d'exprimer à un collègue le travail en cours de réalisation, dans la mesure où l'utilisateur lui-même n'aura plus véritablement besoin de se représenter ce qu'est le rôle de l'outil dans la réalisation de la tâche.

En parallèle, avec l'UX, nous identifions un nouveau paradigme par l'acronyme KX. Celui-ci représente un besoin de partage de connaissances (Knowledge eXchange) ; partage entre

l'utilisateur et le système, mais aussi partagé entre les utilisateurs d'un même système. D'ailleurs, de plus en plus souvent, la notion d'interface humain-machine laisse la place au concept de HAT (Human-Autonomy Teaming).

Le verbe « to eXchange » impliqué dans le KX est à entendre comme « to share » (et non pas comme « to swap »). Le KX doit permettre à un collectif de partager des connaissances ; il y a donc une dimension « Knowledge Management » dans ce concept, une dimension « Situation Awareness », ainsi qu'une dimension « Management d'équipe » et une dimension « Communication ».

La démarche opérationnelle en ingénierie cognitive

La recherche et l'ingénierie en cognitive s'intéressent à toutes les étapes de la vie des systèmes humains/machines complexes. Elle fait appel aux connaissances et aux méthodes de plusieurs disciplines des sciences de la nature et des sciences sociales et humaines, ainsi qu'à l'ergonomie. Elles ont pour objectif fondamental d'améliorer la performance des systèmes humains-machines (Rasmussen, 1983). Elles permettent donc de pallier le manque, souvent présent, d'adéquation entre les outils fournis aux utilisateurs et leurs besoins d'informations pour réaliser leur travail.

Les domaines d'intervention fréquents de l'ingénierie en cognitive sont le développement ou l'adaptation d'interface Homme/Système (IHS), dans le but de gérer des opérations complexes. Ces opérations sont souvent soumises aux contraintes suivantes :

- Les variables à gérer sont multiples et interdépendantes.
- Les processus à gérer sont dynamiques, dans le sens où ils évoluent dans le temps, en particulier en raison de la complexité des systèmes et des différents éléments qui interagissent entre eux.
- Il existe des risques pour le personnel humain et pour les machines / systèmes.
- Les objectifs sont souvent conflictuels : il faut faire vite, mais ne pas faire d'erreur, maximiser le critère économique et la sécurité.

L'ingénierie en cognitive s'appuie sur la démarche dite de conception centrée utilisateur (CCU), qui consiste à considérer les utilisateurs et leurs besoins tout au long du processus de développement d'un produit. La conception centrée sur l'utilisateur s'appuie en particulier sur des critères d'utilisabilité et d'accessibilité

De manière plus précise, et à partir des principes de base de la CCU cités précédemment, la norme ISO 9241-210 (Organisation Internationale de Normalisation, 2010) identifie quatre activités principales centrées sur l'opérateur humain :

- Comprendre et spécifier le contexte d'utilisation ;
- Spécifier les contraintes et exigences de l'utilisateur et de l'organisation ;
- Proposer des solutions de conception et des prototypes ;
- Évaluer la conception par rapport aux contraintes et exigences.

Les deux premières activités constituent la phase d'analyse, suivie de la phase de conception et de la phase d'évaluation. Ces étapes sont menées dans le but d'intégrer les exigences d'utilisabilité dans le processus de développement et sont exécutées de manière itérative jusqu'à ce que les objectifs d'utilisabilité soient atteints (Figure 1.3).

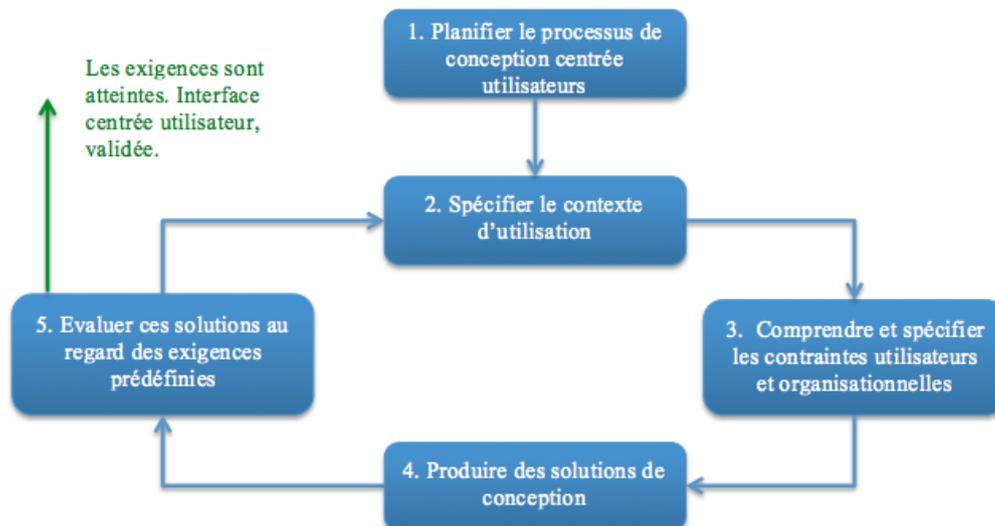


Figure 1.3 – Illustrations des activités de conception centrées sur les utilisateurs finaux (ISO 13407, 1999)

Les utilisateurs doivent être impliqués dans l'ensemble de ces phases de conception. Ces dernières sont interdépendantes. De nombreuses itérations sont fréquemment nécessaires pour aboutir à une solution satisfaisante. Lors de chaque itération, les utilisateurs fournissent des feedbacks qui permettent d'apporter des améliorations au système. C'est l'addition de ces modifications qui aboutira à la proposition d'un système adapté.

IV. Publications

Lawson-Guidigbe, C., Louveton, N., Amokrane-Ferka, K., LeBlanc, B., & Andre, J.-M. (2020). Impact of Visual Embodiment on Trust for a Self-driving Car Virtual Agent: A Survey Study and Design Recommendations. In C. Stephanidis & M. Antona (Éds.), *HCI International 2020—Posters* (p. 382-389). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50732-9_51

CHAPITRE 2: ÉTAT DE L'ART

I. Les véhicules automatisés

Durant les quatre dernières décennies, l'industrie automobile a introduit des innovations importantes en ce qui concerne l'automatisation de la tâche de conduite. Ces innovations se matérialisent sous la forme de systèmes d'aide à la conduite qui, selon leur niveau, prennent en charge une partie ou toute la tâche de conduite. La SAE International (Society of Automotive Engineers) propose une description en six niveaux de l'automatisation de la conduite allant du niveau 0 (totalement manuel) au niveau 6 (totalement automatisé) (Figure 2.1). Les niveaux 1 et 2 offrent une automatisation partielle au conducteur. Il s'agit de systèmes d'assistance à la conduite (ADAS) qui prennent en charge une ou plusieurs tâches de la conduite (contrôle volant, accélération, freinage) pendant que le conducteur reste dans un rôle de supervision (Bengler et al., 2014 ; Reimer, 2014). Les trois niveaux les plus élevés représentent une innovation majeure en ce sens que le conducteur a la possibilité de relâcher totalement le contrôle sur la conduite pour se consacrer à une activité de vie à bord. Les véhicules à ce niveau d'automatisation sont capables d'analyser leur environnement et de gérer un certain nombre de conditions de circulation sans intervention humaine (Skeete, 2018). En réduisant l'intervention de l'humain, la promesse des véhicules automatisés est de réduire les embouteillages, d'améliorer la consommation énergétique et d'impacter la pollution atmosphérique et le changement climatique (Forrest et Konca, 2007. ; Tientrakool et al., 2011 ; Atiyeh, 2012. ; Shladover et al., 2012, ; Plumer, 2017). De nombreux experts de l'industrie estiment également que la transition vers les véhicules automatisés (niveaux 3 à 5) améliorera considérablement la sécurité routière en réduisant les accidents de voiture (Hayes, 2011 ; Silberg et al., 2012; Fagnant et Kockelman, 2018).

Dans le domaine des facteurs humains, les chercheurs s'intéressent à divers aspects de l'interaction humain-véhicule automatisé. On retrouve notamment des questions de recherche autour de la thématique du transfert de contrôle (quand le conducteur donne ou reprend le contrôle de la conduite au système automatisé). Ainsi, différents concepts d'interface homme machine (IHM) unimodales et multimodales ont été proposés et évalués afin de déterminer quel type d'IHM convenait le mieux à cette activité. Les résultats de ces études suggèrent que la modalité la plus adaptée pour le signal de reprise en main dépend de l'urgence de la situation et de la modalité sensorielle utilisée dans l'activité de vie à bord au moment de la demande de transfert de contrôle (Wandtner et al, 2018). De plus, les alertes multimodales (type auditives-visuelles, auditives-haptiques ou auditives-visuelles-haptiques) sont préférées aux alertes unimodales (Brandenburg et al, 2018; Sadeghian Borojeni et al., 2016; Petermeijer et al., 2017;

Bazilinskyy et al., 2018). D'autres études se sont intéressées au temps minimum nécessaire à la reprise de contrôle et aux facteurs qui influencent ce temps de réaction. On sait désormais qu'un conducteur nécessite entre 5 et 8 secondes pour reprendre le contrôle du véhicule lorsqu'il reçoit une alerte (Mok et al., 2015). Ce temps minimum n'est pas très différent selon que l'activité de vie à bord du conducteur au moment de l'alerte est active (jouer à un jeu sur une tablette), passive (regarder une vidéo) ou inexistante (Mok et al., 2017). Au-delà du type d'activité de vie à bord, d'autres des facteurs comme la complexité de la situation de conduite au moment de l'alerte peuvent influencer ce temps (Zeeb et al., 2015).

Outre ces questions liées aux interfaces et aux interactions, d'autres chercheurs s'intéressent aux facteurs qui peuvent influencer l'acceptation et l'adoption de cette technologie. En effet, malgré les avantages annoncés des véhicules automatisés et les prévisions en ce qui concerne le rythme auquel ils seraient adoptés (Litman, 2018; Mosquet et al., 2015), des obstacles subsistent (Biondi, Alvarez, & Jeong, 2019). Il s'agit notamment des possibles conséquences de l'automatisation sur la charge mentale du conducteur (Biondi et al., 2018), sa conscience de situation (Stanton and Young, 2005; Vollrath et al., 2011) mais surtout la perception qu'a le conducteur de cette technologie. Ainsi, certaines études (Liu et al., 2019) ont identifié la confiance, et plus spécifiquement la sous-confiance et la sur-confiance, comme étant l'un des challenges les plus importants à l'adoption des véhicules automatisés. Dans le cas de la sous-confiance, des risques de rejet menacent l'adoption à grande échelle et donc la possibilité pour notre société de bénéficier des avantages de cette technologie. La sur-confiance cause une sur-dépendance à l'automatisation qui peut présenter des risques relatifs à la sécurité dans les situations où le système automatisé ne serait pas en mesure de fonctionner comme il le devrait (Miller et al., 2016).

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons spécifiquement à la conception d'une interface homme-machine permettant de pallier le problème de la sous-confiance envers le véhicule automatisé de niveau 3.

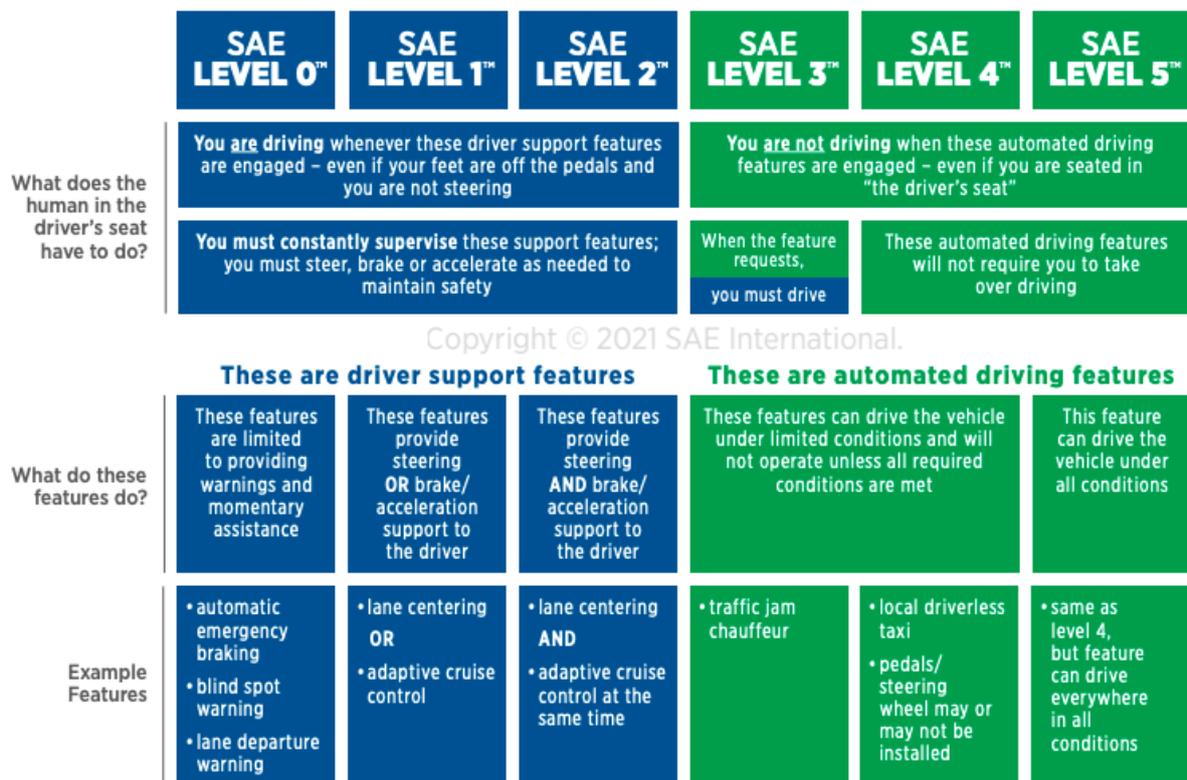


Figure 2.1: Description des différents niveaux d'automatisation d'une voiture - Proposition de la SAE International (Version 2021)

II. La Confiance

La confiance dans les systèmes automatisés a largement été abordée dans la recherche. Elle y est désignée comme l'un des facteurs pouvant faciliter l'acceptation de l'automatisation (J. D. Lee et See, 2004). Parasuraman & Riley, (1997) suggèrent qu'une bonne calibration de la confiance de l'utilisateur peut permettre de réduire les risques de mauvais usage (misuse) ou de non usage (disuse) des systèmes automatisés qui sont liés aux problèmes de sur ou de sous confiance. Cependant, dans le cas des voitures automatisées, un phénomène de sous-confiance à l'égard de cette technologie a été constaté dans plusieurs études.

Dans une récente étude portant sur les raisons pouvant pousser un utilisateur à désactiver l'autopilote dans une voiture automatisée (van Huysduynen et al., 2018), les participants ont évoqué la confiance faite au système pour gérer les situations jugées risquées (trafic dense et imprévisible, virage, rapprochement rapide d'un autre véhicule). De même, au cours de deux études de l'American Automobile Association (AAA,2016) (AAA, 2017), 75% des participants affirment craindre de se déplacer dans une voiture totalement automatisée. Il est clair que la

problématique de la confiance se trouve au cœur du succès des voitures hautement automatisées. Nous allons tenter d'exposer ici l'état des connaissances sur le sujet de la confiance dans les systèmes automatisés en général puis dans la voiture autonome en particulier.

1. Définition

Il existe plusieurs définitions de la confiance à travers la littérature. A ce propos, Shapiro, (1987) parlait de « a confusing potpourri of definitions » pour qualifier la multiplicité et la diversité des définitions proposées pour ce même mot. Les diverses définitions de la confiance peuvent être regroupées en 3 catégories : 1) la confiance comme état psychologique, 2) la confiance comme intention comportementale, 3) la confiance comme comportement (Rajaonah Bako, 2006).

La confiance comme état psychologique regroupe les définitions de la confiance en tant qu'attente, évaluation ou jugement, croyance, attitude. Le concept d'attente dans la confiance constitue une projection future concernant les actions de la personne (ou la chose) à qui on fait confiance qu'on espère bénéfiques ou du moins non préjudiciables (Robinson, 1996 ; Chouk et Perrien, 2004). Les auteurs qui définissent la confiance en tant qu'évaluation pensent qu'il s'agit d'une perception de la probabilité que l'autre partie fera preuve d'honnêteté, ou ne fera pas des choses dans son propre intérêt (Gambetta, 2000; Madhok, 1995 ; Lorenz, 1999).

La confiance définie comme croyance rejoint un peu la définition de la confiance comme attente puisqu'on parle du système de croyance de celui qui fait confiance par rapport aux actions de celui à qui on fait confiance ((Knack, 2001)). Enfin, pour les auteurs qui conçoivent la confiance comme une attitude, il s'agit d'un état mental basé sur les croyances, les évaluations et les attentes et qui se réfère à l'évaluation d'un objet, un concept ou un comportement en tant que favorable ou défavorable (Ajzen & Fishbein, 2000). La confiance serait donc un pendant mental de la délégation puisque la délégation d'une action à une autre partie nécessite que la confiance soit accordée à cette autre partie (Castelfranchi et Falcone, 2000).

La confiance comme intention comportementale:

La confiance définie comme intention comportementale représente la volonté d'une partie A de se comporter d'une certaine manière ou d'être vulnérable aux actions d'une autre partie B dans l'attente que B réalisera certaines actions conformément aux besoins de A (Mayer et al., 1995; Corritore et al., 2003)

La confiance comme comportement:

D'autres définitions présentent la confiance comme le comportement d'une partie A consistant à se fier aux actions d'une partie B dans une situation caractérisée par l'existence d'un risque. (Currall & Judge, 1995 ; Lewis & Weigert, 1985). La confiance est également définie en tant qu'une disposition ancrée dans la personnalité d'un individu et qui le pousse à croire que les promesses d'un autre individu sont fiables (Bonnie M. Muir, 1994).

Toutes ces définitions bien que divergentes ont certains points communs. Tout d'abord en ce qui concerne les composants de la confiance, trois composants sont nécessaires pour parler de confiance: la personne qui fait confiance, l'entité (une personne, une machine, une organisation, soi-même ...etc.) à laquelle on fait confiance ou qui reçoit la confiance et enfin la motivation (un comportement, une action ...etc.) de la confiance (Hoff & Bashir, 2015). Le second point commun de ces définitions de la confiance est la notion de risque et d'incertitude qui caractérise les situations où on peut parler de confiance.

2. Confiance Homme-Machine

La confiance dans une interaction homme-machine a pour intérêt de permettre la réduction des risques perçus lors de l'interaction (Luhmann, 2000). La réduction du risque perçu est liée à l'acceptation d'un certain niveau d'erreur, ce qui par la même occasion peut diminuer la complexité de la tâche effectuée avec le système. Pour (Lewis & Weigert, 1985), faire confiance c'est éluder une partie des possibles, ce qui permet de diminuer la complexité mais implique aussi le fait de n'envisager que des représentations futures résolument optimistes. Dans la littérature sur la confiance humain-machine, deux définitions sont régulièrement citées. Celle de (Mayer et al., 1995) qui considère la confiance comme *"the willingness of a party to be vulnerable to the actions of another party based on the expectation that the other will perform a particular action important to the trustor, irrespective of the ability to monitor or control that party"* et celle de (Lee et See, 2004) qui la définissent comme *"the attitude that an agent will help achieve an individual's goals in a situation characterized by uncertainty and vulnerability"*. Dans un cas, la confiance est considérée comme une intention d'adopter un comportement sur la base d'attentes et de croyances et dans l'autre cas comme une attitude.

(Rajaonah Bako, 2006) propose une définition qui fait le lien entre les différents types de définitions évoquées précédemment. Pour cet auteur, la confiance entre un humain et un système automatisé serait *"un état psychologique d'attentes résultant de connaissances et d'évaluations"*

relatives au référent de la confiance de l'opérateur dans un contexte spécifique, et orientant sa décision d'utiliser le contrôle automatique."

Dans le cadre de notre travail, notre définition de la confiance constitue un mix entre les définitions proposées par (Rajaonah Bako, 2006) et Lee et See, 2004). (Rajaonah Bako, 2006) statue sur la nature de la confiance comme état psychologique, souligne son lien à un contexte spécifique et surtout son influence dans la décision d'utilisation du contrôle automatique. Cependant, elle ne mentionne pas la notion de risque que l'on retrouve dans la définition de (Lee et See, 2004) .

2.1 Modèles de la confiance Humain-Machine.

La confiance Homme-Machine est souvent assimilée dans la littérature à la confiance interpersonnelle (Humain-Humain). Selon (Bonnie M. Muir, 1994) cette similarité vient du fait que les humains ne font pas vraiment confiance au système mais plutôt au concepteur (Humain) qui a conçu ce système. (J. Lee et Moray, 1992) ont proposé un modèle de construction de la confiance Humain-système lui-même basé sur les modèles de (Bonnie M. Muir, 1987) et (Zuboff, 1988). Ce modèle identifie 3 étapes dans la formation de la confiance :

- La prédictibilité : est l'étape où l'opérateur est capable de prédire les actions du système dans des situations connues. Cette étape est atteinte après une certaine familiarisation avec le système.
- La fiabilité : correspond à l'étape où l'opérateur a développé une compréhension poussée du fonctionnement du système ainsi qu'un modèle mental approprié. La confiance s'établit à cette étape puisque l'opérateur peut désormais se fier au système.
- La foi est la dernière étape. L'opérateur se fie au système même dans des situations inconnues avec l'assurance qu'elle réagira de la même façon que dans les situations connues.

(Lee & See, 2004) pour leur part suggèrent que la formation de la confiance se ferait dans le sens opposé à celui proposé par (J. Lee & Moray, 1992). Ainsi, la foi serait la première étape suivie de la fiabilité et enfin la prédictibilité. Cette inversion dans le processus serait due au fait que les utilisateurs sont souvent biaisés dans leur jugement par rapport aux automates qui sont perçus comme étant plus performants que les humains (Dzindolet et al., 2003). Au-delà des définitions de la confiance et des processus de sa construction, il est important d'identifier et de comprendre les différents facteurs qui influent sur la confiance tout au long de son interaction avec un système automatisé. Il faut noter que les trois étapes de la construction de la confiance précédemment décrites interviennent après l'interaction proprement dite avec le système. Or, la construction de

la confiance commence bien avant l'interaction. Il faut donc distinguer la confiance à priori (Dzindolet et al., 2003) de la confiance à posteriori une fois que l'interaction a débuté. Hoff & Bashir, 2015 ont proposé un modèle de confiance pour les interactions Homme-système. Dans ce modèle, la confiance initiale (à priori) est influencée par des facteurs dispositionnels, situationnels et d'apprentissage (Figure 2.2 et Figure 2.3).

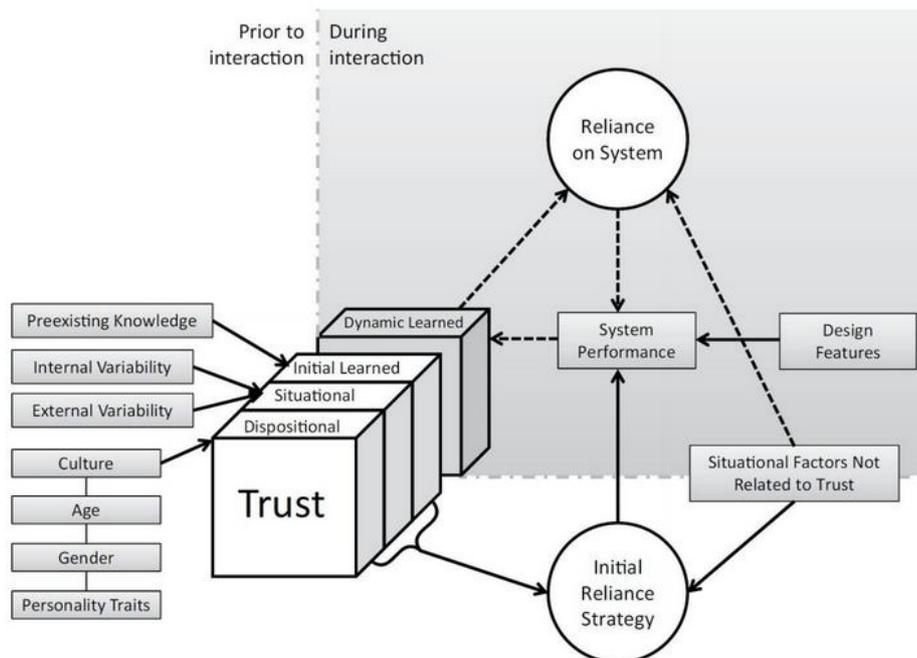


Figure 2.2: Facteurs qui influencent la confiance à priori, extrait du modèle Hoff & Bashir, 2015

Les facteurs dispositionnels sont liés à l'opérateur (la personne qui utilise le système). Il s'agit notamment de son genre, sa culture, son âge et sa personnalité. Un facteur important de la personnalité qui influe sur la disposition à faire confiance à un système est le "locus of control". Le "locus of control" est la tendance d'un individu à se blâmer ou à blâmer les facteurs extérieurs à lui lorsqu'un événement se produit (Helldin et al., 2013). Les facteurs situationnels peuvent être internes c'est-à-dire liés à l'opérateur. Ils comprennent la confiance en soi, l'humeur, la charge mentale et la capacité attentionnelle de l'opérateur au moment de l'interaction. Les facteurs situationnels externes sont liés au système et à l'environnement et comprennent la complexité de la tâche à accomplir, le type et la complexité du système, les risques et bénéfices perçus du système, la charge de travail, et le contexte organisationnel dans certains cas. Enfin, les facteurs d'apprentissage comprennent notamment les expériences passées de l'opérateur avec des

systèmes similaires, la réputation du système ou de la marque derrière ce système, la compréhension que l'opérateur a du système ainsi que ses attentes.

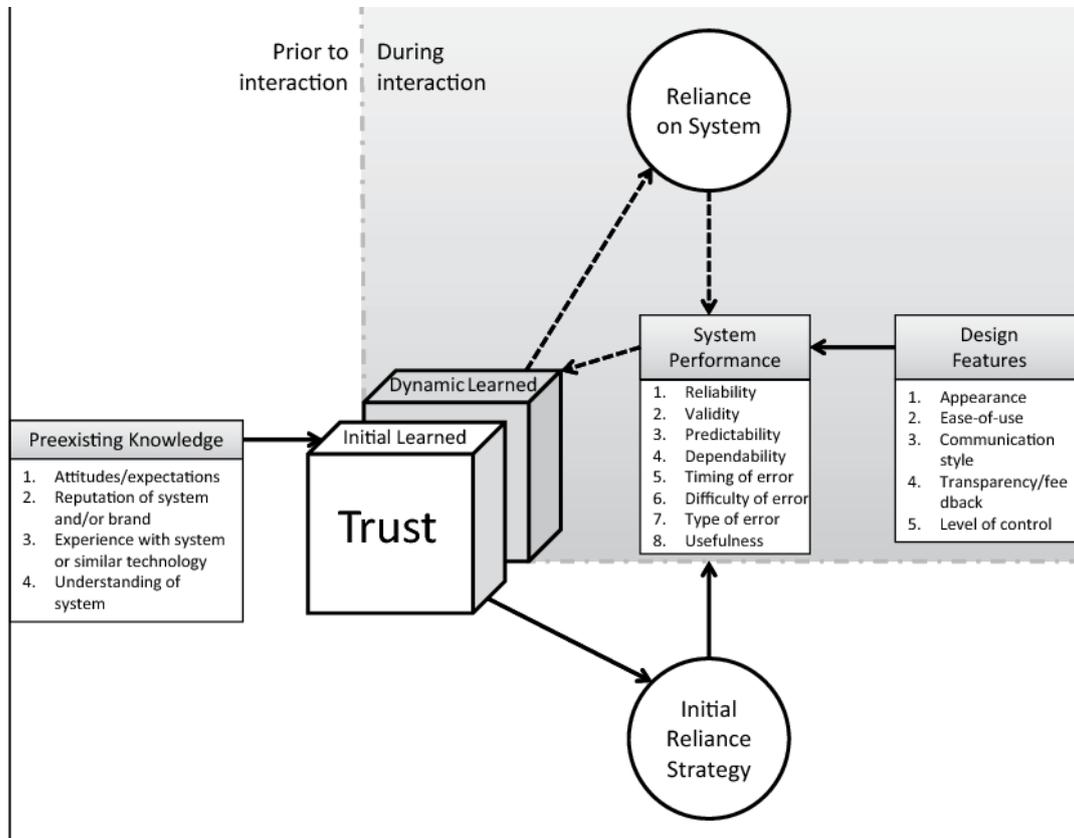


Figure 2.3: Facteurs d'apprentissage qui influencent la confiance à priori, extrait du modèle Hoff & Bashir, 2015

Après la première interaction avec le système automatisé, d'autres facteurs viennent influencer la confiance de l'opérateur. La confiance à priori se transforme en la confiance à postériori.

French et al., 2018 proposent une revue de littérature des différents modèles conçus pour la confiance à posteriori (à partir de la première interaction entre l'opérateur et le système). Numan, 1998 suggère un modèle où la confiance est accordée à un moment spécifique dans le temps lorsque l'opérateur a accumulé suffisamment de preuves du fonctionnement satisfaisant du système. Au fur et à mesure que l'interaction se poursuit dans le temps, l'opérateur accumule de nouvelles preuves qui vont renforcer ou altérer sa confiance. Ainsi, une fois la confiance acquise, elle n'est jamais perdue mais seulement altérée à des occasions spécifiques dans le temps.

Les expérimentations de (B. M. Muir & Moray, 1996) (Utilisation d'un contrôle automatique sur une ligne de pasteurisation) permettent d'identifier 2 choses : d'une part que la décision d'utiliser

le contrôle automatique est liée à la confiance accordée par l'opérateur. Cependant, lorsqu'une faille du système est détectée, la confiance est immédiatement altérée. La confiance est donc très influencée par la compétence perçue du système au cours de l'interaction.

Les expérimentations de (Lee & Moray, 1994) sont en accord avec ceux de (B. M. Muir & Moray, 1996) en ce sens qu'ils ont également observé que la décision d'utiliser le contrôle automatique dépend de la confiance que l'opérateur lui accorde. Cependant, ils ont également observé l'influence du facteur "confiance en soi". Ainsi, lorsque l'opérateur a une confiance en lui moins élevée que celle qu'il a dans le système, il tend à préférer l'utilisation du contrôle automatique.

(Desai et al., 2013) constatent pour leur part que les erreurs du système provoquent une altération plus importante de la confiance lorsqu'elles surviennent au tout début de l'interaction que lorsque ces erreurs sont observées après une longue période d'utilisation. Les travaux de (Dzindolet et al., 2003) sur des systèmes d'aide à la décision vont dans le même sens. Ils ont conçu une expérimentation et mesuré le niveau de confiance des opérateurs avant et après interaction avec le système. Avant l'interaction, les opérateurs présentaient un biais positif par rapport à la performance du système. Cependant, les erreurs observées en début d'interaction ont altéré le niveau de confiance. Cependant, une utilisation prolongée du système ainsi que des retours sur les causes des erreurs du système a permis de rehausser le niveau de confiance des opérateurs. L'expérience avec le système et la transparence sur les causes des erreurs du système sont donc des facteurs importants qui influencent le niveau de confiance.

Rajaonah B., (2006) propose un modèle de fluctuation de la confiance dans le temps (Figure 2.4). Au point de départ, l'opérateur se réfère à lui-même (confiance en soi, préférences personnelles, prédispositions) et au système (informations par les tiers, publicités, réputation des marques) pour construire une confiance à priori et la décision d'utiliser le contrôle automatique ou non. A partir du moment où l'interaction proprement dite prend place, l'opérateur se réfère aux réactions du système pour se construire un modèle mental sur la base duquel se construit la confiance. Au fur et à mesure que ce modèle mental se construit sur la base des nouvelles connaissances et de l'expérience, la confiance de l'opérateur évolue et se focalise non pas simplement sur le système mais sur la coopération avec le système.

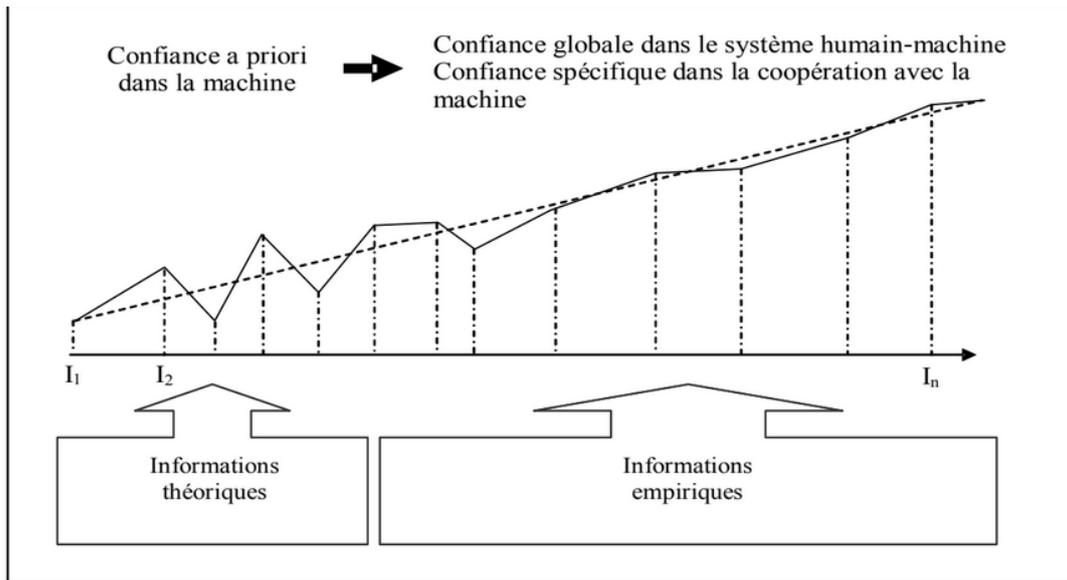


Figure 2.4 : Modèle d'évolution de la confiance proposé par Rajaonah B., (2006)

D'autres modèles ont également été proposés pour expliquer la dynamique de la confiance dans une interaction Homme-machine. Bien que ne montrant pas une approche évolutive par rapport au temps, ces modèles recensent différents facteurs qui influent sur la confiance au cours de l'interaction. Le modèle de (Lee & See, 2004) décrit les dynamiques de la confiance et leurs effets sur le comportement de fiabilité au système (figure 2.5). Ce modèle met en évidence un processus en boucle fermé où les interactions avec l'automate et son interface influent sur la confiance qui à son tour influe sur l'intention d'usage et le comportement de fiabilité.

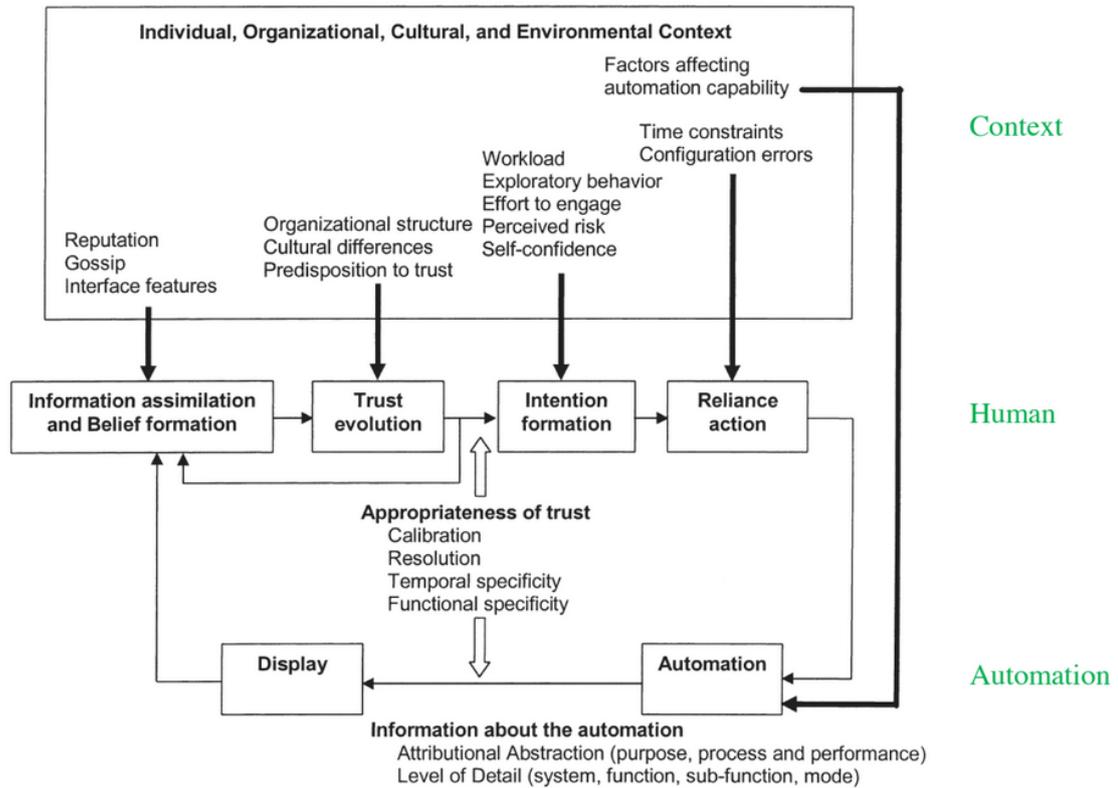


Figure 2.5: Modèle Lee & See (2004) (extrait de French et al., 2018)

Le modèle de (Hancock et al., 2011) (Figure 2.6) repris et amélioré par (Schaefer et al., 2014) (Figure 2.7) présente les différents facteurs qui influencent la confiance spécifiquement dans une interaction Humain-Robot. Ces facteurs sont regroupés en trois catégories. Ceux liés à l'opérateur, ceux qui sont liés à l'automate (robot) et ceux qui sont liés à l'environnement.

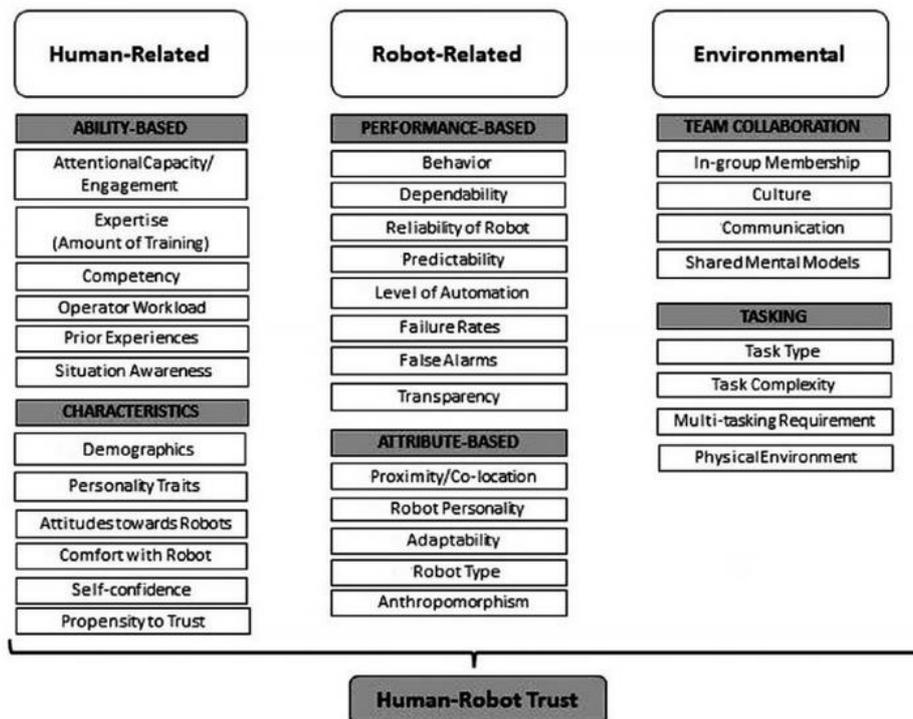


Figure 2.6: Modèle de Hancock et al., 2011 (extrait de French et al., 2018)

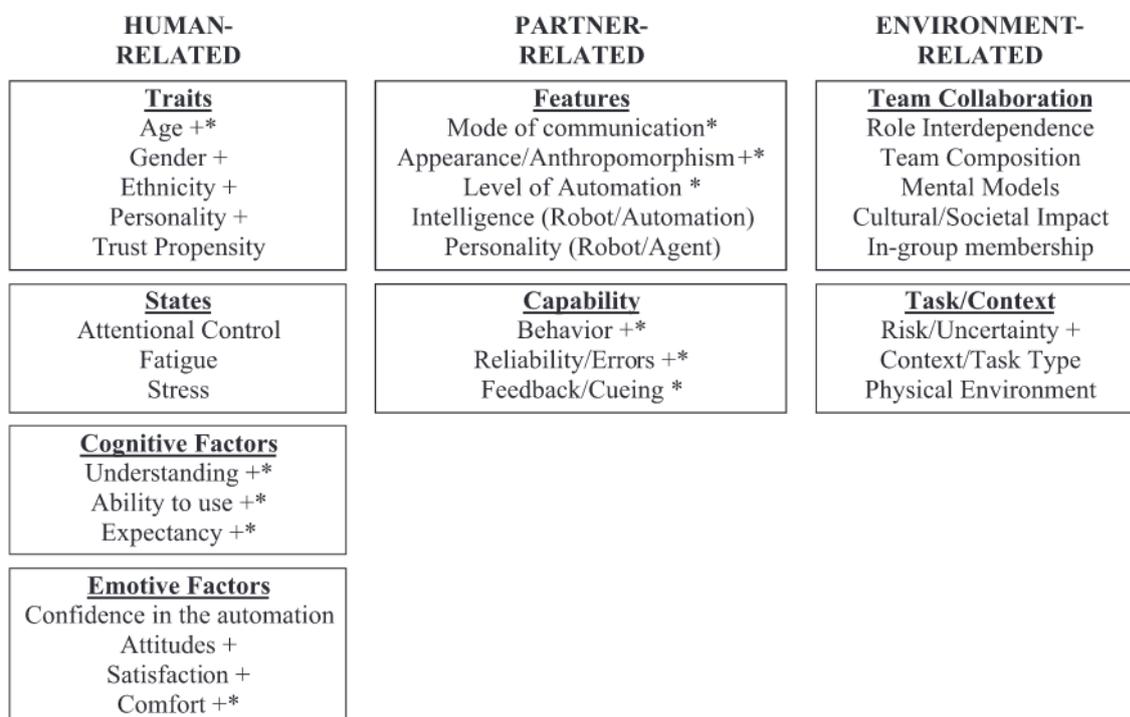


Figure 2.7: Modèle de Schaefer et al., 2014 (extrait de French et al., 2018)

Un autre modèle proposé par (Bindewald et al., 2018) décrit les comportements de confiance pour un système qui peut effectuer des actions au nom de l'opérateur humain (Figure 2.8). Ce modèle suit la même approche que ceux de (Hancock et al., 2011) et (Schaefer et al., 2014) en isolant les facteurs qui proviennent du système automatisé, de ceux qui sont liés à l'opérateur humain ou à l'environnement où se déroule l'interaction.

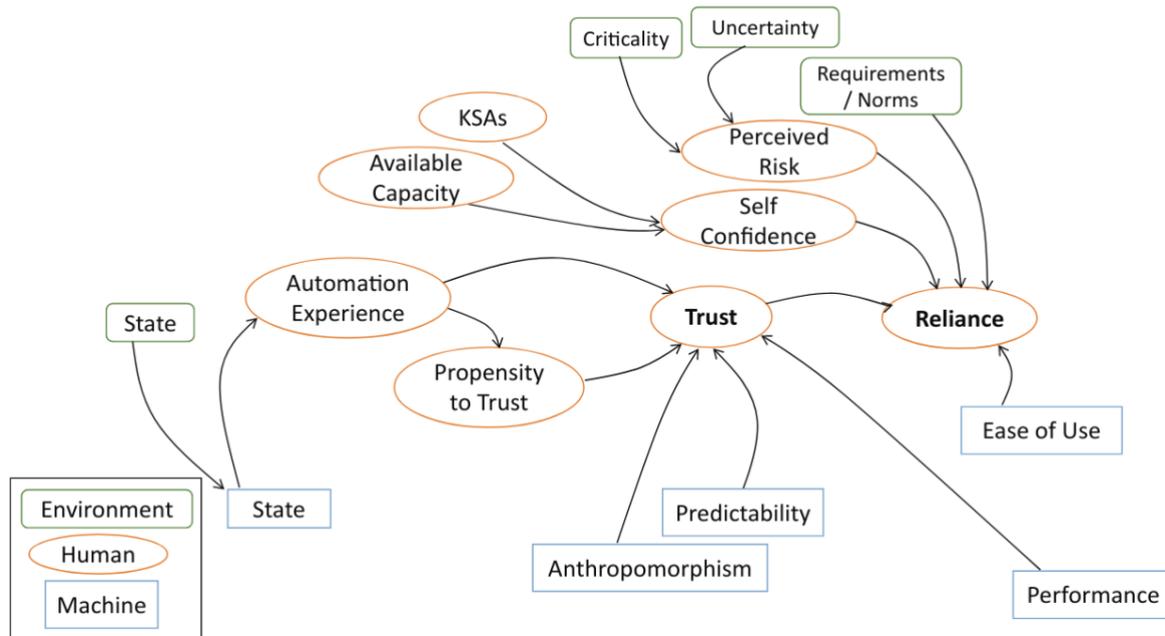


Figure 2.8 : Modèle de Bindewald, Rusnock, & Miller, 2018. (KSA = knowledge, skills, and abilities).

L'analyse de tous ces modèles permet de ressortir différents facteurs qui influent sur la confiance avant l'interaction (à priori) puis au cours de l'interaction (à posteriori). Ils mettent en évidence la divergence d'opinion parmi les chercheurs sur le sujet de la confiance. Cette divergence se retrouve également dans la manière de mesurer la confiance et les outils de mesure utilisés.

2.2 Confiance dans la conduite automatisée

Dans cette partie nous nous intéressons aux travaux sur la confiance dans le cadre spécifique des véhicules automatisés. Certaines études comme celle de Lazanyi & Maraczi, 2017 explorent la confiance "dispositionnelle" des utilisateurs dans la voiture automatisée. Des jeunes adultes vivant à Budapest et sa banlieue ont participé à cette étude au travers d'un questionnaire en ligne. Les résultats suggèrent qu'une faible part seulement des répondants (15%) ferait confiance à un

véhicule totalement automatisé. La grande majorité présente un niveau de confiance plus bas mais suffisant pour les pousser à essayer la technologie si certaines conditions sont remplies. Parmi ces conditions, les auteurs notent la perception ou le sentiment de contrôle (accès aux freins, pédales, surveillance du système). Aussi, les tâches attribuées à l'automate doivent être les plus ennuyeuses, irritantes (conduite en trafic dense, surveillance de la vitesse) mais aussi les moins complexes (conduite sur autoroute par opposition à une conduite en agglomération). Beggiato et al., 2015 ont de leur côté exploré les besoins en information du conducteur à 3 différents niveaux d'automatisation : mode manuel, mode partiellement automatisé, mode hautement automatisé (selon la classification NHTSA). Les résultats suggèrent que le besoin d'information en mode hautement automatisé est fortement corrélé au niveau de confiance dans la voiture autonome. Plus les participants ont confiance, moins ils ont besoin d'information. De plus, les informations relatives à la supervision du système comme le statut ou encore les actions planifiées du système, la détection de véhicules ont été notées comme plus importantes pour le mode hautement automatisé. Ekman et al., 2018 proposent un modèle (figure 2.9) pour concevoir une interface qui inspire confiance dans une voiture automatisée. Ce modèle est construit autour des événements typiques d'un scénario de conduite et organisé en différentes phases :

- La phase de pré-utilisation où le conducteur teste la conduite autonome pour la première fois
- La phase d'apprentissage qui représente l'utilisation continue
- La phase de performance où l'utilisateur a maîtrisé et est à l'aise avec le système

Selon la phase dans laquelle se trouve l'utilisateur et l'événement qu'il rencontre au cours de son expérience de conduite, différents facteurs peuvent contribuer à la bonne calibration de sa confiance. Ces facteurs, 11 au total, comprennent le modèle mental, le feedback, la réputation du système, les informations du pourquoi et du comment, les informations d'erreurs et d'incertitudes, la personnalisation, l'adaptativité du système, les buts communs, la formation et l'anthropomorphisme.

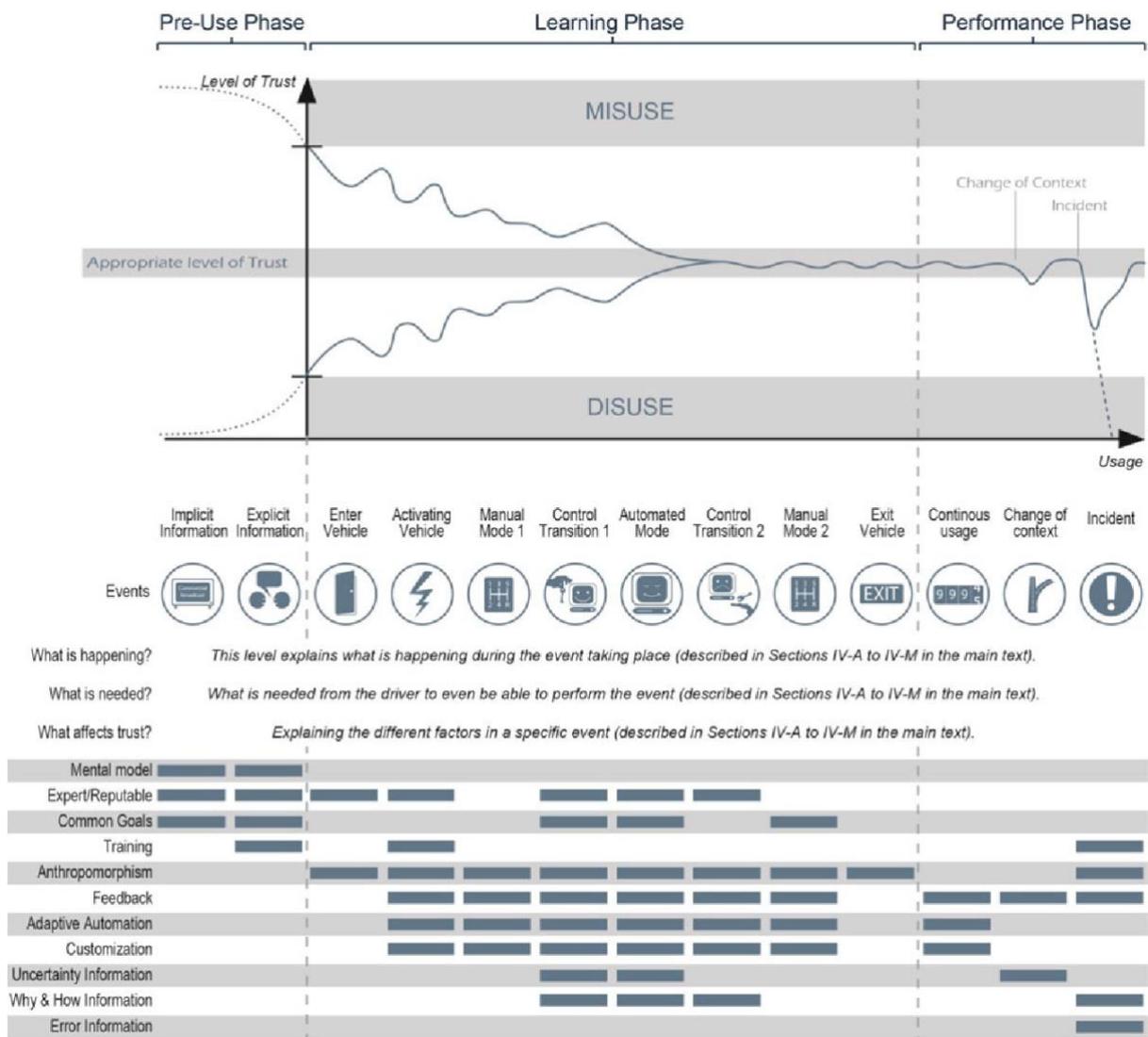


Figure 2.9: Modèle de conception d'une interface basée sur la confiance dans une voiture autonome (Ekman et al., 2018)

Par exemple, l'événement d'activation du véhicule dans la phase d'apprentissage est influencé par les facteurs de réputation du système, de formation, d'anthropomorphisme, de feedback, d'adaptation de l'automatisation, et de personnalisation. De même on peut observer par exemple que le facteur anthropomorphisme est très important dans la phase d'apprentissage car il intervient dans tous les évènements de conduite au cours de cette phase.

2.3 Mesures de la confiance.

De même que sa définition, la mesure de la confiance est très variable selon les études (Hancock et al., 2011 ; K. E. Schaefer et al., 2014 ; Helldin et al., 2013 ; Häuslschmid et al., 2017). En effet, la confiance étant un construit mental qui ne peut qu'être inféré, elle est impossible à observer ou à

mesurer directement. Les outils ainsi que le nombre (une ou plusieurs fois) ou le moment de mesure de la confiance (avant, pendant ou après l'interaction) divergent énormément d'une étude à l'autre. Cependant, trois catégories d'outils de mesure utilisés par les chercheurs se distinguent. Il s'agit des échelles auto-reportées, des mesures comportementales et des mesures physiologiques (French et al., 2018). Les échelles auto-reportées sont les plus répandues et les plus diverses à travers les études. Certains chercheurs utilisent par exemple une échelle comportant une seule question (Haesler et al., 2018 ; Rossi et al., 2018 ; Shu et al., 2018). D'autres réutilisent des échelles issues de la recherche en psychologie (Martelaro et al., 2016 ; Sebo et al., 2019 ; Herse et al., 2018) ou créent des échelles à plusieurs items. Cependant, celles-ci sont spécifiques au contexte de leurs études et sont donc difficiles à réutiliser dans une autre étude (Nordheim et al., 2019 ; Byrne & Marín, 2018 ; Linnemann et al., 2018 ; Waytz et al., 2014 ; Garcia et al., 2015 ; Holthausen et al., 2020). Néanmoins, des efforts de standardisation ont été réalisés et des échelles ont été créées pour s'adapter à une grande variété de cas d'usages et permettre ainsi des comparaisons entre les études (Jian et al., 2000 ; K. Schaefer, 2016 ; Yagoda & Gillan, 2012). Enfin, des outils de mesure plus récents se sont concentrés sur l'intégration des dimensions sociales dans les échelles de confiance (Malle & Ullman, 2021 ; Law & Scheutz, 2021).

Les mesures comportementales ont pour objectif de déterminer de manière indirecte le niveau de confiance de l'utilisateur en se basant sur son comportement d'usage. Dans certaines études, les comportements de fiabilité (reliance) tels que le fait de laisser le contrôle à la machine (Gremillion et al., 2016) ou la diminution du niveau de supervision (Basu and Singhal ,2016 ; Hester et al., 2017) sont considérés comme des indicateurs de confiance. Pour d'autres études (Bindewald et al., 2018) il s'agit plutôt d'observer les comportements de respect (compliance) comme le fait d'accepter un conseil de la machine (Antifakos et al., 2005) ou de changer sa propre décision au profit de celle de la machine Gaudiello et al., 2016). Les comportements de surprise sont également utilisés comme indicateur de confiance (Waytz et al., 2014). Même si les mesures comportementales ont l'avantage de fournir une méthode plus objective et plus stable de mesure de la confiance et peuvent plus facilement être utilisées comme base pour la modélisation et la prédiction (Drnec et al.,2016), il est souvent difficile d'isoler les effets de la confiance sur le comportement des effets d'autres facteurs tels que la charge de travail, le stress ou la fatigue.

Les mesures physiologiques de la confiance bien qu'ayant un potentiel énorme en ce sens qu'elles sont très objectives, sont encore très peu utilisées spécifiquement parce qu'il est très difficile de les relier uniquement à des changements dans le niveau de confiance (Borghetti, Giametta, & Rusnock, 2017). On distingue par exemple la mesure de la réponse électrodermale qui à l'origine mesure le stress mais peut-être étendue à la mesure de la confiance puisqu'un niveau élevé de

stress peut-être signe d'une confiance faible dans un système automatisé (Morris et al., 2017). L'eye-tracking est également utilisée comme mesure de la confiance puisqu'il permet afin de capturer le comportement de supervision de l'utilisateur (Gold et al., 2015 ; Hergert et al., 2016). La mesure de l'activité cardiaque est utilisée en considérant qu'un rythme cardiaque lent durant l'usage est signe d'une confiance élevée dans la machine (Peterson et al., 2017 ; Khalid et al., 2016). Enfin, la mesure de l'activité cérébrale (Devlin, 2013) et l'analyse des zones d'activité du cerveau sont également utilisées (Heironimus et al., 2017 ; Drnex et al., 2016 ; Goodyear et al., 2017)

Dans le cadre de cette thèse, nous avons décidé de mesurer la confiance avec des échelles auto-reportées et une mesure comportementale. Le choix des échelles se base sur le modèle de confiance proposé par Hoff & Bashir, 2015 car ce modèle propose différents facteurs qui influent sur la confiance avant l'interaction et après l'interaction. Notre stratégie consiste à trouver dans la littérature des outils de mesure qui correspondent au contexte de la conduite automatisé et qui intègrent ces différents facteurs.

Les différents modèles présentés dans cette revue de littérature (Partie 2.2) montrent les différents facteurs qui peuvent influencer la confiance au cours d'une interaction Homme-Machine. D'une part, ces différents facteurs sont liés soit à l'opérateur (humain) au système (automate) ou à l'environnement. D'autre part, ils sont différents en fonction du moment de l'interaction. Ainsi, avant l'interaction l'opérateur prend la décision d'utiliser ou non le système en se basant sur sa confiance à priori qui elle-même est formée à partir des facteurs comme l'âge, le genre, la propension à la confiance, la réputation du système et les options qu'elle propose, la difficulté de la tâche et si c'est une tâche personnelle ou demandée par une tierce personne (son employeur par exemple). Au moment de la décision d'utiliser l'automate, l'opérateur possède un modèle mental initial en ce qui concerne le fonctionnement du système. Il va donc débuter son interaction sur la base de ce modèle mental. Les réactions du système et ses erreurs éventuelles vont permettre à l'utilisateur de collecter des informations pour ajuster son modèle mental. La confiance à posteriori s'établit sur la base de ce nouveau modèle mental. Il est donc important que les réactions du système exprimées au travers de son interface permettent à l'utilisateur de se construire un bon modèle mental. Une bonne interface permettra donc de construire un bon modèle mental et donc de bien établir la confiance dans l'automate.

Notre travail se focalise justement sur comment construire cette interface afin qu'elle participe à une bonne construction de la confiance. En se basant sur le modèle proposé par Ekman et al., (2018) nous nous intéressons spécifiquement à la phase d'apprentissage et à l'influence du facteur d'anthropomorphisme sur la confiance.

3. Anthropomorphisme

3.1 Définition

Étymologiquement, “anthropomorphisme” peut se définir comme “forme humaine”. Le mot est composé des deux racines grecques “anthropos” et “morphe” qui signifient respectivement “humain” et “forme” (Duffy, 2003). Il représente selon divers auteurs la tendance des humains à projeter des capacités et traits humaines tels que la personnalité, les sentiments ou la pensée rationnelle (Reeves & Nass, 1996) (Valette-Florence & De Barnier, 2009) ou à attribuer des intentions (Admoni & Scassellati, 2012) à des machines ou des objets inanimés. En conséquence, les machines sont traitées comme des entités (Media Equation Theory) capables de s’engager dans des interactions sociales (Reeves & Nass, 1996). Epley et al., (2007) expliquent cette tendance par le fait que l’attribution de caractéristiques humaines à une machine permettrait de le rendre plus familier, plus explicable et plus prédictible. En effet, la théorie de réduction de l’incertitude (Uncertainty reduction Theory) (Berger & Bradac, 1982) montre que la familiarité est un élément essentiel dans la construction d’une relation entre humains.

Deux types d’anthropomorphisme sont identifiés dans la littérature : l’anthropomorphisme conscient (mindful) et l’anthropomorphisme inconscient (mindless) (Kim and Sundar, 2012). L’anthropomorphisme conscient est défini comme une “croyance sincère et réfléchie qu’une machine possède des qualités humaines” (Nass and Moon, 2000, p.93; Powers and Kiesler, 2006 ; Bartneck et al., 2009). Autrement dit, l’utilisateur, après interaction avec la machine, la juge comme possédant des qualités comme l’intelligence ou la capacité à être conscient de son environnement. A l’inverse, l’anthropomorphisme inconscient est décrit comme une réponse automatique de l’humain face à un stimuli anthropomorphique qui le pousse non seulement à attribuer des caractéristiques humaines mais aussi à sentir la présence de la machine d’où provient le stimuli. Ce type d’anthropomorphisme est expliqué en prenant pour appui théorique le modèle systématique heuristique (Chaiken, 1987) et le modèle MAIN (Sundar, 2008). Kim and Sundar, (2012) expliquent que les stimuli anthropomorphiques lorsqu’ils sont bien exécutés dans l’interface d’une machine déclenchent chez l’utilisateur une heuristique de réalisme et une perception d’activité (agency affordance). La perception d’activité renvoie à la perception de l’existence d’une entité intelligente dans le contexte de l’interaction qui aurait un contrôle sur lui-même et sur l’environnement extérieur à lui (Limerick et al., 2014). Cette perception va à son tour déclencher l’heuristique de la présence sociale. La différence entre les deux types

d'anthropomorphisme est donc la perception présence sociale définit comme le "sentiment d'être en présence d'une autre personne" (Burgoon et al., 2001, p. 2).

Il faut noter également que différentes recherches sont consacrées à la question de savoir si tous les humains sont sujets à l'anthropomorphisme et quels facteurs prédisposent à cette tendance (Waytz et al., 2010 ; Epley et al., 2007; Kääriä, 2017)

3.2 Design anthropomorphique et conduite automatisée.

Selon les définitions de l'anthropomorphisme, il s'agit d'une tendance à percevoir des caractéristiques humaines dans une machine (Reeves & Nass, 1996). Cette perception provient de la personne qui interagit avec la machine qu'il trouve anthropomorphique. Les concepteurs ont donc la possibilité de provoquer cette perception en utilisant dans leur conception des stimuli anthropomorphiques : il s'agit là du design anthropomorphique. Pour Złotowski et al., (2014), le design anthropomorphique consiste à simuler la vie dans des objets inanimés par le design. Pour Schmitz, 2011 il s'agit d'utiliser un objet imitant les attributs humains au sein d'un objet inanimé. Disalvo et al., (2002) définissent le design anthropomorphique comme l'imitation de la forme humaine ou d'une forme naturelle. Fink, 2012 identifie 3 composants du design anthropomorphique dans le domaine de la robotique : 1) La forme du robot, 2) son comportement, 3) ses interactions et communications avec l'humain. Pour Mohd Tuah et al., (2016), le design anthropomorphique constitue l'ensemble des caractéristiques visuelles que l'on donne à un agent. Les éléments de design anthropomorphiques sont régulièrement assimilés dans la littérature aux stimuli sociaux. Dans certaines études, ces stimuli sont subdivisés en trois catégories qui sont les stimuli liés à l'apparence visuelle, les stimuli verbaux et les stimuli non verbaux (Diederich et al., 2020 ; Kulms & Kopp, 2019, Araujo, 2018). Dans d'autres études, quatre catégories sont mises en avant notamment la voix humaine, le langage naturel, le rôle social et l'interactivité (Seyed Esfahani et al., 2020).

Dans le contexte de la conduite automatisée, le design anthropomorphique a été utilisé pour tenter d'augmenter la confiance. Par exemple, (Waytz et al., 2014) ont comparé l'effet de trois interfaces sur la perception d'anthropomorphisme et la confiance dans la conduite automatisée. Les auteurs ont utilisé une interface non anthropomorphique et deux interfaces avec des degrés d'anthropomorphisme différents.

Pour réaliser ces deux concepts d'interface anthropomorphique, les auteurs ont utilisé dans un cas (Agentic) la voix de l'expérimentateur récitant un script à différents moments de l'expérimentation. Le script portait sur une description des fonctionnalités du véhicule, une invitation à l'utilisation du système automatisé et une information sur les événements à venir. La

deuxième interface (Anthropomorphique) a été construite en donnant un nom et une voix féminine au système de conduite. Cette voix récitait le même script que dans la condition Agentic. Les conclusions de cette étude révèlent que les stimuli anthropomorphiques “nom et voix féminine” induisent une meilleure perception d’anthropomorphisme et une meilleure confiance comportementale que le stimuli “voix de l’expérimentateur”.

Häuslschmid et al., (2017) pour leur part ont voulu comparer d’autres types d’interfaces de visualisation à une interface de visualisation anthropomorphique afin de tester l’effet sur la confiance dans la conduite automatisée.



Figure 2.10: Interfaces de visualisation anthropomorphique et non anthropomorphiques pour la voiture autonome (extrait de Häuslschmid et al., 2017)

Dans cette étude, l’interface anthropomorphique consiste en un “chauffeur avatar” caractérisé par une représentation visuelle de type humain “cartoon”, masculin, assis sur une chaise, casquette sur la tête et manipulant un volant (au milieu sur Figure 2.10). Cet avatar est enrichi avec des discours informels pour accentuer son côté sympathique et des comportements non-verbaux comme le sourire, le regard vers le conducteur ou les éléments importants dans l’environnement de conduite (feu de circulation, danger). Les deux autres interfaces de visualisation sont 1) le “monde en miniature” (à gauche ; visualisation en trois dimensions de la scène de conduite incluant l’ego véhicule ainsi que l’environnement autour du véhicule.) et 2) la visualisation basique (à droite ; deux flèches directrices qui indiquent au conducteur si la voiture tourne à gauche ou à droite.) Les résultats de l’étude montrent une différence significative en termes de confiance entre la visualisation “Baseline” et la visualisation “monde en miniature”. Cependant la différence entre la visualisation “chauffeur avatar” et “monde en miniature” n’est pas significative. Une autre étude (Niu et al., 2017) a utilisé le design anthropomorphique pour présenter des informations concernant les manœuvres du système en mode automatisé (Figure 2.11 et 2.12).

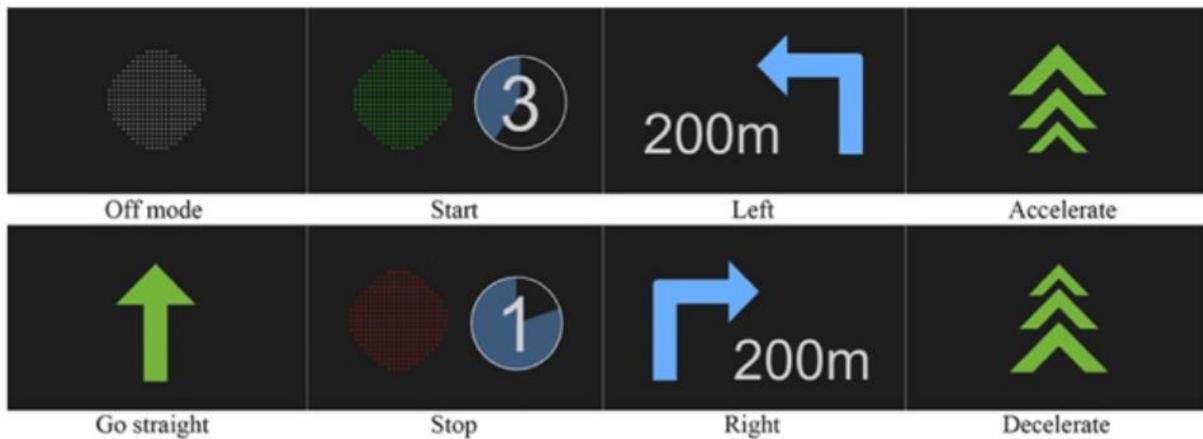


Figure 2.11 Interface symbolique sur les informations de conduite. (extrait de Niu et al., 2017)

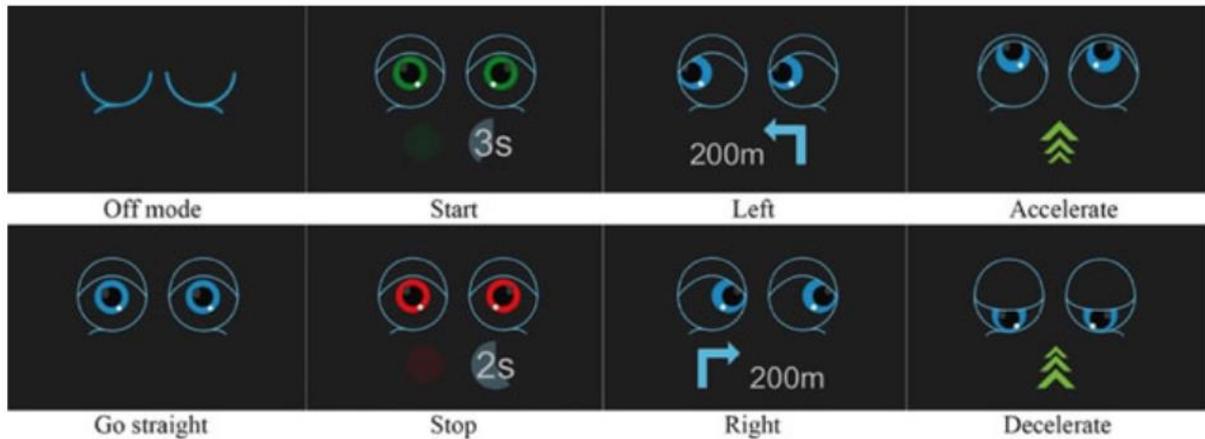


Figure 2.12 Interface symbolique et anthropomorphique sur les informations de conduite. (extrait de Nui et al., 2017)

Cette étude a comparé une interface de type symbolique (Figure 2.11) à une interface de type symbolique et anthropomorphique (Figure 2.12). Concrètement, l'interface symbolique traduit des informations comme le démarrage et l'arrêt, l'accélération ou la décélération, la direction (gauche, droite, tout droit) en utilisant des couleurs et des flèches. L'interface symbolique et anthropomorphique reprend les mêmes informations que celles de l'interface symbolique en utilisant la métaphore des yeux à la place des flèches. Ainsi une paire d'yeux animée est introduite dans l'interface. Cette paire d'yeux effectue des mouvements vers la gauche ou la droite pour signifier la direction. Pour exprimer l'accélération ou la décélération, la paire d'yeux effectue des mouvements vers le haut ou vers le bas. Les résultats de cette étude montrent que l'interface symbolique et anthropomorphique est perçue comme plus anthropomorphique et plus digne de confiance et est plus appréciée que l'interface symbolique.

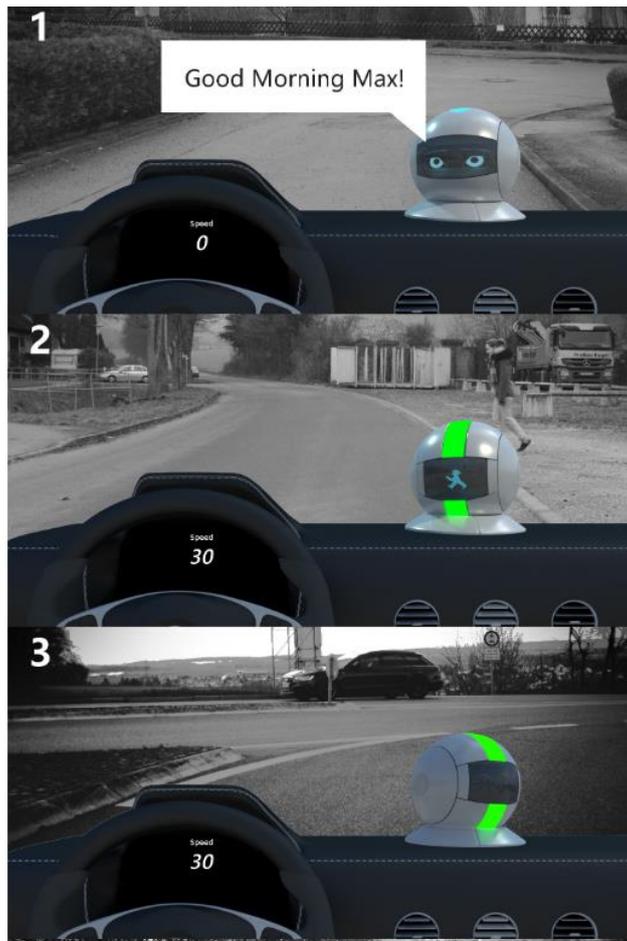


Figure 2.13: Concept "Carvatar" : Avatar utilisant les stimuli sociaux pour mimer le comportement humain en conduite. (extrait de Zihler et al., 2016)

Un autre exemple du design anthropomorphique dans une voiture automatisée est le concept "Carvatar" (Figure 2.13) proposé par Zihler et al., (2016). Ce concept a pour objectif de permettre au conducteur de garder sa conscience de la situation même en mode automatisé. Ainsi, lors d'une demande de reprise de contrôle, le conducteur pourrait d'un coup d'œil sur "Carvatar", comprendre la situation en cours et la stratégie à adopter. Cet avatar a été conçu avec des stimuli sociaux qui miment le comportement humain en conduite. Par exemple, en mode manuel, il a une couleur bleue, fait face et regarde le conducteur lorsqu'il s'adresse à lui (Planche 1, Figure 2.13). En mode automatisé, il se tourne vers la route. Cependant, il possède également un écran à l'arrière lui permettant de transmettre des informations comme la présence d'un piéton (Planche 2, Figure 2.13). Aussi, il effectue des mouvements de rotation pour indiquer sa conscience de l'environnement autour du véhicule. Par exemple, il se tourne vers la gauche pour indiquer la détection d'une voiture venant de la gauche et qui a la priorité (Planche 3, Figure 2.13). Il faut noter que contrairement aux précédents exemples où les auteurs présentaient un concept virtuel,

“Carvatar” dispose d’un stimulus social supplémentaire qui est la présence physique à l’intérieur du cockpit.

La littérature comporte beaucoup d’autres exemples (Forster et al., 2017 ; Large et al., 2019; Kraus et al., 2016; Wintersberger et al., 2016; Aremyr et al., 2019; Yoo et al., 2022; Lee et al., 2019; Antrobus et al., 2018; P. Ruijten et al., 2018) sur le design anthropomorphique comme facteur augmentant la confiance. Cependant, un point commun à ces études est l’usage de stimuli sociaux tels que l’apparence visuelle, la voix et le langage naturel ainsi que les comportements non verbaux dans la conception des interfaces. Ces éléments de design anthropomorphique sont similaires aux éléments utilisés dans la conception d’un type spécifique d’interface: les assistants virtuels (Diederich et al., 2020 p.200 ; Van Pinxteren et al., 2020). Dans la section suivante, nous nous intéressons aux travaux portant sur les agents virtuels notamment en ce qui concerne leur conception et leur impact sur la perception et l’expérience des utilisateurs.

III. Les assistants virtuels

1. Définition

Le premier questionnement qui est soulevé lorsqu’on s’intéresse au sujet des assistants virtuels est évidemment celui de la définition du terme “assistant virtuel”. L’expression “assistant virtuel” est plus largement utilisée dans les écrits non scientifiques où elle désigne deux concepts bien différents. Elle peut désigner un entrepreneur qui offre ses services à distance en utilisant des plateformes digitales. Il s’agit la plupart du temps de services administratifs (secrétariat, organisation de voyage) ou des services spécialisés (marketing, vente, développement logiciel). L’expression “Assistant virtuel” peut également désigner un agent logiciel capable d’effectuer des tâches pour l’utilisateur (donner la météo, organiser un rdv, réserver un billet ou une table de restaurant) de le divertir en interagissant avec celui-ci au travers du langage naturel.

Dans la littérature académique, le terme le plus utilisé (et que nous allons souvent employer dans cette partie) est “agent”. Diverses définitions ont été proposées pour le terme “agent”.

Ingham, 1999 définit “agent” comme une entité autonome, proactive ou réactive et temporellement continu. Pour cet auteur, il est possible de qualifier d’autonome un agent qui opère tout seul sans intervention extérieure et qui décide quand demander une opinion extérieure. Il est proactif quand il a été conçu pour réaliser un but précis et peut donc prendre des initiatives. A l’inverse, il est réactif quand il est déclenché par un type d’événement précis. La continuité dans le temps représente l’état de l’agent à un instant donné. Il peut être en exécution,

en fin d'exécution ou suspendu mais dans ce dernier cas l'état avant suspension doit être enregistré afin que l'agent puisse le recréer une fois redémarré. Franklin & Graesser, 1996 ont tenté de différencier les agents autonomes des programmes logiciels en général. Ils définissent les agents autonomes comme étant des systèmes intégrés dans des environnements qu'ils peuvent évaluer et sur lesquels ils peuvent agir en suivant leur propre but. Ces auteurs proposent une classification des agents autonomes en utilisant les propriétés de réactivité, d'autonomie, d'orientation tâche, de temporalité continue, de communication, de mobilité, de flexibilité et d'adaptabilité et de personnalité. Le projet Robolaw (*RoboLaw*, s. d.), achevé en 2014 et cofinancé par la commission européenne, visait à établir des lignes directrices permettant aux autorités judiciaires de traiter les problèmes éthiques et légaux soulevés par l'usage des robots de toute sorte (du plus petit programme jusqu'à l'IA la plus sophistiquée). Une classification est proposée dans le rapport du projet permettant de distinguer les robots. Cette classification se base sur plusieurs critères, à savoir : la tâche pour laquelle le robot a été conçu (industrielle ou services), l'environnement dans lequel opère le robot (physique ou virtuel), sa nature (physiquement matérialisé ou virtuel), son style d'interaction incluant les interfaces, les modes d'interaction, la relation humain-robot et enfin son autonomie désignant son degré d'indépendance et sa capacité à prendre des initiatives et des décisions en dehors de tout contrôle d'un superviseur humain. Luger & Sellen, 2016 proposent une catégorisation des systèmes de dialogues mimant le comportement humain en se basant sur des critères proposés par Wilks, 2010. Ainsi les agents conversationnels sont distincts des chatbots parce que les premiers sont conçus pour des tâches spécifiques (planifier une réunion, réserver une table de restaurant) et les seconds miment simplement une conversation sans connaissance particulière ou historique de l'utilisateur ; ces deux catégories sont à différencier des compagnons virtuels. Un compagnon virtuel est un agent conversationnel qui n'est pas conçu pour une tâche spécifique et qui peut tenir une conversation avec l'utilisateur sur une très longue période. Il est dédié à un utilisateur spécifique et possède donc une quantité importante d'informations personnelles sur celui-ci. Ainsi, il est capable de construire une certaine relation avec son utilisateur principal (Wilks, 2010). Rosenthal-von der Pütten et al., (2009) ont étudié les différents termes utilisés pour qualifier les agents virtuels et concluent que la distinction fondamentale repose sur la manipulation de l'agent. Concrètement un avatar est une représentation virtuelle dont les gestes et les actions dans le monde virtuel sont produites et contrôlées par un humain dans le monde physique. A l'inverse, un agent virtuel indépendant peut être qualifié d'autonome lorsqu'il n'est contrôlé par aucune entité extérieure.

Nous pouvons retenir de la littérature que différents termes sont employés, le plus souvent en tant que synonymes, pour désigner les assistants virtuels (assistant digital/virtuel, assistant personnel intelligent, aide, agent conversationnel, robot, programme, IA, chatbot, avatar, caractère virtuel). Deux notions importantes sont également mises en évidence. La première est que le but principal de ce type d'interface est d'assister l'utilisateur dans l'accomplissement d'une tâche ou la réaliser entièrement à sa place. Il est important de mentionner ici qu'en l'absence de fonctionnement de cet assistant, l'humain est capable de reprendre la tâche tout seul et de la compléter sans l'aide de l'automate. La seconde est la notion de virtualité, qui souligne le caractère digital de ce type d'interface. Cette notion traduit le fait qu'il s'agit en réalité de logiciels conçus pour interagir avec l'utilisateur comme le ferait un humain.

2. Assistants virtuels dans l'industrie automobile

Les assistants virtuels les plus connus de notre époque (SIRI, Google Assistant, Alexa, Cortana) sont ceux que l'on peut retrouver sur nos smartphones, tablettes et enceintes connectées. Ces assistants ont été adaptés au contexte de la conduite sous forme d'applications mobiles (Apple Car Play, Google Assistant Driving Mode) dans le but d'accompagner le conducteur dans sa tâche de conduite et de lui faciliter l'accès aux tâches secondaires (musique, appels, messages). Une étude réalisée par Intel^{1 2} démontre que lorsqu'un assistant virtuel est ajouté à l'interface d'un véhicule, les utilisateurs possédant déjà un assistant virtuel, soit sur leur téléphone ou sur une enceinte connectée, s'attendent à retrouver les mêmes fonctionnalités dans leur véhicule. Aussi, les participants à cette étude ont mentionné le besoin de pouvoir converser avec l'assistant virtuel présent à bord de la même manière que l'on pourrait converser avec un chauffeur humain. Les constructeurs automobiles en collaboration avec des entreprises technologiques ont donc proposé leur version d'un assistant virtuel de conduite (Majji & Baskaran, 2021). Ce sont notamment les concepts PIVO 2007 ou IDS 2018 de NISSAN, NOMI du constructeur chinois NIO, CHRIS de German Autolabs, Speak de chez Garmin, HANA de HONDA, Hey BMW, Hey Mercedes, Volkswagen, ...etc.

Avec l'essor des voitures automatisées, les assistants virtuels font partie des interfaces et technologies que l'on peut s'attendre à voir dans ce type de véhicules (Lugano, 2017) (Walch et al., 2015). Cependant, les concepts évoluent notamment en ce qui concerne le rôle qui est attribué

¹<https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/white-papers/trust-autonomous-white-paper-secure.pdf>

² <https://vimeo.com/intelpr/review/230837047/88f521d00e>

à ces assistants (Ajitha & Nagra, 2021) (Okamoto & Sano, 2017). L'usage d'intelligence artificielle dans la conception de ce nouveau type d'assistants permet de "monitorer" le conducteur, d'analyser ces émotions et ces états de fatigue afin d'adapter l'expérience de conduite (READ en collaboration avec KIA et le MIT). Ils offrent également une fonction d'ange gardien pour surveiller l'environnement extérieur et éventuellement réagir à la place du conducteur en cas de danger qu'il n'aurait pas vu venir (DRIVE IX chez NVIDIA, Dragon Drive chez Nuance). La fonctionnalité la plus récente concerne l'incarnation de la tâche de conduite (YUI de TOYOTA) et l'accompagnement dans la transition entre les modes automatisé et manuel (AUTOPILOT de TESLA). Les tableaux 2.1 et 2.2 nous permettent de catégoriser ces différents assistants en fonction des rôles pour lesquels ils ont été conçus mais également de voir les différentes stratégies utilisées pour les intégrer.

Rôles	Assistants correspondant (présents sur le marché ou concepts)
Infotainment et Divertissement	NIO Nomi, Chris, Android Auto, Apple Carplay, Echo Auto, GA Driving Mode, IBM Cognitive Companion, Cortana Nissan/BMW, Hound Hyundai/Kia
Aide à la transition de mode et réassurance	Toyota YUI, Tesla Autopilot
Driver Monitoring, Analyse des émotions, Adaptation de l'expérience	Nuance & Affectiva, Kia & MIT, NVIDIA Dragon Drive, HONDA HANA
Santé et Bien-être	Mercedes Fit
Ouverture sur l'IOT	Ford Alexa, Hyundai
Fonctions liées à la voiture	Mercedes, Hyundai

Tableau 2.1 : Rôles des assistants virtuels automobiles.

Technique d'intégration	Assistants ou concepts sur le marché
Assistant intégré directement au véhicule dès sa conception	Nomi, YUI, Tesla Autopilot, HANA, Mercedes
Assistant intégré via un smartphone	Apple Car Play, Android Auto, GA Driving Mode
Assistant intégré en ajoutant un dispositif dédié	Echo Auto, Chris, Garmin Speak, Amazon Echo

Tableau 2.2 : Les 3 stratégies d'intégration des assistants automobiles

Nous avons également identifié quelques concepts particuliers qui poussent à la réflexion. Le concept d'assistant virtuel présenté par BMW en 2018 propose d'intégrer 3 assistants virtuels différents selon les rôles à remplir. "Hey BMW" est dédié à toutes les fonctionnalités liées à la voiture, Alexa pour les fonctionnalités de divertissement, Cortana pour les fonctions de productivité. Ce concept pose la question de la gestion et de l'harmonie entre ces différents assistants en termes de personnalité, de voix. Du point de vue de l'utilisateur, une possible confusion est à craindre. Le concept "CHRIS" de German AutoLabs est aussi particulier en ce sens qu'il a été conçu comme un "Assistant central" dont le rôle est de gérer tous les autres assistants aux fonctions plus spécifiques qui seraient intégrées au véhicule. Ce concept pourrait permettre de faciliter la personnalisation de l'expérience de conduite simplement en ajoutant un assistant spécifique qui serait géré par l'"Assistant central".

3. Perception et interactions

Les agents virtuels sont utilisés dans divers contextes y compris l'automobile. Dans cette partie, nous tentons de comprendre comment les utilisateurs perçoivent ces agents, leurs attentes ainsi que les expériences qu'ils ont pu avoir avec ce type d'interface. Nous nous intéressons également aux différents facteurs utilisés dans la conception des agents virtuels et à l'impact de chacun de ces facteurs sur les médiateurs relationnels comme la confiance, la préférence, la satisfaction. Luger & Sellen, (2016) ont réalisé des interviews avec des utilisateurs réguliers d'agents conversationnels afin de déterminer les facteurs qui affectent leurs interactions et expériences avec ce type de technologie. Les participants à cette étude possédaient l'un ou plusieurs des agents conversationnels Siri, Cortana et Google Now (actuellement Google Assistant). Notons que ces

travaux ont été réalisés avec la version disponible de ces agents au moment de l'étude (Novembre 2014- Février 2015). Parmi les raisons évoquées pour l'utilisation de ces agents, on distingue le besoin de gagner du temps en combinant plusieurs tâches (planifier un vol pendant qu'on cuisine par exemple), surtout quand les mains sont occupées sur cette autre tâche. Le besoin d'augmentation de mémoire (demander à l'agent de mémoriser des informations et d'effectuer des rappels quand c'est nécessaire) a également été soulevé.

En analysant les retours d'expériences fournies par les participants, les auteurs constatent un écart sensible entre les capacités techniques et technologiques d'un agent conversationnel et les attentes des utilisateurs. Ces derniers s'attendent à une entité dotée d'une certaine intelligence et d'excellentes capacités de communication (parfaite compréhension du langage naturel et du contexte). Les utilisateurs s'attendent également à ce que l'agent conserve une compréhension contextuelle entre deux interactions. Néanmoins, les participants s'identifiant comme technophiles mentionnent avoir des attentes plus réalistes quant à "l'intelligence" de l'agent et à ses capacités, ce qui implique une meilleure tolérance des éventuelles erreurs. Toujours sur le sujet des attentes utilisateurs, Dautenhahn et al., (2005) ont réalisé une étude sur les robots en environnement domestique. Sur la base de questionnaires, ils ont recueilli les avis suivants : 1) les utilisateurs conçoivent parfaitement l'idée de disposer d'un robot chez eux jouant un rôle d'assistant en général. 2) Très peu de participants perçoivent le robot domestique comme un ami ou un confident. 3) Ils imaginent très bien un tel robot dans un rôle de servent (pour les tâches ménagères, le divertissement, l'entretien du jardin...etc.) mais sont plutôt contre le fait qu'il lui soit confié la garde d'enfants ou d'animaux. 4) La majorité des participants ont noté qu'une apparence et un comportement humain de la part d'un tel robot était de moindre importance mais une communication "humaine" est fortement souhaitée.

En ce qui concerne l'interface des agents virtuels, des chercheurs ont tenté de déterminer l'impact de certaines caractéristiques visuelles sur la perception des utilisateurs. C'est le cas de l'étude de Lemoine & Cherif, (2012) qui a montré que la confiance des consommateurs sur les sites internet semble être impactée par deux critères : "l'intelligence artificielle des agents et leurs caractéristiques anthropomorphiques (gestuelle, tenue vestimentaire, politesse, personnalité, postures, etc.). A ce propos, Van Pinxteren et al., (2020) proposent une taxonomie qui classe en trois catégories les caractéristiques de l'interface d'un agent virtuel qui impactent la perception des utilisateurs et notamment les médiateurs relationnels tels que la confiance, la satisfaction ou la préférence : il s'agit des facteurs liés à l'apparence ou la représentation visuelle de l'agent, les facteurs liés à la communication verbale et non-verbale. Nous nous intéresserons dans les prochaines sections aux travaux portant sur chacun de ces facteurs.

3.1 Représentation visuelle d'un agent virtuel

Lorsqu'un concepteur est confronté à la décision de la représentation visuelle d'un agent virtuel, il peut se demander avant tout s'il est nécessaire de donner une apparence visuelle à cet agent. Yee et al., (2007) ont montré dans une étude que l'apparence visuelle est essentielle pour une interaction fluide, mais que le niveau de réalisme de cette apparence a peu d'importance. Blow et al., (2006) ont souligné les différents avantages à utiliser un visage dans la représentation d'un robot. Tout d'abord, un visage permet de donner au robot des expressions faciales qui sont un moyen de communication facilement compréhensible par les humains (Breazeal, 2002). Il peut ainsi avoir l'air sympathique ou intimidant selon son rôle, manifester des émotions comme la joie, la surprise, la colère selon les situations. Il sert également de point focal et de repère pour l'utilisateur au cours de l'interaction. Un visage est également une occasion pour l'utilisateur d'avoir des indices sur les capacités du robot. Par exemple, un visage d'enfant sur un robot suggérerait des capacités cognitives d'un enfant (Billard, 2005). Cependant, des inconvénients existent également quant à la réalisation d'une représentation visuelle surtout quand il se base sur le modèle humain. Premièrement, il est très difficile d'obtenir un niveau de réalisme idéal et de créer des expressions et émotions réalistes sans tomber dans la vallée de l'étrange (Mori et al., 2012). Deuxièmement, les coûts de réalisation peuvent être élevés.

Une fois que la décision de représenter visuellement un agent virtuel a été prise, plusieurs questions se posent notamment en ce qui concerne le type d'apparence visuelle et le choix des éléments composants cette apparence visuelle.

De manière générale, les caractéristiques visuelles basées sur le modèle humain sont positivement perçues par les utilisateurs (Broadbent et al., 2013 ; Nowak et Rauh, 2005). Cependant, pour obtenir ces effets positifs, il est important que le rôle et le comportement de l'agent soit cohérent avec les attentes induites par son apparence (Luo et al., 2006 ; McBreen et Jack, 2001). De plus, la réalisation de la représentation humaine doit être menée avec précaution pour éviter la vallée de l'étrange et la mauvaise appréciation des utilisateurs Mori et al., 2012. Les caractéristiques d'apparence visuelle comme le genre ou l'ethnie ont des effets positifs sur les médiateurs relationnels (Paiva et al., 2005) lorsqu'ils sont utilisés de manière à mimer le genre ou l'ethnie de l'utilisateur (Qiu et Benbasat, 2010) et que celui-ci parvient à s'identifier à l'agent (Kim et al., 2012). Cependant, il existe une contradiction dans la littérature sur la caractéristique du genre puisque certaines études font état d'une préférence pour les agents de même genre et d'autres rapportant l'inverse (Qiu et Benbasat, 2010 ; Nowak et Rauh, 2005). Powers et al. (2005) pensent que cette contradiction provient du rôle important que jouent les persona dans une

interaction humain-Agent. En effet, ils affirment que le genre du robot, tel qu'il est déduit de l'apparence, active un persona qui, à son tour, affecte les perceptions de l'utilisateur.

Outre les études sur la représentation de type humaine en général, certains chercheurs se sont penchés sur l'étude des caractéristiques du visage d'un agent. Ainsi, dans une étude sur les visages de robots physiques, Disalvo et al., (2002) montrent que le nez, la bouche, les paupières, et la largeur de la tête sont les attributs essentiels du visage qui confèrent une impression d'humanité à ces robots. Une autre étude (Kalegina et al., 2018) a tenté de répondre à deux questions sur la formalisation des visages de robots présentés sur écran. A partir d'un échantillon de 157 visages de robots les auteurs ont défini 76 propriétés différentes (yeux, nez, oreilles, bouche, iris, paupières, pupilles, couleur des yeux, espacement entre les yeux...etc) caractérisant le design des visages de robots. Deux questionnaires ont été réalisés : le premier pour comprendre la perception des visages de robots sur écran; le second pour déterminer l'impact de la présence ou non de différents éléments du visage sur la perception de ces robots en termes de préférence et de confiance. Dans le premier questionnaire 12 images de robots (figure 2.14) ont été sélectionnées à partir de l'échantillon en fonction de leur niveau de réalisme. Le niveau de réalisme est déterminé sur la base du nombre de caractéristiques présentes ou non sur ces visages (yeux, bouche, oreilles etc...) Les participants devaient noter chacune de ces images sur 6 échelles sémantiques différentielles de 5 points (Amicalité, Intelligence, Confiance, Ressemblance à l'humain, Âge, Genre, et Préférence Globale).



Figure 2.14: Échantillon de robots utilisés dans le premier questionnaire (Image extraite de Kalegina et al., 2018)

Les résultats de ce premier questionnaire montrent que :

- Amicalité : Les robots présentant un **niveau de détail relativement élevé** (R6, R8, R10) ont été classés comme **plus amicaux** tandis que ceux avec le **moins de détail** sont considérés comme les **plus hostiles** (R1, R2 qualifié de robot en colère)
- Intelligence : Les robots classés comme les plus intelligents sont R10 et R2 et les moins intelligents (à ne pas confondre avec inintelligent) sont R7, R8, R9
- Confiance : R9 et R10 ont été classés comme les plus dignes de confiance tandis que **R2** a été classé comme le **moins digne de confiance**. R2 a reçu des **qualificatifs comme agressif, colérique, méchant** de la part des participants. Les auteurs pensent que cette perception serait **due à la forme allongée de ses yeux et à l'absence de pupille**.
- Ressemblance à l'humain : R10 a été classé comme le plus humain et R1 le moins humain. Une **forte corrélation entre le niveau de réalisme et la ressemblance à l'humain** a été observée. Autrement dit plus le robot est réaliste (+ de caractéristiques) plus il est classé comme ressemblant à l'humain. Cependant, le robot R12 qui est théoriquement plus détaillé que le R10 a été classé moins ressemblant à l'humain. Les auteurs pensent que cela pourrait être dû à la taille et l'orientation des écrans influant ainsi la perception des participants. R10 ressemblant à un humain portant un casque pendant que R12 est une tête humaine flottant sur un écran.
- Âge : Les robots R6, R8, R9 ont été qualifiés "d'enfantins" (ces 3 robots présentent des yeux très détaillés et un sourire) tandis que R11 et R12 de matures.
- Genre : Outre les robots explicitement masculins comme R11 et explicitement féminins comme R10 et R12, le robot **R2** a été classé comme **masculin (peut-être dû** selon les auteurs à son **apparence agressive et colérique**, caractéristiques souvent attribués au mâle dans la culture occidentale). Les robots R8 et R9 ont été classés comme **féminins** (R9 a souvent reçu le qualificatif de **robot rose**).
- Préférence globale : Les robots les **plus appréciés** R6 et R10 sont également ceux qui ont été classés comme plus **amicaux**. Les robots les moins appréciés sont R1, R11 et R12. Le classement du R1 peut s'expliquer par le fait que les participants avaient du mal à y voir un visage (1 seul œil). Les classements des robots R11 et R12 ont été influencés par l'effet de la vallée de l'étrange selon les auteurs. Ils sont souvent qualifiés de trop humains et terrifiants.

Les participants ont également répondu à une autre question concernant les rôles possibles de ces robots selon leur apparence. Les robots les plus choisis pour un contexte d'éducation (R6 et

R9) ont été décrits comme convenant aux enfants. On observe également un rapprochement entre les choix de représentation pour les contextes d'éducation et de divertissement.

Le robot classé comme le moins amical a été souvent sélectionné pour des rôles de sécurité alors que les robots R10 et R6 pour des rôles de service. Globalement les robots avec le moins de réalisme et de détails ont été choisis pour des tâches industrielles et de sécurité.

Le second questionnaire suit la même méthodologie que le premier. La différence se trouve dans l'échantillon de robots choisi pour ce questionnaire (figure 2.15). A la place des robots de l'échantillon initial, ceux-ci ont été générés à partir d'un robot "baseline" décliné en plusieurs versions grâce à l'ajout ou le retrait de certaines caractéristiques du visage (couleur des yeux, oreilles, nez, sourcils, cheveux etc.).

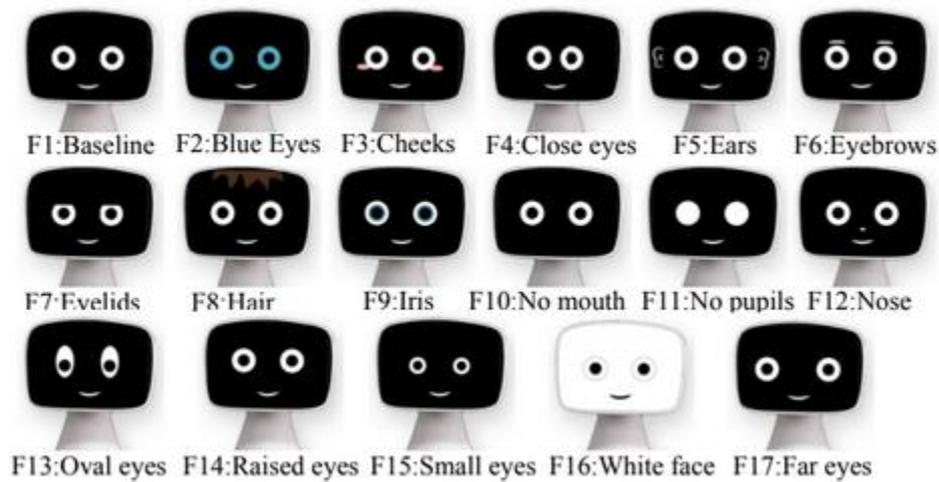


Figure 2.15: Échantillon de robots pour le second questionnaire (Image extraite de Kalegina et al., 2018)

Les résultats montrent que :

- Amicalité : Aucun robot n'a été considéré comme significativement plus amical que la baseline mais les robots **sans bouche et sans pupille** ont été classés comme **les plus hostiles**.
- Intelligence : Le robot avec les sourcils a été classé comme le plus intelligent alors que les robots **sans bouche, avec des pommettes, et un espace réduit entre les yeux ont été classés comme moins intelligents**.
- Ressemblance à l'humain : Les visages notés comme plus humains sont ceux avec les oreilles, les cheveux, l'iris, le nez, les sourcils, en accord avec les recommandations de Disalvo et al., (2002). Les robots notés comme les plus "machine-like" sont ceux sans bouche et sans pupille. Le robot sans bouche a été perçu comme sans émotion. Les auteurs

soulignent le fait que ce robot étant le seul sans bouche dans l'échantillon peut avoir eu un effet sur cette perception très négative des participants.

- Confiance : Aucun visage n'était plus digne de confiance que la baseline. Cependant ceux sans bouche, sans pupille et avec des paupières précédemment notées comme moins amicaux ont également été désignés comme moins dignes de confiance. Le robot sans pupille a souvent été qualifié de terrifiant et celui avec des paupières comme sournois et suffisant.
- Age : Par rapport à la baseline, les robots avec des pommettes, un nez, des cheveux, un petit espace entre les yeux, ont été perçus comme plus enfantins. Le robot avec des sourcils a lui été perçu comme significativement plus mature que la baseline. Ces résultats sont en cohérence selon les auteurs avec la littérature sur l'évolution biologique (Krämer et al., 2007) qui détermine que les caractéristiques infantiles comme une large tête, une petite bouche, de larges yeux provoquent des réponses de "nurturing" chez les participants. Une autre étude (Kopp et al., 2005) souligne qu'un petit nez est souvent considéré comme un indicateur de l'enfance.
- Genre : Le robot conçu avec les pommettes (représentées par un trait rose) et le robot avec un visage blanc ont été qualifiés comme plus féminins. Les auteurs expliquent ce résultat par le fait que ces deux robots possèdent des caractéristiques souvent attribuées aux femmes (pommettes roses et visage blanc pouvant s'expliquer par le fait que les femmes sont biologiquement programmées pour avoir la peau plus claire que les hommes.)
- Préférence globale : En termes de préférence globale aucun robot n'a été plus apprécié que la baseline. Cependant les robots sans bouche, sans pupille, avec un visage blanc, avec paupières, avec pommettes et avec des petits yeux ont été jugés moins appréciables que la baseline

En ce qui concerne les rôles (Figure 2.16), les représentations présentes dans cet échantillon ont été le plus souvent rangées dans la catégorie divertissement et moins souvent pour dans la catégorie industrielle. Les représentations classées comme hostiles et non appréciables ont souvent été choisies pour des rôles liés à la sécurité. Les robots choisis pour la catégorie divertissement étaient les robots avec un nez, iris, et un espacement large entre les yeux. Le robot le plus choisi pour la catégorie éducation est celui avec les oreilles.

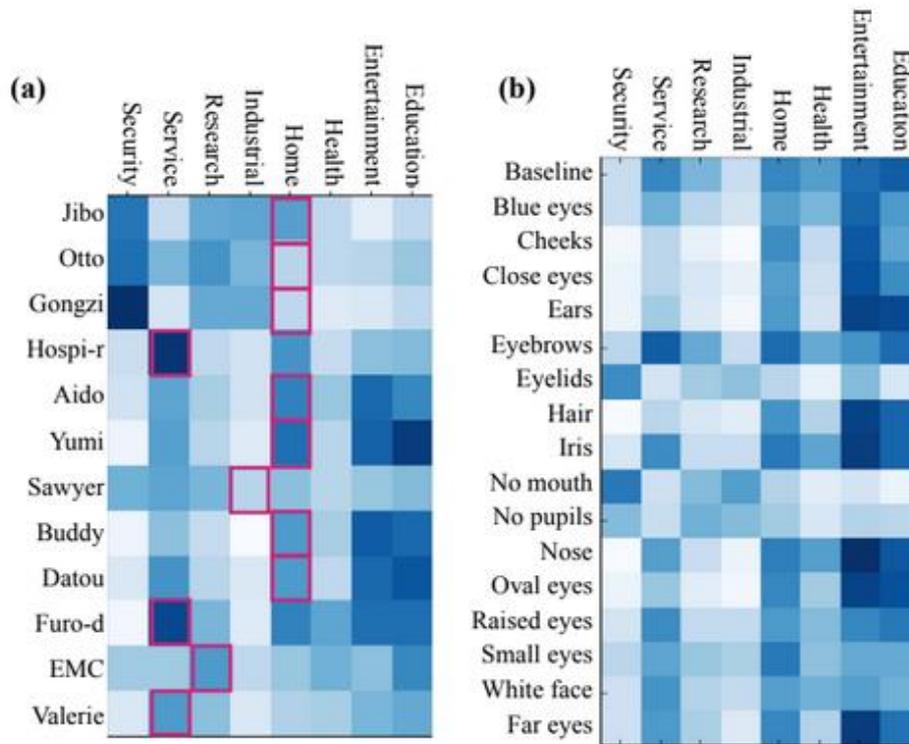


Figure 2.16 : Correspondance des attributs du visages des robots avec des rôles spécifiques (Kalegina et al., 2018).
 (Plus la couleur bleue est foncée, plus le robot a été associé au rôle correspondant)

En résumé, nous pouvons retenir de cette étude que les caractéristiques du visage d'un robot influencent grandement la perception que l'utilisateur en a ainsi que le rôle que peut tenir ce robot. Ainsi les éléments comme une pupille, une bouche, lorsqu'ils manquent sur un visage de robot peuvent donner une impression d'hostilité et de froideur. Ce type de robot sera relégué à des tâches de sécurité (surveillance) par exemple. En revanche, des éléments comme un sourire ou un large espacement entre les yeux peuvent donner un caractère enfantin à un robot et le faire catégoriser dans des rôles d'éducation et de divertissement. Un point important à prendre en compte est le caractère statique des images présentés aux participants ce qui a potentiellement influencé leurs perceptions et donc leurs réponses.

Une autre dimension importante à prendre en compte lors de la réalisation d'une représentation visuelle d'un agent est le caractère physique de cette représentation. Autrement dit, est-il nécessaire que l'agent soit présent physiquement dans l'environnement de l'utilisateur au lieu d'une présence virtuelle sur un écran par exemple. Certaines études révèlent que lorsque l'agent virtuel est physiquement présent et peut être touché par l'utilisateur (Bainbridge et al., 2008) l'impact sur les médiateurs relationnels était positif. Les robots semblent donc avoir un avantage sur les avatars et les chatbots grâce à leur incarnation physique. C'est ce que montre l'étude de K.

Lee et al., (2006a) qui ont tenté de comprendre si les robots sociaux représentés physiquement sont meilleurs que leurs équivalents virtuels. Le robot AIBO (meilleur robot social sur le marché au moment de l'étude) a été utilisé sous deux versions différentes : la version physique du robot et une version virtuelle (réalisée à base d'enregistrements). Il ressort de cette étude que la représentation physique d'un agent impacterait positivement sa présence sociale, et l'évaluation de l'interaction par l'utilisateur. Nous pouvons également retenir de cette étude que, pour les robots sociaux dont le rôle principal est de créer du lien avec les utilisateurs, la représentation physique et l'interaction tactile sont d'une grande importance. Cela est particulièrement vrai pour les personnes isolées qui développent des réponses positives à ce type de robot.

3.2 Communication verbale et non verbale d'un agent virtuel

La communication d'un agent virtuel regroupe l'ensemble des caractéristiques verbales et non verbales que l'on retrouve dans son interaction avec l'utilisateur. Concrètement il s'agit du style de communication verbale et des différentes composantes non verbales telles que la posture, les gestes, la manifestation d'émotions, le ton et le débit de la voix de l'agent etc. Plusieurs études ont été réalisées sur le sujet et permettent de tirer les conclusions qui suivent.

En ce qui concerne la communication verbale, la politesse, l'humour et la capacité à échanger des banalités influencent positivement les médiateurs relationnels comme la confiance ou l'appréciation. Par exemple, Holtgraves et al. (2007) ont constaté que les agents qui utilisent le prénom de leur interlocuteur comme forme de politesse sont perçus comme plus compétents. C'est également le cas dans l'étude de Strait et al. (2014) où un robot qui utilisait un discours poli a été perçu comme plus prévenant et plus sympathique qu'un robot qui n'avait pas ce style de communication. Cependant, la politesse doit être utilisée à juste dose. En effet, Wilks, (2010) présente une analyse des interactions entre humains et "compagnons" virtuels qui montre que l'excès de politesse et les répétitions sont perçus négativement par les utilisateurs.

L'utilisation de l'humour par les agents conversationnels a les mêmes effets positifs que la politesse à condition d'être correctement employé (Mirnig et al., 2017). Dans l'étude de Sjöbergh et Araki (2009) les participants trouvaient qu'une blague était plus drôle racontée par un robot que lue par eux-mêmes. C'est également le cas dans une étude réalisée par Niculescu et Banchs (2019), où on remarque qu'un chatbot racontant des faits amusants est plus apprécié qu'un autre chatbot qui n'utilise pas l'humour. Les effets négatifs de l'humour ont été constatés dans certaines études comme celle de Tay et al. (2016). Ici, les blagues non désobligeantes sont plus appréciées lorsqu'elles sont racontées par un humain que par un robot. L'inverse en revanche n'est pas vrai.

Les blagues désobligeantes sont perçues comme moins offensantes lorsqu'elles sont racontées par un robot.

Cassell et Bickmore (2003) ont découvert que la capacité à échanger des banalités (small talk) est un facteur qui encourage la confiance dans les avatars, mais uniquement pour les utilisateurs extravertis.

Enfin, la stratégie de gestion des erreurs peut être un bon moyen d'encourager une interaction positive entre un robot et son utilisateur. Lee et al. (2010) ont démontré que lors d'une panne, les excuses présentées par le robot contribuaient à réduire l'impact négatif de l'erreur sur la perception du robot. Cependant, cette stratégie ne fonctionne qu'avec les utilisateurs ayant une tendance relationnelle. Pour ceux ayant une tendance plus pragmatique, la proposition d'une compensation fonctionne mieux. Tzeng (2004) a également trouvé que les agents qui s'excusent de leurs erreurs sont perçus comme plus sensibles et moins mécaniques.

Les comportements non verbaux qui impactent positivement la perception d'un agent regroupent les expressions faciales, les comportements d'écoute active, la gestuelle et la posture du corps. Par exemple, Kanda et al. (2007) ont montré qu'un robot qui hoche la tête et établit un contact visuel lorsque l'utilisateur s'adresse à lui est évalué plus positivement (Gratch et al., 2007) qu'un autre robot qui n'affiche pas ce type de comportements. Il a été démontré que les utilisateurs féminins évaluent positivement l'intelligence, l'amabilité et la sympathie d'un agent qui donne des réponses rapides au cours d'une interaction (Kaptein et al., 2011). Pour Cowell et Stanney (2005) les expressions faciales sont le facteur essentiel pour un agent qui inspire confiance. En effet, ils ont constaté qu'un avatar capable d'afficher des expressions faciales inspirait plus confiance aux utilisateurs qu'un avatar qui n'avait pas ces comportements non verbaux.

En ce qui concerne la gestuelle des agents, Van den Brule et al. (2014) ont démontré que les gestes effectués par un robot, s'ils sont prédictifs du comportement du robot, renforcent la confiance de l'utilisateur. Krämer et al., (2007) ont évalué l'impact de gestes auto-tactiles (se gratter) et le lever de sourcils sur l'évaluation de l'interaction par l'utilisateur. Ils ont utilisé pour cette étude l'agent conversationnel Max développé par l'Artificial Intelligence Group de l'université de Bielefeld (Kopp et al., 2005). Les participants à cette étude ont évalué positivement les gestes auto-tactiles et négativement le lever de sourcils.

On peut constater que la majorité des comportements non verbaux des agents sollicitent le visage ou le haut du corps. Pour Pejsa et al., (2015), les mouvements des yeux et de la tête permettent à un avatar de transmettre plus d'informations et d'établir une relation de confiance avec

l'utilisateur. D'ailleurs, Stanton et Stevens (2014) ont constaté qu'un robot qui effectue des mouvements du regard augmentait la confiance des utilisateurs lorsque le robot aidait à effectuer une tâche difficile. Les mouvements du haut du corps quant à eux, permettent à l'avatar d'attirer l'attention de l'utilisateur et de le diriger dans l'environnement. Cela suggère que, contrairement aux mouvements de la tête et du visage, les mouvements du corps n'impactent pas les médiateurs relationnels. La spontanéité est également un facteur qui peut impacter positivement la perception d'un agent. En effet, les travaux de Salem et al. (2011) ou encore Groom et al. (2009) montrent que les utilisateurs apprécient plus l'avatar lorsque ses mouvements sont synchronisés avec son discours à certains moments et désynchronisés à d'autres moments. Cela semble indiquer que des gestes inattendus induisent des perceptions positives de l'agent. Toutefois, la mise en œuvre de telles fonctionnalités doit être effectuée avec précaution, car l'incongruence des gestes avec le discours peut entraver la performance des utilisateurs (Salem et al., 2013).

De même que pour la représentation visuelle, la caractéristique du genre présente une divergence dans les résultats en ce qui concerne les comportements non verbaux. Par exemple, Siegel et al. (2009) ont manipulé le genre d'un robot au travers de sa voix et ont constaté que les utilisateurs considéraient la voix du genre opposé comme plus crédible, plus digne de confiance et plus efficace que la voix du même genre. Cela suggère que les utilisateurs préfèrent un robot du genre opposé. Cependant, ils semblent pencher pour la similarité quand il s'agit de la personnalité de l'agent notamment en ce qui concerne les expressions faciales et la façon de s'exprimer Lee et al. (2006b).

IV. Résumé de l'état de l'art

Ce chapitre sur l'état de l'art nous a permis d'exposer l'état des connaissances sur les différents concepts qui seront abordés dans ce travail de thèse notamment la confiance, l'anthropomorphisme et les assistants virtuels. D'abord, nous avons expliqué l'intérêt de l'étude de la confiance dans les véhicules automatisés et plus spécifiquement l'automatisation de niveau 3. Nous avons tout d'abord analysé les multiples définitions du concept de confiance avant de statuer sur celle qui convenait le mieux au contexte de la thèse. Après avoir expliqué les processus de formation de la confiance, nous avons passé en revue les différents modèles proposés afin de comprendre les différents facteurs qui influencent la confiance. Nous nous sommes attardés sur le modèle (Ekman et al., 2018) en particulier qui identifie les facteurs de l'interface d'une voiture

automatisée qui peuvent influencer la confiance. Sur la base de ce modèle, nous avons choisi d'approfondir le facteur d'anthropomorphisme puisqu'il influence la confiance tout au long de l'expérience de conduite.

Une définition du concept de l'anthropomorphisme a été réalisée avant de passer en revue les travaux portant sur le design anthropomorphique autrement dit, l'utilisation de l'anthropomorphisme dans la conception d'une interface. Cette revue de littérature sur le design anthropomorphique met en évidence un type spécifique d'interface anthropomorphique : il s'agit des assistants virtuels. Nous avons donc proposé un benchmark sur les différents assistants virtuels présents sur le marché dans différents domaines notamment l'industrie automobile. Nous nous sommes ensuite lancés à la recherche de recommandations de conception pour un assistant virtuel anthropomorphique qui inspire confiance dans la conduite automatisée. Cette dernière partie de notre revue de littérature regroupe les travaux menés sur l'impact des caractéristiques d'une interface d'assistant virtuel (représentation visuelle, communication verbale et non verbale) sur la perception des utilisateurs ainsi que sur les médiateurs relationnels tel que la confiance.

Nous avons ainsi pu identifier un manque dans cette littérature en ce qui concerne les recommandations de conception que nous allons tenter de combler dans la suite de nos travaux au travers d'une expérimentation (Chapitres 3). Nous tenterons ensuite de mettre en application le design anthropomorphique (Chapitre 4) et de tester son impact sur la confiance (Chapitre 5).

PARTIE II : APPROCHE EXPERIMENTALE

INTRODUCTION

Après avoir défini les concepts de confiance Humain-Machine, d'anthropomorphisme et de design anthropomorphique, nous présenterons dans les prochains chapitres notre approche pour la conception et l'évaluation de l'assistant virtuel. Cette partie est organisée en trois chapitres. Le chapitre 3 détaille une expérimentation visant à sélectionner une représentation visuelle qui inspire confiance pour l'assistant virtuel. Le chapitre 4 détaille l'implémentation de cette représentation visuelle ainsi que les autres choix de conception en ce qui concerne la voix de l'assistant, son style de communication et sa personnalité. Enfin, le chapitre 5 décrit l'expérimentation qui a été réalisée dans un simulateur de conduite afin de comparer l'interface CMI avec et sans l'assistant virtuel.

CHAPITRE 3 : REPRESENTATION VISUELLE D'UN ASSISTANT VIRTUEL

I. Introduction

Les assistants virtuels tels que SIRI, Google Assistant, Alexa ou Cortana représentent une évolution vers une forme d'interaction plus naturelle avec la technologie, notamment l'interaction vocale. Nous pouvons désormais accéder à de multiples fonctionnalités simplement en échangeant quelques mots avec nos téléphones, tablettes, enceintes connectées, et plus récemment nos voitures. L'utilisation d'assistants virtuels en voiture peut permettre aux conducteurs d'accéder aux fonctionnalités comme la musique, la navigation tout en restant concentré sur la conduite (Weng et al., 2016). Les implémentations récentes se présentent sous diverses formes. Des applications mobiles adaptées au contexte de la conduite (Apple Car Play, Google Assistant Driving Mode), aux dispositifs dédiés (Echo Auto, Chris, Garmin Speak,) (Lugano, 2017) ou encore aux assistants personnels propriétaires des constructeurs automobiles (HONDA, BMW, Mercedes, Volkswagen, etc.) (Majji & Baskaran, 2021), l'innovation dans ce domaine a connu une croissance soutenue cette dernière décennie. Avec l'essor des voitures automatisées, les concepts d'assistants virtuels (Ajitha & Nagra, 2021) (Okamoto & Sano, 2017) évoluent notamment en ce qui concerne le rôle qui leur est attribué. Au-delà de la délivrance de messages complexes sur la conduite et la sécurité routière, ces assistants virtuels incarnent désormais le système automatisé, prenant ainsi le rôle de chauffeur. Dans ce contexte, le choix de la représentation visuelle de l'assistant virtuel soulève diverses questions quant à l'impact de cette représentation sur la perception qu'ont les utilisateurs de la conduite automatisée, leur confiance et par conséquent l'acceptation de la conduite automatisée. En effet, les interactions humain- assistant virtuel sont grandement influencées par l'apparence visuelle comme c'est le cas dans les relations interhumaines. Les humains ont tendance à se juger sur des critères comme la sociabilité, le degré de chaleur, l'honnêteté, la fiabilité ou la compétence intellectuelle en se basant uniquement sur le visage ou la tenue vestimentaire (Zebrowitz & Montepare, 2008 ; Willis & Todorov, 2006 ; Smith et al., 2018). Les recherches ont révélé que l'apparence visuelle d'un agent virtuel incarné tend à avoir un impact sur les premières impressions des utilisateurs (Stal et al., 2020) et leur perception de l'agent virtuel en ce qui concerne sa compétence, son intelligence et si celui-ci est digne de confiance. D'autres études ont également montré que les attributs visuels des agents

pédagogiques, notamment le réalisme, le genre ou l'origine ethnique, ont des effets significatifs sur l'efficacité et la motivation des étudiants (Baylor et Kim, 2004 ; Gulz et al., 2007 ; McDonnell et al., 2012 ; Ashby Plant et al., 2009). En outre, il semble que l'apparence visuelle appropriée pour un agent virtuel puisse varier en fonction du contexte d'utilisation ou du rôle tenu par celui-ci. Par exemple, les agents ayant une apparence humaine réaliste ont tendance à être associés à des rôles liés à la santé tandis que les apparences humaines de type iconique sont préférées pour des rôles impliquant des interactions sociales (Ring et al., 2014). Les agents à l'apparence zoomorphique ont tendance à être associés à des rôles liés au divertissement, à l'éducation ou à la thérapie pendant que les agents à l'apparence plus mécanique sont associés à des tâches liées à la sécurité (Li et al., 2010 ; Kalegina et al., 2018). Parmar et al. (2018) ont montré dans leurs travaux qu'un agent de santé virtuel conçu avec une tenue (blouse blanche) correspondant à son rôle était perçu comme plus rassurant, persuasif et plus digne de confiance qu'un agent dont la tenue (tenue décontractée) ne correspondait pas au rôle.

Au regard des différents résultats des études précitées, nous pensons que pour trouver l'apparence visuelle idéale pour l'assistant virtuel du cockpit CMI, il convient de réaliser une comparaison de différents types d'apparences visuelles en mesurant leur impact sur la perception de l'assistant virtuel. Cependant, ce type d'expérimentation demanderait beaucoup de temps et serait difficile à mener en début de projet puisqu'elle nécessite la construction de plusieurs prototypes entièrement interactifs et leur intégration dans un cockpit de simulation fonctionnelle. Dans ce contexte, une approche sans interaction (zero acquaintance approach) (Vartanian et al., 2012 ; Stal et al., 2020) a été retenue. Elle consiste à évaluer des agents virtuels uniquement sur la base d'images statiques, sans aucune interaction réelle entre l'agent et l'utilisateur.

L'approche sans interaction utilisée dans cette étude est basée sur un tri d'images suivi d'une enquête en ligne comparant des images statiques d'assistants virtuels dans un contexte de conduite. Cette approche vise à minimiser les coûts dans le but de sélectionner un nombre restreint d'apparences visuelles appropriées qui seront testées dans une configuration plus écologique.

II. Principe de l'expérimentation

L'objectif de cette expérimentation est de répondre à la question suivante :

“Quelle représentation visuelle correspond le mieux à un assistant virtuel qui incarne le système de conduite automatisé ? ” Pour répondre à cette question nous avons recherché un espace de

design pour les assistants virtuels. Strohmann et al. (2019) ont tenté de fournir des recommandations de conception visuelle pour des agents virtuels embarqués dans les voitures mais le choix d'une apparence visuelle pour un agent virtuel dans un rôle de chauffeur peut encore être un défi. Cela est principalement dû au nombre presque illimité d'options de représentation visuelle dans l'espace de conception. Haake & Gulz. (2009) ont proposé un cadre complet (figure 3.1) pour aborder cet espace de conception. Ce cadre définit trois aspects de haut niveau des caractéristiques visuelles statiques : le modèle de base, le style graphique et les propriétés physiques.



Figure 3.1: Espace de design pour agents pédagogiques incarnés (Haake & Gulz,2009)

Le modèle de base fait référence à la constitution d'un agent incarné et à l'entité conceptuelle liée à cette constitution (humain, animal ou créature, objet inanimé, fantastique ou une combinaison de ceux-ci). Les propriétés physiques font référence aux éléments de conception (forme du visage, couleur des yeux, des cheveux et de la peau, vêtements et accessoires, etc.) qui sont les plus variés et qui suggèrent des caractéristiques culturelles, sociales et psychologiques. Enfin, le style

graphique (réaliste ou stylisé) fait référence à la fois au degré de réalisme et de détails appliqués dans une conception visuelle.

Dans cette étude, nous nous intéressons uniquement à l'aspect du modèle de base. Nous tentons de trouver le modèle de base (Humain, Animal ou Fantastique) qui conviendrait le mieux à un assistant virtuel qui incarne le système de conduite automatisé. Pour cela, nous avons réalisé une procédure de tri d'images afin de sélectionner quelques modèles de base à évaluer dans un questionnaire en ligne. Ce questionnaire vise à comparer les différents modèles de base sur les critères de perception d'anthropomorphisme, de préférence (Liking) et de confiance. Nous choisissons ces critères de comparaison puisque des recherches antérieures ont montré que l'anthropomorphisme pourrait être un facteur d'augmentation de la confiance (Hancock et al., 2011) (Schaefer et al., 2014) (Ekman et al., 2018) (Waytz et al., 2014) et que la préférence est souvent corrélée à la confiance (Kalegina et al., 2018).

III. Protocole expérimental

1. Participants

Cent quarante-six participants (dont 60 % de femmes, âge moyen = 36,92 Écart Type = 14,04) ont rempli le questionnaire en ligne. Ils ont été recrutés grâce à un lien public vers le questionnaire partagé sur les médias sociaux et les listes de diffusion (universitaires et professionnelles). Quatre-vingt-dix-neuf pour cent des participants ont déclaré la France comme leur pays de résidence actuel et 91 % comme le pays où ils ont le plus vécu. Soixante-neuf pour cent des participants ont un permis de conduire depuis plus de cinq ans. Quarante et un pour cent conduisent tous les jours et 31 % une fois par semaine. Cinquante-huit pour cent ont déclaré utiliser au moins un système d'aide à la conduite. Interrogés sur leur utilisation antérieure des assistants virtuels (tels que ceux de Google, Apple, etc.), 29% de nos participants ont déclaré les utiliser. Quatre-vingt-cinq pour cent de nos participants ont obtenu un diplôme d'un niveau supérieur ou égal au baccalauréat (lycée ou diplôme d'enseignement supérieur).

2. Matériel

Notre travail s'appuie sur l'aspect modèle de base défini dans l'espace de conception proposé par Haake et Gulz (2009) (Figure 3.1). Cinq modèles de base ont été évalués dans le questionnaire : Humain, Animal, Abstrait, Mécanique-Humain et Mécanique-Animal. Pour éviter que les participants évaluent une image spécifique plutôt qu'un modèle de base dans son ensemble,

quatre images exemples ont été données afin d'illustrer chaque modèle de base. Les quatre exemples pour chaque modèle de base ont été sélectionnés à l'aide d'une procédure de tri d'images. Cette procédure a été réalisée avec un groupe de participants indépendant des participants au questionnaire afin de s'assurer que nos modèles de base étaient construits à partir de la perception et de la compréhension d'utilisateurs potentiels.

2.1 Procédure du tri d'images

Le tri d'images est une technique de recherche qui peut permettre de comprendre les modèles mentaux des utilisateurs en analysant leur façon de catégoriser des images (Lobinger, K., & Brantner, C. (2020)). Pour les besoins de notre étude nous utilisons le tri d'images fermé. Ainsi les participants doivent répartir les images qui leur sont présentées dans des catégories prédéfinies. Pour générer ces catégories, nous nous sommes basés sur les aspects de modèle de base (humain, animal, objet, fantastique...) et de style graphique (réaliste, stylisé) tels que proposés par Haake & Gulz (2009). Différentes catégories de représentation visuelle pourraient être créées sur la base de ces deux éléments. Cependant, nous faisons le choix d'étudier uniquement les dix catégories ci-dessous :

- Humain Réaliste : Les représentations visuelles de la catégorie "humain Réaliste" utilisent le modèle humain et leur réalisation respecte les codes de l'apparence d'un humain réel. (Deux yeux, une bouche, un nez, des oreilles, un corps avec 2 bras, 2 jambes, une peau d'apparence réaliste)
- Humain Stylisé : Les représentations visuelles de la catégorie "humain Stylisé" utilisent le modèle humain mais leur réalisation s'apparente plutôt à un dessin, un cartoon.
- Animal réaliste : Les représentations visuelles de la catégorie "Animal Réaliste" utilisent le modèle animal et leur réalisation respecte les codes de l'apparence de l'animal réel utilisé comme modèle.
- Animal Stylisé : Les représentations visuelles de la catégorie "Animal Stylisé" utilisent le modèle animal mais leur réalisation s'apparente plutôt à un dessin, un cartoon.
- Objet inanimé (non-vivant) : Les représentations visuelles de la catégorie Objet utilisent des objets réels ou non comme modèle, autrement toute chose inerte qui ne peut se mouvoir par lui-même.
- Fantastique ou Fiction : Représentations visuelles qui sont du domaine de l'imaginaire, de l'irréel

- Automate-humain : Les représentations visuelles de la catégorie “Automate-humain” sont une combinaison des catégories Humain, Objet inanimé et Fiction. En effet, les représentations de cette catégorie sont inspirées du modèle humain adulte. Cependant, les composants de cette représentation sont explicitement des objets (structure métallique, électronique).
- Automate-Animal : Les représentations visuelles de la catégorie “Automate-Animal” sont une combinaison des catégories Animal, Objet inanimé et Fiction. En effet, les représentations de cette catégorie sont inspirées d’un animal réel (un chien par exemple). Cependant, les composants de cette représentation sont explicitement des objets (structure métallique, électronique).
- Mini-Automate : Les représentations visuelles de la catégorie “Mini-Automate” sont une combinaison des catégories Humain, Objet inanimé et Fiction. En effet, les représentations de cette catégorie sont inspirées du modèle humain. Cependant, les composants de cette représentation sont explicitement des objets (structure métallique, électronique). Cette catégorie est surtout caractérisée par la taille de la représentation qui est souvent très réduite par rapport à son modèle, l’humain.
- Abstrait : Cette catégorie désigne toute représentation qui utilise des effets de forme, de géométrie, de couleurs pour aboutir à un résultat qui n’a pas de référence à la réalité concrète et que l’on ne peut rattacher à un existant dans la réalité. Nous définissons « abstrait » comme une composante de la catégorie Fantastique ou Fiction. Nous faisons le choix de l’isoler pour clarifier le type de représentation défini dans cette catégorie.

2.1.1 Matériel

Nous avons sélectionné au total 82 images sur le site internet Pinterest suivant notre interprétation des dix catégories expliquées plus haut. Une fois sélectionnées, les images ont été regroupées sous forme de collage puis imprimées en couleur sur des feuilles A4 avant d’être découpées individuellement. Elles sont ensuite disposées sur une grande table dans la salle où se déroule l’expérimentation. Les cartes représentant les catégories prédéfinies (11 en comptant la catégorie “non classée”) sont créées à l’aide de post-it et placées sur une table annexe. (Voir figure 3.2).



Figure 3.2 : Mise en place des images et des catégories

2.1.2 Participants

Dans le cadre d'un tri de cartes, Nielsen (2004) recommande un minimum de 15 sujets pour garantir une corrélation supérieure à 0,9 entre l'échantillon et la population de référence. Dix-neuf personnes (8 femmes, Mage = 28, Écart Type = 7,49) de catégories socio-professionnelles différentes (étudiants, doctorants, ingénieurs de recherche) ont participé à ce tri d'images. Ils ont été recrutés au sein de l'IRT SystemX et d'une résidence étudiante en région parisienne. Nous avons effectué un tri individuel (1 participant à la fois) afin de recueillir des données représentant la richesse et la variété des modèles mentaux de chaque individu. Chaque tri a duré entre 15 et 20 minutes.

2.1.3 Déroulement du tri d'images

La procédure du tri d'images comporte trois étapes notamment l'accueil du participant et l'explication des consignes, le tri proprement dit suivi d'une phase de debriefing pour comprendre le tri effectué par le participant.

Étape 1 : Accueil du participant et explication de la consigne

Nous faisons entrer le participant dans la salle où se déroule l'expérimentation et nous le dirigeons vers la grande table où sont disposées les images. Nous expliquons au participant qu'il doit classer les images disposées devant lui dans les différentes catégories prédéfinies. Nous lisons au participant la définition de chaque catégorie et lui demandons si chaque catégorie est clairement décrite.

Nous expliquons ensuite au participant que :

- Une image peut être classée dans une ou plusieurs catégories distinctes. Dans le cas d'un classement multiple, le participant peut se servir d'un post-it et du stylo à sa disposition pour indiquer ces différentes catégories sur l'image.
- Une image peut ne pas être classée du tout. Dans ce cas, le participant la mettra dans la catégorie "non classée".

Le choix a été fait de ne pas exposer au participant l'objet de l'étude à laquelle il participait afin de ne pas influencer leur tri.

Étape 2 : Tri

Nous laissons le participant effectuer le tri (Figure 3.3), et regrouper les cartes en catégories. Nous observons le processus et notons les moments d'hésitation afin d'en discuter avec le participant lors de l'étape débriefing.



Figure 3.3: Résultat d'un tri effectué par un participant (avant débriefing)

Étape 3 : Débriefing

A cette étape, nous demandons au participant d'expliquer ses choix lors du processus du tri. Nous revenons particulièrement sur les images non classées, les images difficiles à classer et les moments d'hésitation.

2.1.4 Résultats du tri d'images

A partir des résultats obtenus lors du tri d'images, il s'agit de mettre en évidence les "images représentatives" pour chaque catégorie. L'analyse de données a été réalisée au moyen d'une matrice de taux de propagation. Cette méthode permet de distinguer les images qui sont associées à des catégories de celles qui ne le sont pas (Barrère & Mazzone, 2012). Une image est considérée comme "représentative" d'une catégorie quand elle a été classée à plus de 70% dans la catégorie. Les résultats révèlent que certaines catégories ont plus d'images représentatives que d'autres. Nous avons fait le choix de sélectionner uniquement les catégories ayant au moins 4 images représentatives. Six catégories sur les dix prédéfinies correspondent à ce critère selon nos analyses : Humain Réaliste, Animal Réaliste, Abstrait, Automate Humain, Automate Animal, Humain Stylisé. Afin de garder une certaine homogénéité en termes de style graphique, nous avons choisi de ne pas inclure la catégorie "Humain Stylisé" dans la liste des catégories sélectionnées pour le questionnaire en ligne.

Conclusion

Ce tri d'images nous a permis de sélectionner cinq catégories de représentation visuelle à soumettre à l'évaluation des participants par le biais d'un questionnaire en ligne. Il s'agit des modèles "Humain Réaliste", "Animal Réaliste", "Automate Humain", "Automate Animal" et "Abstrait".

2.2 Procédure du questionnaire

Le questionnaire a été conçu à l'aide de LimeSurvey (Annexe I). À partir du lien partagé publiquement, les participants arrivent sur la page d'introduction du questionnaire. Des informations sont recueillies sur le comportement et l'expérience de conduite des participants, ainsi que sur leurs connaissances préalables de la technologie des agents virtuels.

Afin d'augmenter la pertinence des évaluations des participants, ils ont été "immergés" dans des scénarios de conduite automatisée à l'aide d'une image et d'un texte d'accompagnement (figure

3.4). Pour consolider l'immersion des participants dans le contexte de la conduite automatisée, ils devaient également répondre à des questions sur leur comportement prévu (par exemple : " Allez-vous laisser l'assistant conduire la voiture du garage à la porte d'entrée ? ") (" Lorsque le mode automatisé est activé et que l'assistant virtuel a la charge de la tâche de conduite, que feriez-vous dans cette situation ? "). La procédure "immersive" présente une situation de conduite non risquée (figure 3.4) et une situation de conduite à risque (figure 3.5).



Figure 3.4 : Image immersive pour illustrer une situation de conduite non risquée.



Figure 3.5: Image immersive pour illustrer une situation de conduite risquée

Une fois cette phase " immersive " terminée, les participants sont invités à évaluer chaque modèle de base (représenté par quatre exemples ; Figure 3.6) en remplissant une version traduite en français de l'échelle de Waytz et al. (2014). Cette échelle évalue la perception d'anthropomorphisme, la préférence et la confiance. À la fin du questionnaire, des commentaires généraux et des données sociodémographiques ont été recueillis. Le questionnaire nécessite environ 20 à 25 minutes pour être rempli.

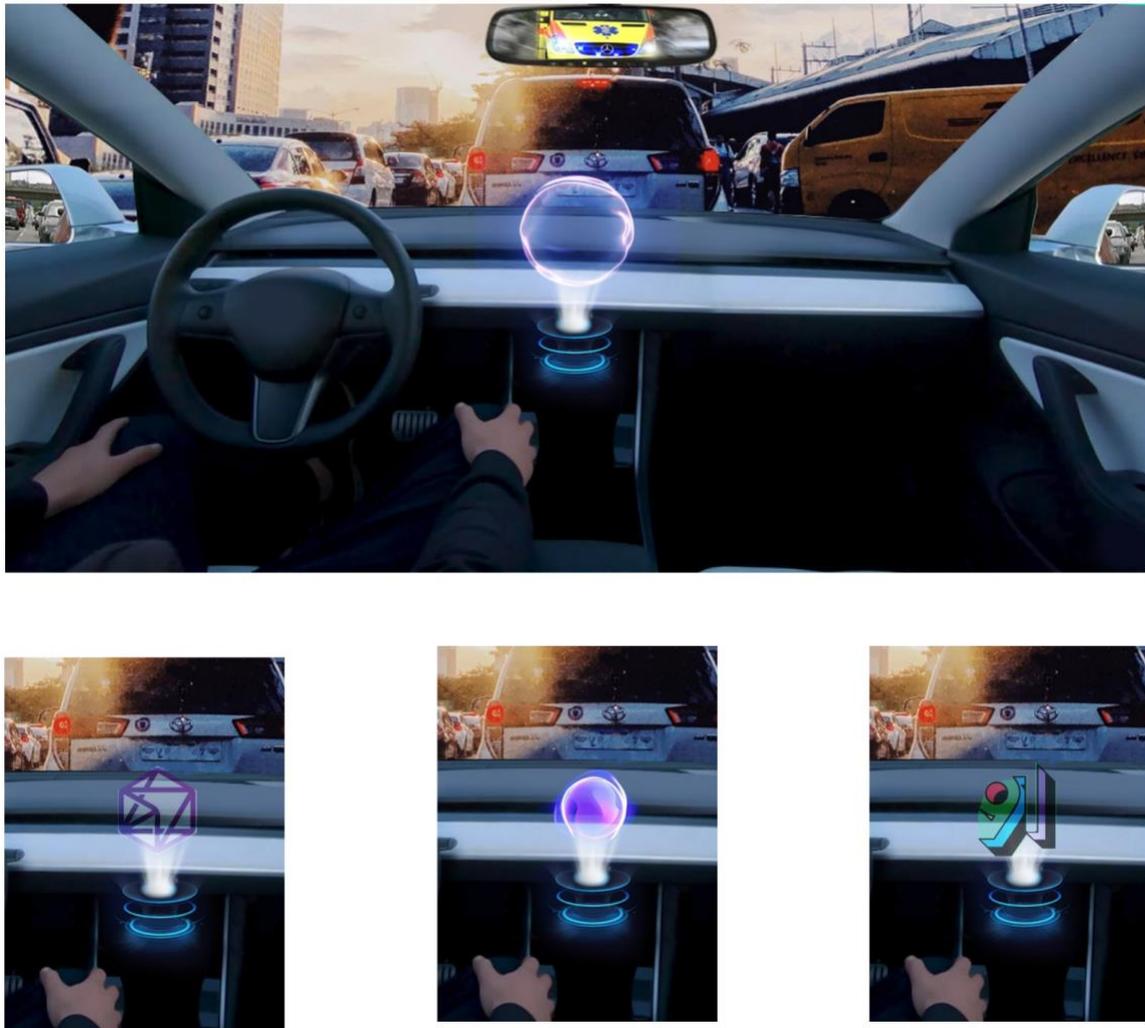


Figure 3.6 : Exemple d'illustration d'un modèle de base dans le questionnaire. (Ici, il s'agit du modèle Abstrait)

IV. Résultats

Pour calculer le score d'anthropomorphisme perçu, quatre items (1 à 4 dans l'échelle traduite) ont été moyennés pour former un seul composite ($\alpha = 0.92$). Pour la préférence, trois items (5 à 7) ont été moyennés ($\alpha = 0.96$) et huit items (8 à 16) ont été moyennés pour la confiance ($\alpha = 0.97$).

Le tableau 3.1 présente les scores médians, l'écart-type et les quartiles pour chaque modèle de base sur les trois mesures de l'anthropomorphisme perçu, la préférence et la confiance. Pour chacune de ces échelles, plus le score est élevé, plus le jugement des participants envers un modèle spécifique est favorable.

		Humain	Animal	Automate-Humain	Automate-Animal	Abstrait
Anthropomorphisme perçu	Median	5.750	5.000	6.375	5.000	5.750
	Std Dev	2.413	2.532	2.459	2.701	2.365
	25 th percentile	4.250	2.500	4.750	2.563	4.250
	50 th percentile	5.750	5.000	6.375	5.000	5.750
	75 th percentile	7.500	6.250	8.000	6.750	7.000
Préférence (Liking)	Median	5.000	4.000	5.333	4.667	5.000
	Std Dev	2.958	2.866	2.995	2.969	2.861
	25 th percentile	2.000	1.750	3.000	2.000	3.333

	50 th percentile	5.000	4.000	5.333	4.667	5.000
	75 th percentile	7.250	6.000	7.667	6.917	7.333
Confiance	Median	5.611	4.444	5.833	5.000	5.278
	Std Dev	2.438	2.556	2.432	2.626	2.472
	25 th percentile	4.111	2.278	4.444	2.889	3.778
	50 th percentile	5.611	4.444	5.833	5.000	5.278
	50 th percentile	7.333	5.972	7.528	6.444	7.111

Tableau 3.1: Scores médians et (écart-type) pour chaque modèle.).

Confiance

Les catégories Automate-Humain et Humain semblent présenter les scores de confiance les plus élevés avec 53% et 51% des scores supérieures à la neutralité (voir Figure 3.7). La catégorie Abstrait présente le score de confiance le moins élevé avec 46% de scores supérieures à la neutralité. En revanche, les participants n'ont pas fait confiance aux catégories Automate-Animal et Animal, avec des scores très faibles respectivement : 37% et 32% au-dessus de la neutralité. Il convient de noter que les scores neutres varient de 18 % à 24 % selon les catégories.

Ces différences semblent être statistiquement significatives, comme le montre un test non paramétrique de Friedman (valeur du chi carré = 73,889 ; $p < 0,05$). Un test supplémentaire de comparaison post-hoc par paire avec correction de Bonferroni (tableau 3.2) a montré que les catégories animales étaient significativement différentes de toutes les autres catégories, mais pas les unes des autres.

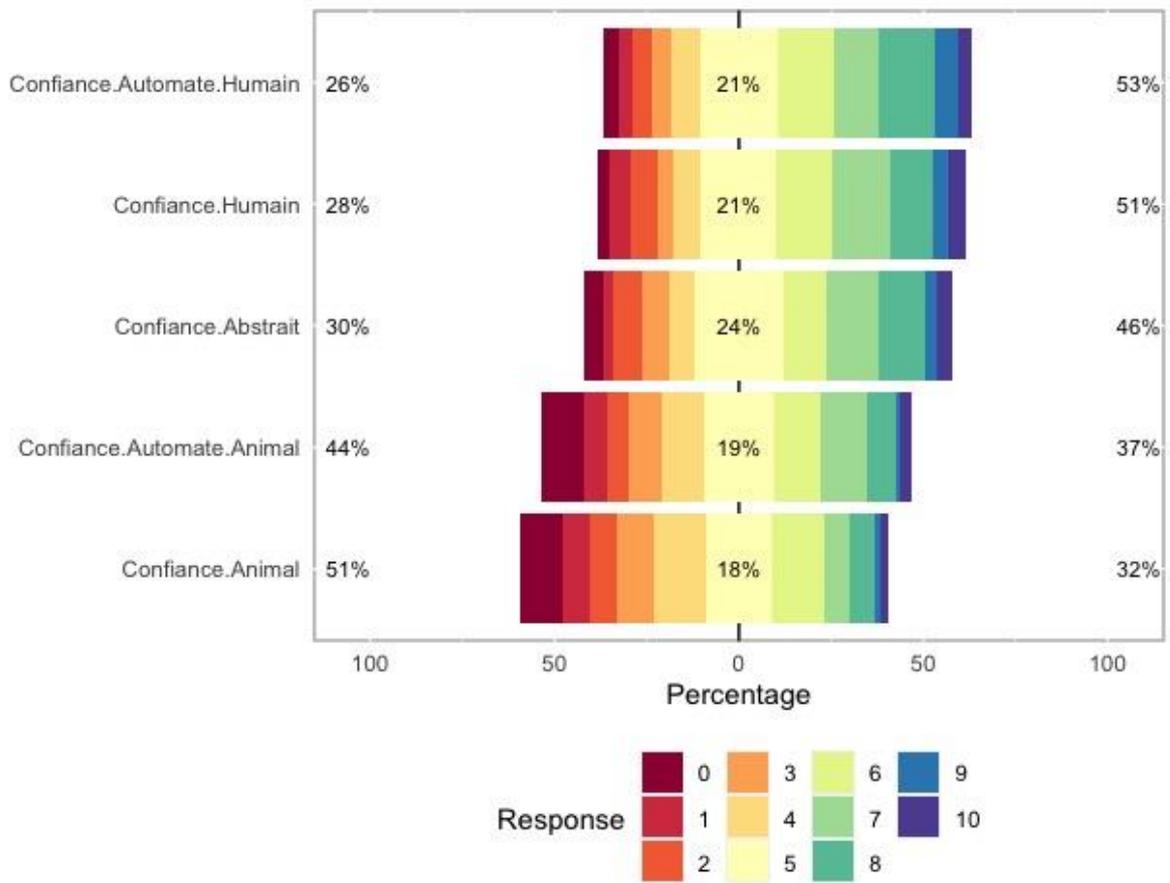


Figure 3.7 : Diagramme empilé divergent représentant les scores de confiance

	Humain	Animal	Automate-Humain	Automate-Animal
Animal	0.0004*	-		
Automate-Humain	1.0000	<0.001*	-	
Automate-Animal	0.0281*	1.0000	0.0040*	-
Abstrait	1.0000	0.0041*	1.0000	0.1664

Tableau 3.2: P-Values (seuil de significativité : $p < 0,05$) pour la comparaison post-hoc par paire de la confiance, avec correction de Bonferroni.

Appréciation

Les catégories Automate-Humain, Abstrait et Humain semblent être les plus appréciées (voir figure 3.8), avec des scores relativement similaires : 47%, 47%, 43% au-dessus de la neutralité, respectivement. Les catégories Animal et Automate-Animal ont été les moins appréciées avec respectivement 36% et 31% de notes supérieures à la neutralité. Les notes neutres varient de 11% à 18% dans toutes les catégories.

Ces différences sont statistiquement significatives, comme l'a montré un test non paramétrique de Friedman (valeur du chi carré = 47,788 ; $p < 0,05$). Un test supplémentaire de comparaison post-hoc par paire avec correction de Bonferroni (tableau 3.3) a montré qu'en termes de scores de préférence, le modèle Animal était significativement différent de tous les autres modèles.

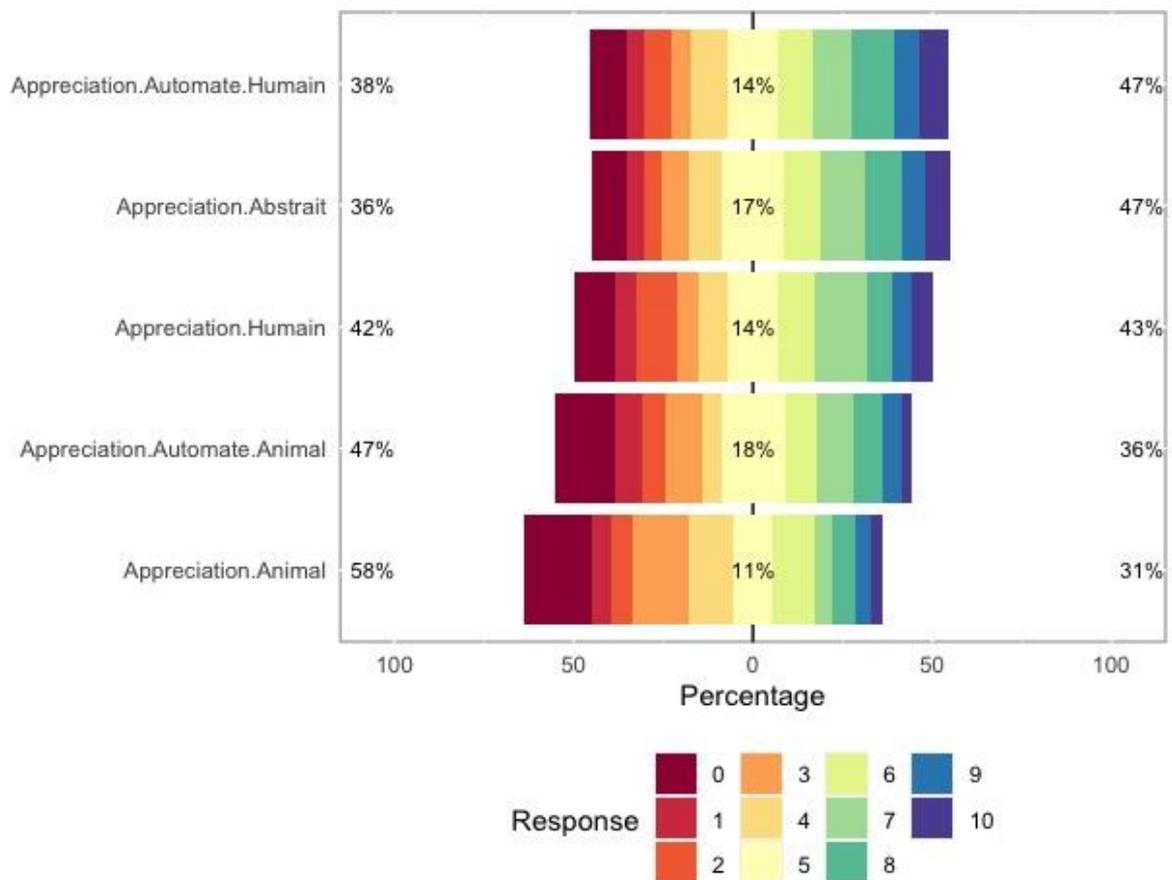


Figure 3.8 : Diagramme empilé divergent représentant les scores d'appréciation

	Humain	Animal	Automate-Humain	Automate-Animal
Animal	0.2219	-		
Automate-Humain	1.0000	0.0032*	-	
Automate-Animal	1.0000	1.0000	0.1086	-
Abstrait	1.0000	0.0031*	1.0000	0.1308

Table 3.3: P-Values (seuil de significativité : $p < 0,05$) pour la comparaison post-hoc par paire de la préférence, avec correction de Bonferroni.

Anthropomorphisme perçu

Les modèles Humain et Abstrait ont été jugés les plus anthropomorphes (figure 3.9), avec respectivement 58 % et 55 % de notes supérieures à la neutralité. Ils étaient suivis par les catégories Automate-Animal (47 %), Automate-Humain (45 %) et Animal (38 %). Les notes neutres varient de 13 à 21% dans toutes les catégories.

Ces différences se sont avérées statistiquement significatives, comme l'a montré la réalisation d'un test non paramétrique de Friedman (valeur du chi carré = 109,42 ; $p < 0,05$). Un test supplémentaire de comparaison par paire post-hoc avec correction de Bonferroni (tableau 3.4) a montré que les scores d'anthropomorphisme perçu pour les catégories Animal et Automate-Animal étaient significativement différentes de tous les autres modèles, mais pas différentes les unes des autres.

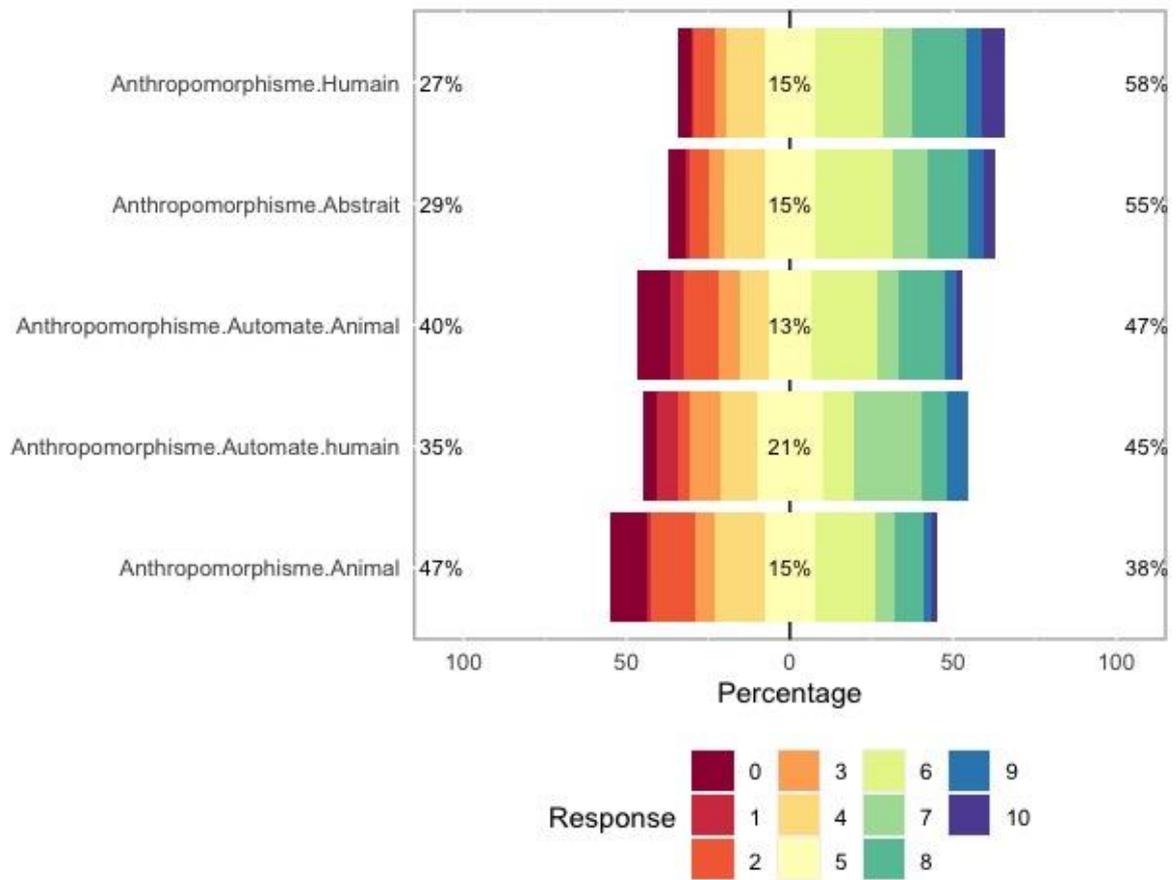


Figure 3.9 : Diagramme empilé divergent représentant les scores d'anthropomorphisme

	Humain	Animal	Automate-Humain	Automate-Animal
Animal	0.00032*	-		
Automate-Humain	1.00000	<0.001*	-	
Automate-Animal	0.03276*	1.00000	0.00032*	-
Abstrait	1.00000	0.00515*	0.27101	0.25675

Tableau 3.4: P-Values (seuil de significativité : $p < 0,05$) pour la comparaison post-hoc par paire de l'anthropomorphisme perçu, avec correction de Bonferroni.

V. Discussion et Conclusion

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'anthropomorphisme perçu, la préférence et la confiance induits par cinq modèles de représentation visuelle pour un agent de conduite virtuel dans le contexte de la conduite automatisée. Nous avons utilisé une approche sans interaction basée sur une enquête en ligne pour prendre les premières décisions de conception et explorer les attitudes des utilisateurs potentiels.

Plutôt que d'observer un niveau de confiance élevé, notre objectif était de trouver la représentation visuelle la plus appropriée pour le rôle étudié. Nos résultats indiquent que les modèles automate-humain et humain sont les plus appropriés en termes de confiance et de préférence. Les modèles humains et abstraits ont été jugés comme étant les plus anthropomorphiques. En revanche, les modèles animal et automate-animal sont les moins appréciés, les moins anthropomorphiques et les moins dignes de confiance, ce qui indique une faible pertinence de ces représentations visuelles dans le contexte étudié.

Cela confirme nos attentes selon lesquelles certaines apparences visuelles sont plus appropriées que d'autres pour le rôle de la conduite (Verberne et al., 2015). Plus précisément, les apparences animales ne sont pas associées aux tâches liées à la sécurité (Nomura et al., 2008) comme la conduite. De plus, les résultats confirment que l'anthropomorphisme est un facteur clé dans la perception de la confiance envers les agents virtuels (Waytz et al., 2014 ; P. Ruijten et al., 2018 ; Lemoine & Cherif, 2012 ; Christoforakos et al., 2021).

Un résultat inattendu est que le modèle abstrait a été perçu comme plus anthropomorphique que le modèle automate-humain. Tout d'abord, les participants pourraient avoir plus d'expérience avec des agents conçus comme un modèle abstrait (tels qu'Alexa, Google Assistant ou Siri) que des agents automate-humains. En effet, (Kuzminykh et al., 2020) ont montré dans leur étude que les agents personnels intelligents sont fortement anthropomorphisés par les utilisateurs. Deuxièmement, les représentations visuelles abstraites peuvent laisser une plus grande place à l'imagination. Ainsi, il pourrait être plus facile pour les participants de projeter des qualités humaines sur elles que sur des modèles automate-humains. Par ailleurs, il convient de noter que sur les trois différentes échelles, les scores positifs (au-dessus de la neutralité) n'ont jamais été très élevés et que les scores neutres eux-mêmes correspondaient à une part importante des évaluations des participants. Cela peut provenir du manque d'interactivité dans notre configuration. Ces derniers résultats appellent une réflexion plus approfondie.

Un autre résultat de cette étude est que l'échelle de Waytz et al. (2014) pourrait aider à discriminer entre une sélection de représentations visuelles pour les agents virtuels en termes de confiance, de préférence et d'anthropomorphisme. Cependant, cette étude bénéficierait d'une extension supplémentaire. Premièrement, d'autres recherches pourraient mettre en œuvre les modèles sélectionnés dans un environnement de conduite plus écologique, comme la simulation de conduite. En effet, une telle configuration expérimentale permettra d'étudier l'impact de l'interaction réelle avec l'agent virtuel sur la confiance. L'interactivité pourrait avoir des effets secondaires sur les performances de conduite et la sécurité.

Ensuite, dans cette étude, nous n'avons pas exploré l'effet des différences individuelles sur l'évaluation de la confiance envers les modèles de base présentés. En effet, la littérature sur le facteur humain met en évidence un effet des différences individuelles sur la confiance dans l'automatisation (Körber & Bengler, 2014 ; Matthews, Lin, Panganiban, & Long, 2019). Des études ont montré un effet des connaissances préalables et du contexte (Khastgir, Birrell, Dhadyalla & Jennings, 2018 ; Lee & See, 2004) ; l'effet des capacités cognitives dans la gestion du manque de fiabilité de l'automatisation (Rovira, Pak & McLaughlin, 2017) ; et même des attributs neurobiologiques qui modulent la sur-confiance dans l'aide à la décision informatisée (Parasuraman, de Visser, Lin, & Greenwood, 2012). Dans notre étude, la majorité des répondants étaient des ressortissants ou des résidents du pays où cette étude a été réalisée (c'est-à-dire la France). En outre, la plupart d'entre eux étaient titulaires d'un diplôme d'études secondaires ou supérieures (enseignement supérieur), ce qui reflète les statistiques relatives au niveau de diplôme des jeunes générations en France (INSEE, 2021) et en Europe (EuroStat, 2021). Une reproduction de cette étude avec un effet contrôlé des différences individuelles pourrait permettre de mieux comprendre comment le parcours éducatif et professionnel module la confiance dans l'automatisation des produits grand public. Nos résultats pourraient également être reproduits dans différents pays et cultures.

Enfin, alors que notre étude visait un niveau d'automatisation élevé (niveau 4 de la SAE ; SAE 2014), il faut noter que les interactions visuelles prolongées ne sont pas adaptées à un contexte de conduite manuelle, car la conduite est principalement une tâche visuelle-manuelle. Les interactions visuelles incarnées conviennent soit lorsque la voiture est arrêtée, soit en mode de conduite automatisée. Cela peut permettre d'établir une relation personnalisée et de confiance avec le système d'automatisation. Dans le cas d'une situation de transfert, l'assistant virtuel de conduite pourrait passer d'une incarnation visuelle à une incarnation uniquement vocale pour limiter les interférences avec le canal visuel (Wickens, 2008). Cette perspective soulève

d'importantes questions quant à l'impact d'un étalonnage visuel sur la façon dont la confiance est entretenue et les effets secondaires possibles sur la conscience réelle de la situation et la performance de conduite.

Pour conclure, notre approche sans interaction, basée sur une procédure de tri d'images et un sondage en ligne, nous a permis de sélectionner des modèles de représentation visuels susceptibles de susciter la confiance envers un assistant de conduite virtuel dans un contexte de conduite automatisée. Selon nos données, les modèles humain et automate-humain sont plus susceptibles de susciter la confiance dans un contexte de conduite automatisée que les modèles animal et automate-animal. Des travaux de recherche complémentaires sont nécessaires pour étudier i) l'extension de ces résultats dans un environnement écologique tel que la simulation de conduite, ii) les différences individuelles qui pourraient avoir un impact sur la perception de confiance des modèles de représentation visuelle, et iii) l'impact de l'incarnation visuelle sur le calibrage et la robustesse de la confiance.

CHAPITRE 4 : CONCEPTION, IMPLEMENTATION ET INTEGRATION DE L'ASSISTANT VIRTUEL

Introduction

À la suite de l'étude sur la représentation visuelle de l'assistant (Chapitre 3), une étape d'implémentation conduit à la matérialisation de l'assistant virtuel afin d'en permettre l'évaluation. Trois étapes essentielles ont été nécessaires pour cette implémentation : la modélisation, l'animation, puis l'intégration dans le cockpit de simulation de conduite autonome CMI.

I. Conception du personnage de l'assistant virtuel

Le concept de l'assistant virtuel a été proposé lors d'une séance d'idéation pendant la phase de conception du projet CMI. L'objectif de cette nouvelle interface complémentaire au cockpit CMI est d'améliorer l'expérience du conducteur grâce à sa dimension anthropomorphique. Le but est d'influencer positivement la confiance du conducteur dans le cas d'une conduite automatisée et de permettre une interaction plus fluide, entre l'utilisateur et le système.

Plus précisément, notre objectif est de comparer la valeur ajoutée de cette représentation anthropomorphique par rapport à l'interface de base proposée dans le cadre du projet CMI. Le travail de conception présenté dans ce chapitre a donc pour but de définir clairement le rôle de l'assistant virtuel dans un contexte de conduite autonome, d'identifier des cas d'usage liés à l'expérience du conducteur et de lui donner une représentation visuelle.

1- Rôle de l'assistant virtuel

La littérature sur les agents virtuels ainsi que l'étude des différents produits et concepts industriels sur le marché de l'automobile permettent d'identifier différents rôles que pourrait endosser l'assistant virtuel (Tableau 2.1). Dans le cadre du projet CMI, le rôle le plus pertinent est celui de chauffeur, pour lequel l'automatisation et la confiance sont deux concepts centraux.

2 - Cas d'usage

L'assistant virtuel a été conçu pour être perçu comme compétent dans un rôle de conduite, mais sympathique et proche du conducteur. Les différentes décisions de conception (cas d'usage, animations, messages vocaux) ont été prises lors de plusieurs séances de conception avec trois

autres ergonomes. Ces séances se sont déroulées comme des focus group où les idées étaient discutées et débattues. Dans l'ordre, les cas d'usage ont été identifiés, puis des messages vocaux ont été définis pour chacun de ces cas d'usage. Enfin, des animations et expressions faciales ont également été définies pour accompagner chaque message vocal. Trois catégories de cas d'usage (Tableau 4.1) ont été identifiés :

- Les cas d'usage qui servent à donner vie et cohérence au personnage de l'assistant.

Ces cas d'usage ont été pensés pour concrétiser l'idée d'humanisation de la technologie automatisée par l'assistant. Le concept considère que l'assistant est une "entité vivante" qui "habite" la voiture. Toutes les parties de la voiture (planche de bord, volant, portières) font donc partie de son "corps". Ainsi pour concrétiser cette idée d'entité, le cas d'usage "L0 démarrage" a été imaginé où l'assistant se présente au conducteur et annonce son rôle de chauffeur. De même, les scénarios après chaque transfert de contrôle ont été imaginés pour marquer la différence entre les moments où l'assistant est au contrôle et les moments où le conducteur est au contrôle. Dans ces scénarios, des animations (Tableau 4.4) de l'intérieur du cockpit sont imaginées pour accentuer cette idée d'"entité vivante".

- Les cas d'usage provenant de conclusions d'une étude réalisée par Renault.

Cette étude menée sur route réelle sur un cockpit de voiture automatisée intégrant une interface multimodale avait pour but de tester l'efficacité d'une interface multimodale dans des situations de reprise de contrôle. Les résultats de cette étude ont révélé des cas d'usage où l'interface multimodale n'a pas apporté aux participants les informations nécessaires. L'idée est donc de tester l'efficacité de l'assistant dans ces cas d'usage.

- Les cas d'usages identifiés lors de phase de conception de l'interface CMI

Ces cas d'usage ayant déjà été identifiés à la conception de l'interface CMI, notre travail consiste à les adapter au concept de l'assistant virtuel.

Type de cas d'usage	Cas d'usage	Explication du cas d'usage
Cas d'usage Personnage (Concrétiser le concept d'entité vivant habitant dans la voiture)	L0 (Démarrage)	Accueil du conducteur par l'assistant, premier contact, Annonce du rôle de l'assistant
	L0 après TOR ou MRM	Confirmation de transfert de contrôle, Précise qui est

		au contrôle du véhicule (Assistant ou Conducteur)
Cas d'usage CMI	Misuse	Mauvais usage du système
	AD available	Disponibilité du mode automatisé
	AD just activated	Rassure le conducteur au moment du transfert de contrôle
	AD activated	Activation du mode automatisé
	TOR (Take Over Request) en 60 ou en 10 secondes	Transfert de contrôle à la demande du système
	MRM (Minimum Risk Manoeuver)	Manoeuvre d'arrêt du système en cas de non reprise de contrôle par le conducteur
	Hands On AD	Rassurer le conducteur
	Réassurance Brouillard	Rassurer le conducteur durant les manœuvres du système
Cas d'usage provenant des expérimentations Renault	AD Compatible	Informer le conducteur lorsqu'il se trouve dans une zone où le mode automatisé est disponible mais que les conditions d'activation ne sont pas remplies
	Unintentional switch AD-L0 right after activation	Expliquer au conducteur les raisons de la désactivation du mode automatisé
	Switch AD-MD ou MD-AD not working	Expliquer au conducteur les raisons qui l'empêchent d'activer ou de désactiver le mode automatisé (absence des mains sur le volant ou du regard sur la route)

Tableau 4.1 : Cas d'usage où l'assistant virtuel intervient pour délivrer un message vocal au conducteur

3 - Messages vocaux associés

Après identification des différents cas d'usage, le contenu des messages vocaux à disposition de l'assistant a été défini (Tableau 4.2). Étant donné le rôle qui a été donné à l'assistant (chauffeur), ses messages vocaux sont pour la plupart explicatifs et concernent les situations où le conducteur se trompe dans l'utilisation du système. Nous distinguons aussi les messages de consigne qui invitent à l'action. Par exemple, dans le cas d'une activation du mode automatisé ou d'une reprise de contrôle, l'assistant explique la procédure à réaliser. Enfin, certains messages de l'assistant ont pour but de rassurer le conducteur dans une situation où le système prend des initiatives. L'ensemble de ces messages vocaux ont été enregistrés sur le logiciel "Any Text to Voice". Il a été choisi pour sa simplicité d'usage et sa gratuité. La voix "Paul" du logiciel "Any Text to Voice" a été choisie pour enregistrer les messages vocaux de l'assistant car elle correspondait, selon nous, au style de communication que nous avons imaginé pour l'assistant : formel (emploi du vous pour s'adresser au conducteur), mais dynamique (ton enjoué et jovial). Les messages vocaux ont été définis avec les critères suivants :

- L'assistant représente le système automatisé. Pour parler du système il utilise le pronom "Je". Par exemple, il dira "Je suis disponible pour conduire" ou "Je contrôle le véhicule"
- L'assistant utilise un style de communication formelle. Il s'adresse au conducteur en utilisant le pronom "Vous". Par exemple, il dira "Vous avez repris le contrôle".
- L'assistant doit souligner la différence entre le mode manuel et le mode automatisé. Pour cela, il doit préciser qui est au contrôle à chaque transfert de contrôle. "Je suis au contrôle du véhicule", "Vous êtes en charge de la conduite"

Cas d'usage	Message vocal associé
L0 (Démarrage)	"Bienvenue à bord ! Je suis Antoine, votre chauffeur. Lorsque vous m'aurez donné le contrôle, je serai en charge de la conduite. En attendant je vous souhaite un excellent trajet."
L0 après TOR ou MRM	"Vous avez repris le contrôle ; Vous êtes en charge de la conduite"
Misuse (Retrait des mains du volant en mode manuel)	"Attention !" Vous êtes en charge de la conduite, mettez les mains sur le volant."
AD available	"Je suis disponible pour conduire. Pour me donner le contrôle, appuyez sur le bouton situé sur votre volant"
AD activated	"Bienvenue en mode Chauffeur ; Je serai en charge de la

	conduite pendant les prochaines minutes."
TOR (Reprise de contrôle non programmée en 10 secondes)	"Attention ! Défaut capteur détecté ; La voiture s'arrête; Reprenez le contrôle maintenant!"
MRM (Minimum Risk Manoeuver)	"La voiture s'arrête, reprenez le contrôle"
Hands On AD	"Je contrôle le véhicule. Vous pouvez dès maintenant enlever les mains du volant/ les pieds des pédales en toute sécurité"
Réassurance Brouillard	" Je vais freiner à cause du brouillard. Ne vous inquiétez pas, j'ai conscience du camion qui nous suit"
AD Compatible	"Je suis disponible pour conduire mais les conditions ne sont pas remplies. Si vous souhaitez me donner le contrôle, éteignez le clignotant"
Switch AD-MD not working	"Pour reprendre le contrôle, Regardez la route/ Mettez vos mains sur le volant"
Unintentional switch AD-L0 right after activation	"Attention ! Vous avez repris le contrôle en appuyant sur la pédale d'accélération. Vous êtes en charge de la conduite, restez prudent."

4.2 : Messages vocaux associés aux différents cas d'usage

4 - Animations associées

Une dernière partie de la conception de l'assistant a porté sur la définition des mouvements, expressions faciales pour chaque cas d'usage, mais aussi sur l'animation du cockpit. En effet, ce travail a pour but d'animer l'assistant, mais aussi de faire vivre le concept de l'assistant comme un prolongement du cockpit. Les animations associées permettent également d'accompagner les messages vocaux et ainsi de rendre l'interaction plus naturelle. Le choix des animations se base sur des recommandations de la littérature. L'idée est d'associer un cas d'usage à un état émotionnel de l'assistant. L'état émotionnel influencerait les différents mouvements et expressions faciales de l'assistant virtuel (Tableau 4.3) (Kleinsmith et al, 2009 ; Noroozi et al, 2018 ; Gelder et al, 2011). De même, cet état émotionnel agirait sur le ton et le débit de la voix de l'assistant virtuel.

Cas d'usage	État émotionnel	Animation visage	Animation corps	Animation cockpit	Ton de la voix
L0 (Démarrage)	Enjoué	Souriant	Geste des mains « bienveillant »	Pas d'animation	Ton enjoué
L0 après TOR ou MRM	Calme, Serein	Neutre	Geste Fin du mode AD avec les mains	Animation AD vers MD	Ton Calme
Misuse (Activation du mode quand il n'est pas disponible)	Calme, Serein	Neutre	Posture ouverte Pointer l'écran centrale	Pas d'animation	Ton Ferme
AD available	Enjoué	Souriant	Pointer le « bouton volant »	Pas d'animation	Ton enjoué
AD activated	Enjoué	Souriant	Geste « pousse » pour confirmer l'activation du mode	Animation MD vers AD	Ton enjoué
TOR (Reprise de contrôle non programmée en 10 secondes)	Sérieux	Grave	Animation "Assistant se tourne vers le conducteur"	Pas d'animation	Ton Ferme et grave
MRM (Minimum Risk Manoeuver)	Sérieux	Grave	Animation "Assistant se tourne vers le conducteur"	Pas d'animation	Ton Ferme et grave
Hands On AD	Calme, Serein	Souriant	Animation "Assistant se tourne vers le conducteur"	Pas d'animation	Ton enjoué
Réassurance Brouillard	Calme, Serein	Neutre	Geste « ralentir » avec une main Animation "Assistant se tourne vers le conducteur"	Pas d'animation	Ton rassurant

AD Compatible (véhicule non centré)	Calme, Serein	Neutre	Posture ouverte Geste « centrer le véhicule »	Pas d'animation	
Unintentional switch AD-LO right after activation	Calme, Serein	Neutre	Geste Fin du mode AD avec les mains	Animation AD vers MD	Ton Ferme
Switch AD-MD not working	Calme, Serein	Neutre	Geste main « regarder la route »	Animation "Assistant se tourne vers le conducteur"	Ton Ferme

4.3: Animation associés aux différents cas d'usage

II. Modélisation

La modélisation de l'assistant virtuel a pour but de donner vie à tout ce qui a été défini à l'étape de conception. Elle a été réalisée en deux phases. Tout d'abord par Wissal Sahel dans le cadre de son stage de fin d'études de Master Universitaire au sein du projet CMI et ensuite par Martin Filosa et Hippolyte Caubet dans le cadre de leur projet de fin d'études à l'ENSC. Nous les remercions tous pour leur contribution à ce travail.

1 - Première modélisation de l'assistant virtuel

Les résultats présentés au chapitre précédent (chapitre 3) ont été utilisés pour choisir un exemple de représentation visuelle pour l'assistant virtuel. Il s'agit d'une représentation humanoïde de type masculin (Figure 4.1). Cet exemple a été choisi pour deux raisons. D'abord, il fait partie de la catégorie Automate-Humain jugée comme celle qui inspire le plus confiance parmi toutes celles présentées dans le questionnaire. Ensuite, il fait partie des représentations visuelles les plus appréciées par les participants (figure 3.7).

Pour réaliser un modèle 3D ressemblant à l'exemple issu du questionnaire (Figure 4.1), des techniques de modélisation tridimensionnelle surfacique et de maillage ont été utilisées au travers du logiciel 3Ds max.

La modélisation tridimensionnelle (3D) est une technique infographique faisant partie du domaine de l'informatique. Elle vise à créer des objets en trois dimensions, avec ou sans modèle dans le monde réel. La modélisation 3D repose essentiellement sur des lois mathématiques

complexes, qui sont appliquées à des contextes précis de la physique (en particulier à l'optique, qui est une partie de la physique prédominante dans la modélisation 3D). Il existe plusieurs types de modélisation tridimensionnelle telles que la modélisation volumique ou la modélisation surfacique.

La technique de modélisation surfacique, utilisée pour créer le premier modèle 3D de l'assistant virtuel, repose sur la définition d'une surface à l'aide d'un nuage de points. Ce nuage de points décrit la surface extérieure de l'objet à modéliser. Cette technique nécessite un nombre de points réduit, des informations topologiques et une densité.

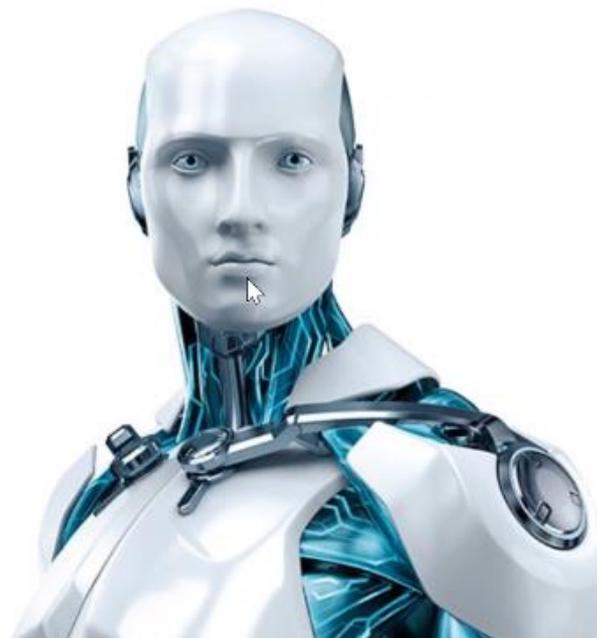


Figure 4.1 : Représentation visuelle choisie sur la base des résultats du questionnaire

Pour modéliser la tête et le visage de l'assistant, la technique du maillage a été utilisée en plus de la modélisation surfacique (Figure 4.2). Cette technique a été utilisée pour permettre une définition précise de l'anatomie d'un visage humain. Le maillage est obtenu à partir du nuage de points qui constitue la surface du modèle 3D. Les liens entre les différents points du nuage créent des polygones, et l'ensemble de ces polygones forme un maillage. Ainsi, pour représenter les différents muscles du visage, des polygones ont été spécifiquement créés. Ces polygones seront ensuite utilisés pour créer des expressions faciales et donc générer un visage animé. Le maillage

offre une flexibilité qui permet d'ajuster les différents détails du modèle 3D en agissant sur les points et polygones, mais aussi pour changer la forme et la topologie du modèle.

La technique du maillage présente cependant un inconvénient dans le cas de surfaces complexes comme un visage humain. En effet, le polygone n'étant pas une donnée naturelle, une petite quantité de polygones sur une surface peut engendrer un résultat trop anguleux et une résolution trop faible. Pour l'assistant virtuel, le maillage a donc été raffiné plusieurs fois afin de pallier ce problème et d'augmenter la résolution du modèle.

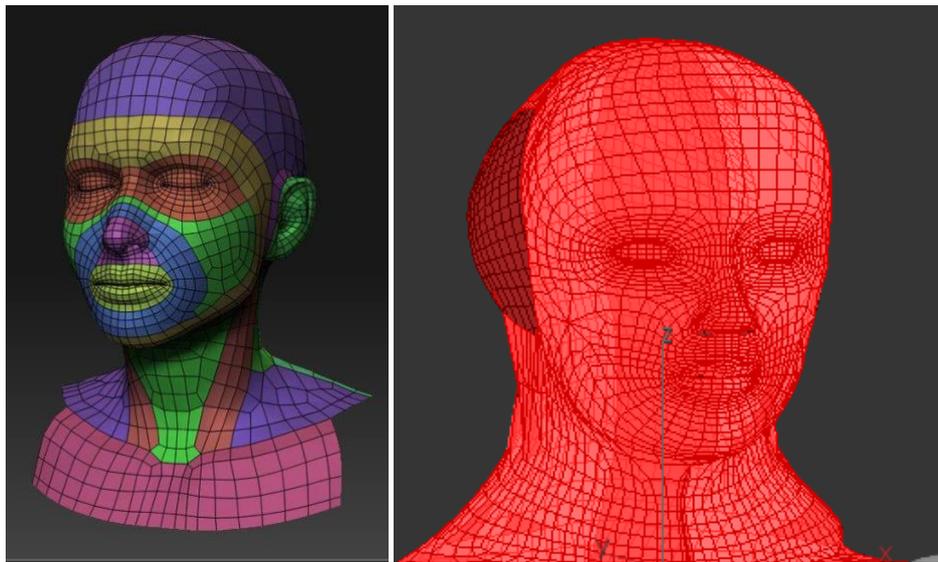


Figure 4.2 : Structure de modélisation de visage utilisé (à gauche) et son résultat sur l'assistant (à droite)

En complément de la tête, le haut du corps de l'assistant a été modélisé (Figure 4.3), notamment ses épaules, ses bras, ses mains, sa poitrine et sa région abdominale. Chacune de ces parties a été modélisée en créant des formes géométriques (cylindres, rectangles, sphères) qui sont ensuite transformées en maillage, puis déformées et assemblées pour aboutir au résultat souhaité. Nous avons choisi de représenter uniquement les parties de l'agent qui serviront à son interaction avec l'utilisateur. Dans le cadre de ce projet, l'assistant aura uniquement besoin de faire des mouvements avec ses bras et ses mains pour accompagner ses instructions vocales. La seule partie nécessaire pour ce type d'interaction est la partie supérieure du corps de l'assistant.

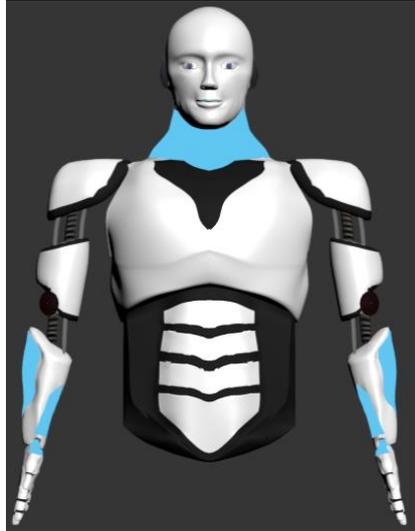


Figure 4.3: Résultat de la première modélisation de l'assistant virtuel

2. Seconde modélisation de l'assistant virtuel

Le résultat de la première modélisation de l'assistant virtuel est fonctionnel, mais il pourrait être amélioré, notamment en ce qui concerne le design et l'apparence visuelle. La seconde modélisation a donc pour but d'améliorer ces points tout en prenant en compte différentes recommandations de conception provenant de la littérature.

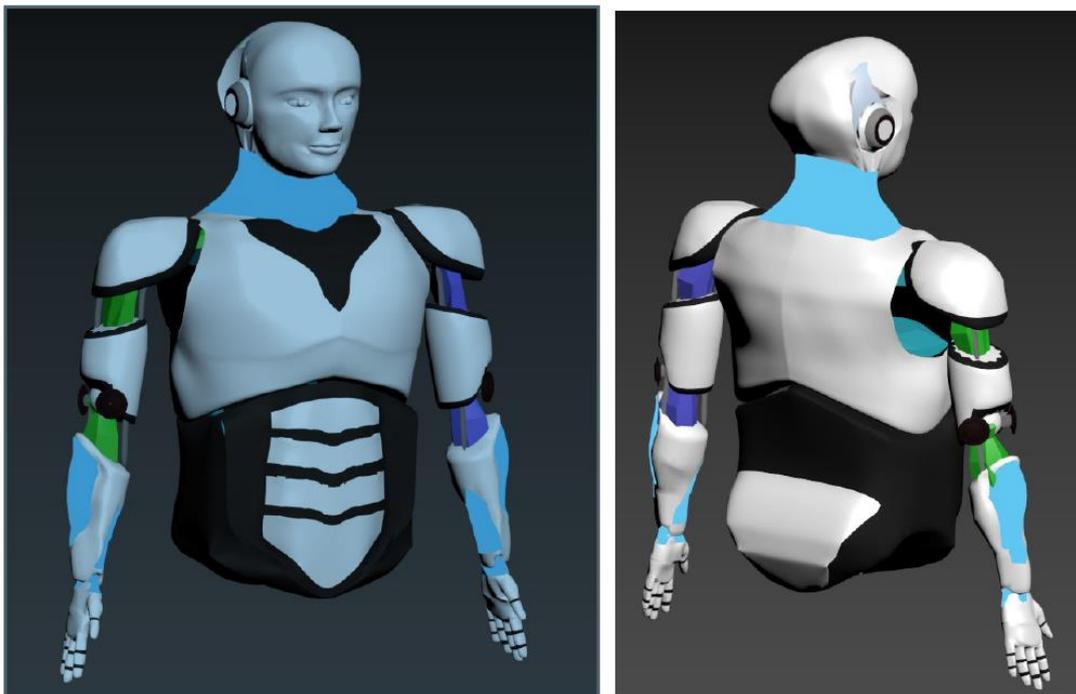


Figure 4.4 : Première modélisation de l'assistant virtuel

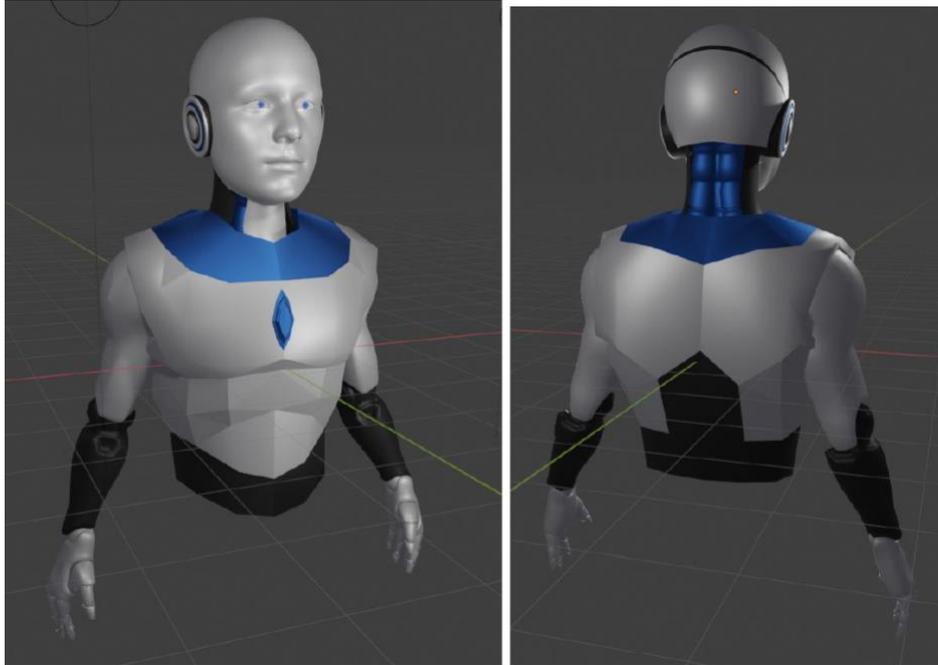


Figure 4.5 : Seconde modélisation de l'assistant virtuel

Pour aboutir au résultat présenté à la figure 4.5, le visage de l'avatar a été conçu via le logiciel de modélisation 3D Blender et en utilisant le package FaceBuilder. Cet outil permet la création d'un visage en se basant sur des photographies de personnes réelles. Pour minimiser l'influence du genre sur la perception de l'assistant virtuel (Nomura, 2016), ce nouveau modèle se base sur des visages masculins et féminins afin d'obtenir des proportions androgynes. L'ajout de paupières lui permet de fermer les yeux (DiSalvo, Gemperle, Forlizzi et Kiesler, 2002).

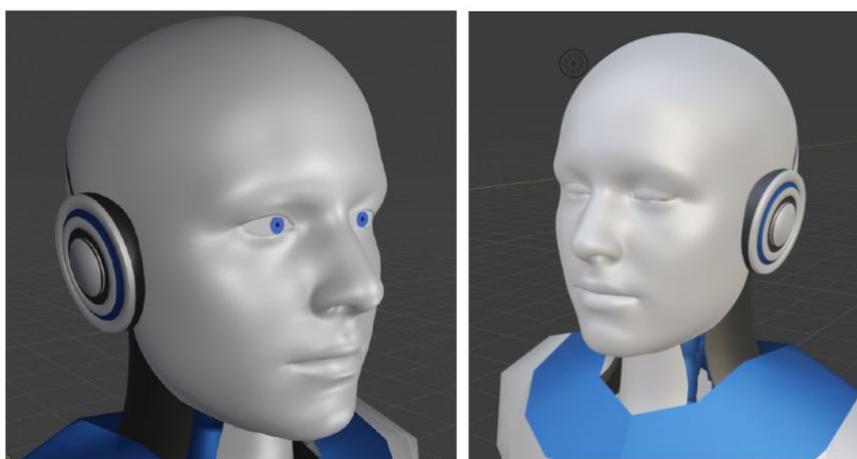


Figure 4.6 : Visage de l'assistant – Yeux ouverts et fermés

Des éléments visant à robotiser l'assistant ont aussi été modélisés. Ces éléments servent, comme expliqué précédemment, à déshumaniser le robot et faciliter les interactions (Mori, McDorman et Kageki, 2012), sans pour autant enlever à son réalisme. Cette façon de procéder permet d'éviter la vallée de l'étrange.

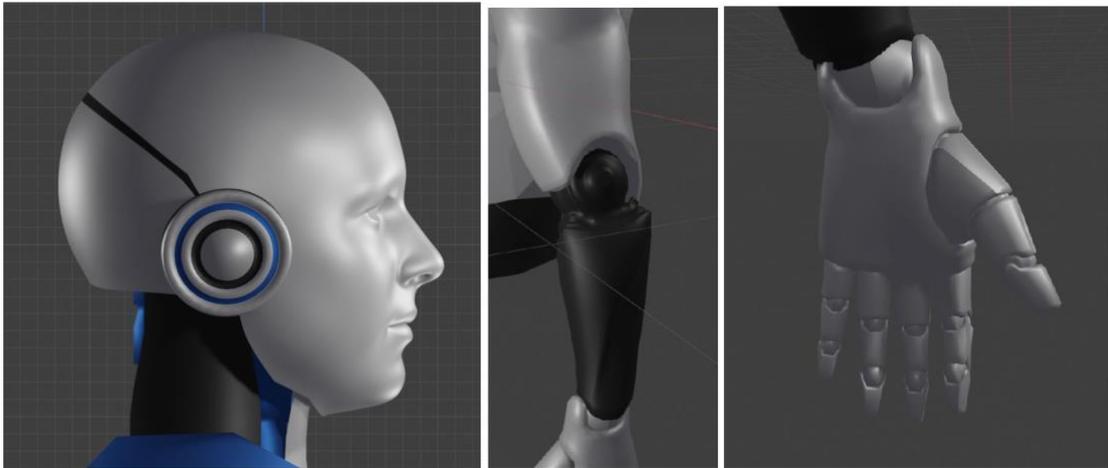


Figure 4.7 : Bras, mains et oreilles de l'avatar

Enfin, un losange bleu a été ajouté sur le buste du robot en accord avec l'idée de "point central d'attention" (Lee, Baek et Ju, 2018). Il permet la compréhension implicite de l'orientation du robot et attire notre attention si celui-ci venait à se mettre face à nous pour communiquer une information.

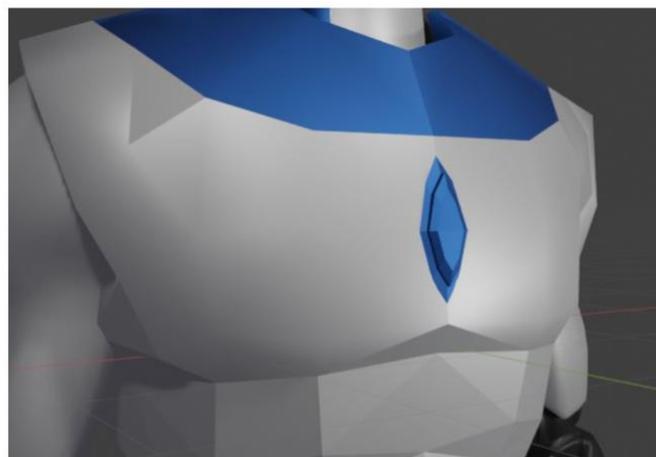


Figure 4.8: Point central d'attention

III. Animation

L'animation de l'assistant virtuel comporte la phase d'animation du buste réalisée sur le logiciel 3Ds max et l'animation du visage réalisée sur le logiciel iClone 7.

1. Animation du buste de l'assistant virtuel

Pour animer un modèle tridimensionnel, il convient de le préparer à l'animation en y ajoutant différents éléments qui permettent la création de mouvements. Le logiciel 3Ds max dispose de différents outils pour aboutir au résultat désiré. Tout d'abord, l'outil « bones » qui sert à ajouter des os au modèle afin de pouvoir générer du mouvement. Pour un modèle humanoïde, 3Ds max propose un squelette humain appelé le « Biped ». Le Biped correspond à une réplique de squelette humain offrant une possibilité de personnalisation. Il est donc possible de rajouter des os ou diminuer la taille de certains os pour gérer le nombre de doigts par exemple. Le Biped gère pour chaque articulation les degrés de liberté, c'est-à-dire les règles de rotation des articulations ainsi que les plans de rotations, qui peuvent dépasser les capacités d'un humain. Il est possible par exemple d'effectuer des rotations d'articulations de 270° ou de 360°.

L'outil « Biped » de 3Ds max permet l'animation du squelette du modèle 3D. Cependant, pour obtenir des mouvements fluides, les éléments dits surfaciques (le maillage) doivent être liés au squelette. L'outil « skin » permet de lier le maillage et le squelette pour obtenir une animation cohérente. Chaque partie du maillage est associée à l'os correspondant. Ainsi, lors de l'animation, chaque partie du maillage suit son os et se déforme conformément au mouvement effectué.

Une méthode de pondération linéaire est appliquée au niveau des articulations afin d'éviter les plis au niveau des points de surface qui sont influencés par plusieurs os. Les pondérations des sommets, qui indiquent le degré d'influence des différents os, doivent être spécifiées au cours du processus de "skinning". La déformation de chaque sommet est alors définie comme un mélange pondéré des transformations des os qui lui sont associées. Notons que la qualité de la déformation est fortement influencée par ce mécanisme de pondération.

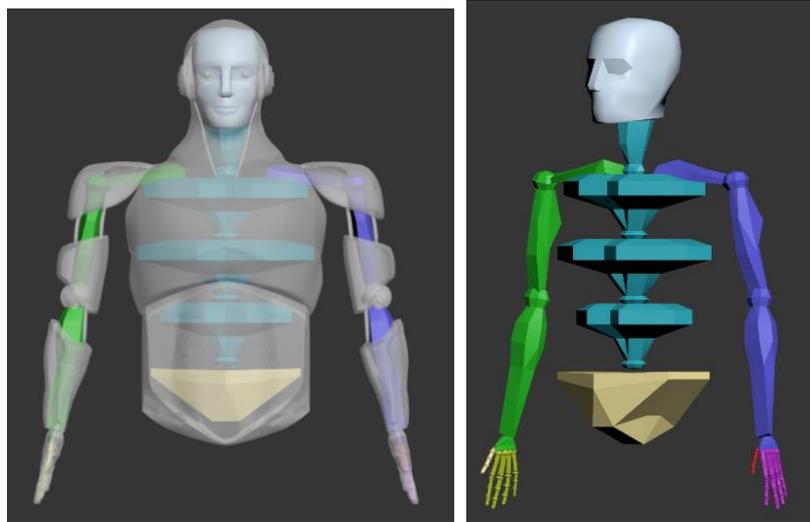


Figure 4.9: Le biped utilisé pour l'assistant virtuel

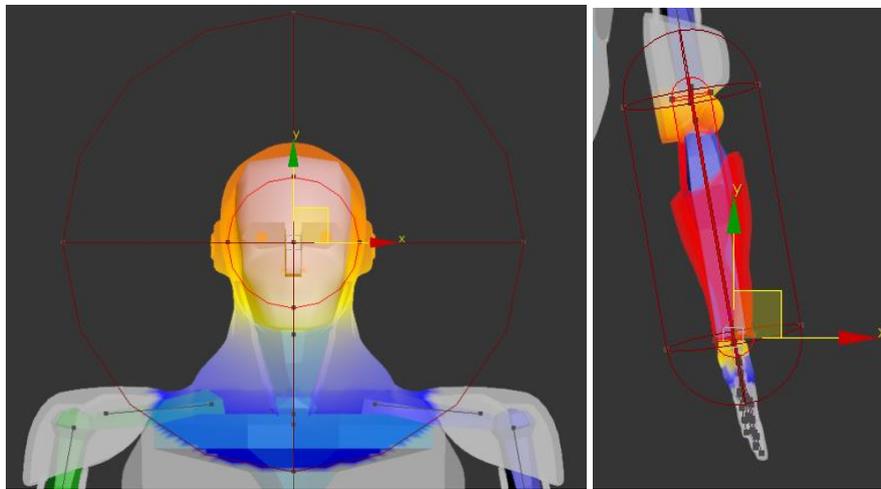


Figure 4.10 : Attribution des zones affectées par le mouvement des os (les zones rouge et orange sont les plus affectées et les zones jaune et bleu sont les moins affectées)

La dernière technique utilisée pour animer le modèle 3D de l'assistant virtuel est le Morphing. Le Morphing, aussi appelé interpolation, est une technique par laquelle un objet se métamorphose en un autre. Le processus est défini comme la construction d'une séquence d'animation montrant la transition entre deux objets différents, la source et la cible (target). Le Morphing a été utilisé essentiellement sur le visage de l'assistant virtuel. En se basant sur le modèle du visage de l'assistant (source initiale), différents mouvements des muscles du visage (targets) ont été générés par manipulation manuelle du maillage. Le morphing permet au visage de passer d'un mouvement à un autre, ou de combiner des mouvements de muscles pour créer une expression de visage.

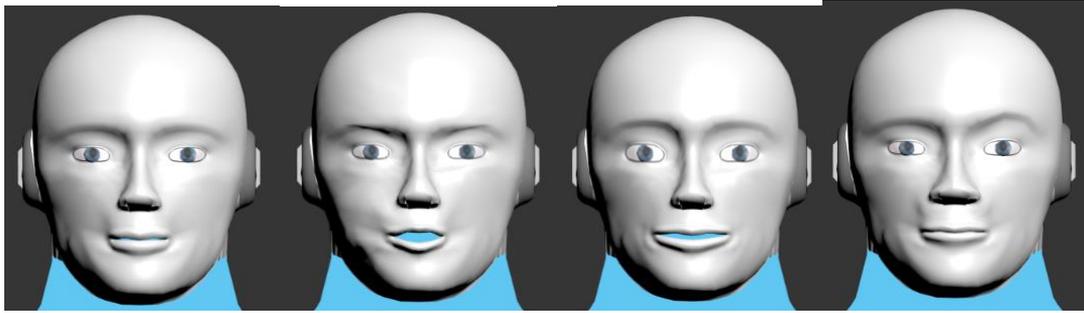


Figure 4.11 : Exemple de résultats de combinaison de morphing target

2. Animation du visage de l'assistant virtuel

Pour chaque cas d'usage où l'assistant prononce un message vocal, une ou plusieurs animations ont été définies. Pour animer le visage de l'assistant, le logiciel iclone 7 propose des animations prédéfinies qui correspondent à des émotions spécifiques (joie, peur, colère etc.). Aussi, iclone 7 dispose de la fonction Lip Sync qui permet de faire bouger les lèvres de l'assistant en fonction du message qu'il délivre. L'animation du corps réalisée sur 3Ds max est affinée sur iclone 7 en ajoutant des gestes pour expliciter les messages vocaux de l'assistant. Selon le cas d'usage, l'assistant effectue des gestes qui illustrent ses messages vocaux. Kipp (2003) propose une classification des gestes humains en six classes : les gestes adaptateurs, emblèmes, déictiques, iconiques, métaphoriques et rythmes.

- Les adaptateurs sont des contacts non communicatifs avec soi-même et avec des objets, comme se gratter le lobe de l'oreille ou manipuler un stylo, qui ne sont généralement pas considérés comme faisant partie de la communication. Les adaptateurs peuvent être considérés comme des signes qui communiquent des informations sur l'état du locuteur, comme être nerveux, mal à l'aise ou s'ennuyer. Elles se produisent le plus souvent lors de pauses dans le flux de la parole.
- Les emblèmes sont des gestes dont la forme et la signification sont conventionnelles et qui peuvent être utilisés indépendamment de la parole. La signification du geste peut être directement traduite par des mots qui sont parfois prononcés en conjonction avec l'emblème. Un exemple est le geste du pouce levé, la signification du geste peut être exprimée par des énoncés comme "oui", "c'est bon" ou "super". De nombreux emblèmes sont spécifiques à une culture.
- Les gestes déictiques sont des mouvements de pointage dont la fonction est d'indiquer une personne concrète, un objet, un lieu, une direction mais aussi de pointer vers des

choses invisibles, abstraites ou imaginaires. Les iconiques sont des gestes qui illustrent ce qui est dit en décrivant une certaine propriété du référent de la parole. Par exemple, lorsqu'on parle d'une image de galerie et qu'on dessine un rectangle dans l'air, le geste illustre la rectangularité de l'image et est donc une icône.

- Les iconiques ne répondent généralement pas à des normes de forme, elles sont souvent générées instantanément. Les icônes les plus arbitraires sont probablement des mouvements spatiaux, par exemple lorsqu'il s'agit de décrire un accident de voiture.
- Les gestes métaphoriques sont semblables aux iconiques en ce sens qu'ils illustrent le contenu du discours. Cependant, une métaphore n'illustre pas le contenu directement mais par le biais d'un troisième élément qui agit comme une métaphore. Le geste illustre ce troisième élément qui, à son tour, fait référence au contenu du discours. Par exemple, un orateur dit "c'est une bonne histoire" tout en tenant un objet imaginaire avec ses deux mains. L'objet imaginaire agit comme une métaphore du concept "histoire".
- Les gestes déictiques et iconiques ont été utilisés pour les cas d'usage où l'assistant désigne un sujet particulier (le conducteur, l'assistant, l'environnement, un bouton etc...) (Figure 4.12). Les gestes emblèmes ont servi à illustrer des exclamations telles que « attention ! » ou pour souligner une erreur commise par le conducteur. Les gestes métaphoriques ont servi à illustrer des consignes tels que "Conduisez", "Cliquez sur ce bouton" ou encore "Mettez les mains sur le volant" (Figure 4.13).

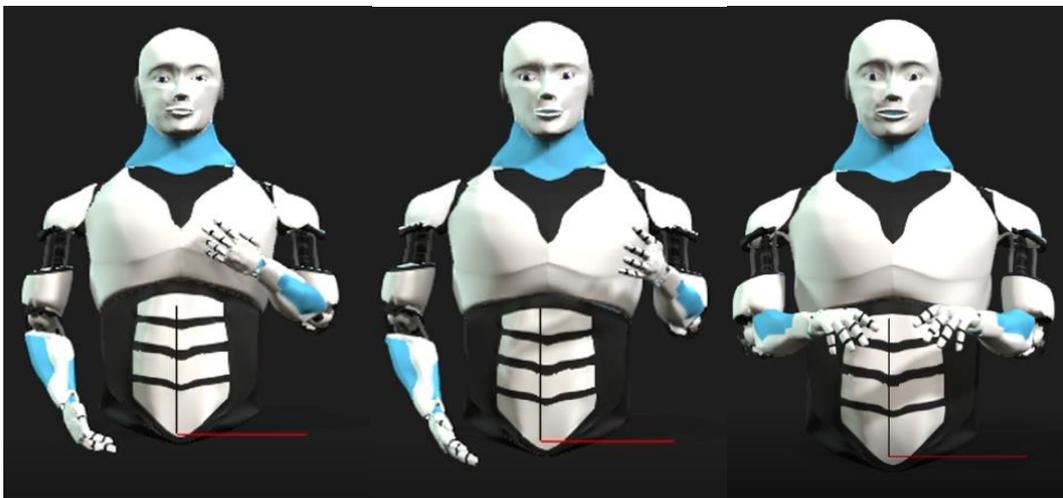


Figure 4.12 : Exemple des gestuels déictiques et iconiques : moi (l'assistant à gauche), vous (le conducteur- au milieu), les conditions dans la voiture (à droite)

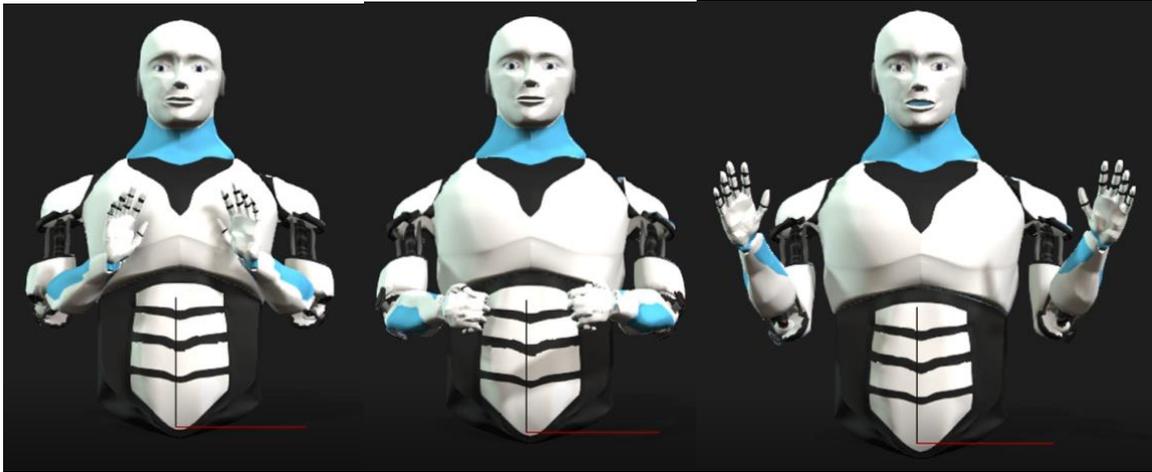


Figure 4.13 : Exemples de gestes emblèmes et métaphoriques : Attention (à gauche), Action de conduire (au milieu), la négation (à droite)

Chacun de ces gestes peut être adapté ou combiné avec d'autres gestes selon le cas d'usage ou le contexte de l'animation.

IV. Intégration au cockpit de simulation du projet CMI

L'assistant virtuel a été développé de façon autonome par rapport au cockpit de simulation du projet CMI. La dernière étape de l'implémentation consiste donc à l'intégration de l'assistant au sein du cockpit et de son architecture logicielle.

1. Intégration Hardware

L'assistant virtuel est représenté physiquement dans le cockpit de simulation par une projection en trois dimensions. Cette projection est réalisée au moyen d'une tablette surmontée d'une pyramide en plexiglass. La tablette (Windows Surface Pro) exécute une application développée sur le logiciel Unity et génère ainsi quatre images de l'assistant. La projection en trois dimensions est obtenue en posant la pyramide en plexiglass au milieu de la tablette. Les quatre images sont projetées sur les différentes faces de la pyramide et permettent de voir l'assistant sous ses différents angles (Figure 4.14). L'ensemble tablette-pyramide est placé sur la planche de bord au milieu du pare-brise. Cette position a été spécifiquement choisie car elle permet au conducteur, mais également à tous les occupants potentiels du véhicule, de voir l'assistant lorsqu'il se manifeste visuellement. Aussi, conformément à la conception, cette position est celle qui permet à l'assistant d'être crédible en tant que chauffeur, lorsqu'il est dos à la route.



Figure 4.14 : L'assistant intervenant pendant la conduite autonome

2. Intégration Software

L'application Unity développée pour l'assistant virtuel est constituée du modèle 3D de l'assistant virtuel placé dans une chambre noire afin de créer un arrière-plan noir. Cet arrière-plan est nécessaire pour améliorer le rendu en trois dimensions qui sera projeté sur les faces de la pyramide en plexiglass (Figure 4.15). Cet assistant est entouré de quatre caméras qui capturent son état depuis les quatre angles nécessaires.

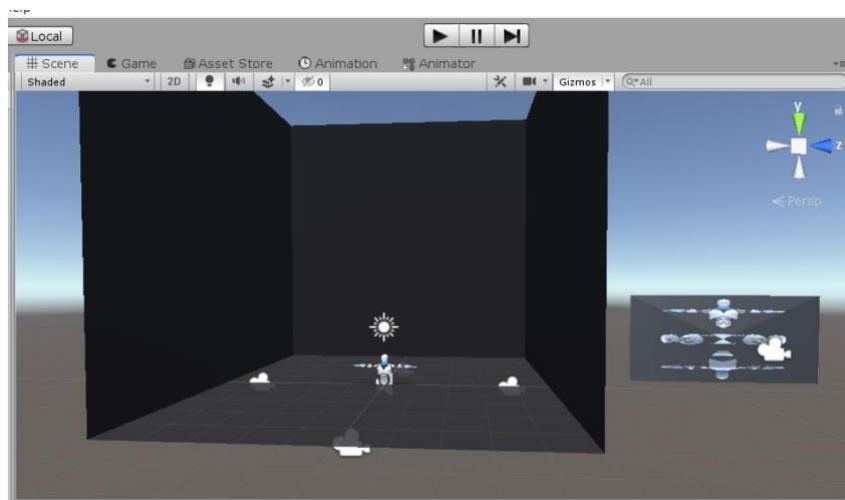


Figure 4.15 : L'environnement de l'application Unity

Les textures exportées des caméras sont ensuite utilisées sur un plan pour positionner chaque angle de vue de l'assistant, afin d'avoir une sortie adéquate pour l'affichage en trois dimensions (Figure 4.16).

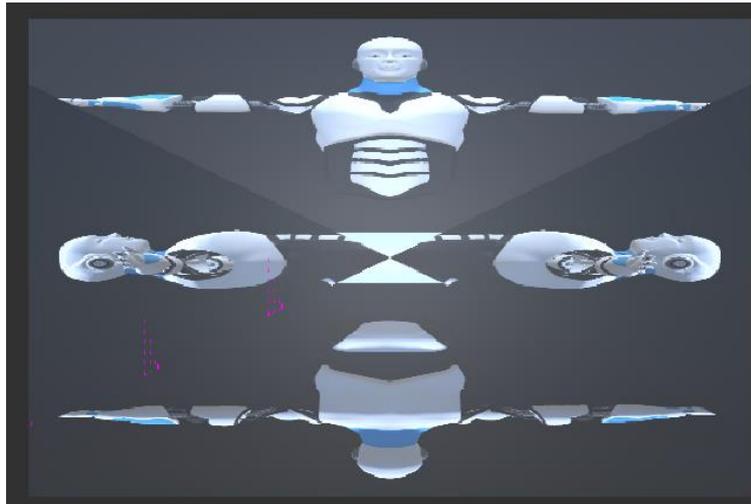


Figure 4.16 : Sortie de l'application affichée sur la tablette

Les différentes animations de l'assistant sont gérées par un outil disponible sur Unity appelé l'Animator (figure 4.17). L'Animator intègre deux animations principales qui correspondent à l'état en conduite autonome (où l'assistant fait face à la route) et l'état en conduite manuelle (où l'assistant fait face au conducteur). Toutes les autres animations sont appelées à partir de Trigger. Chaque Trigger est associé à une seule animation, et son état est manipulé par le script de réception des commandes MQTT.

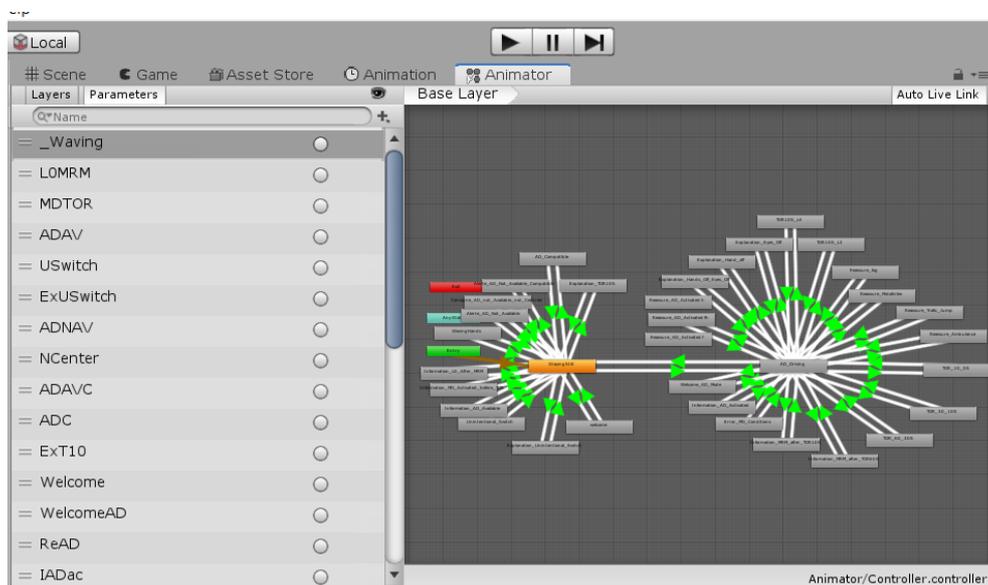


Figure 4.17 : Animator de l'assistant

Pour permettre à l'assistant de communiquer avec le système CMI, la librairie DLL (Dynamic Link Library) M2Mqtt a été intégrée à l'application Unity. En effet, Le système CMI utilise le protocole MQTT pour assurer la communication entre toutes les modalités présentes dans l'architecture. Le MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) est un protocole de messagerie bidirectionnel basé sur le protocole TCP/IP. Ce protocole permet aux différents composants de l'architecture de publier et de lire des messages sur un broker. Chaque client peut souscrire à des topics particuliers. Lorsqu'un autre client publie un message sur un topic, le broker transfère le message à tous les autres clients qui y ont souscrit. Le protocole veille également à ce que les appareils restent connectés. Si un appareil perd sa connectivité, tous les clients qui y sont liés seront notifiés. La légèreté et l'efficacité du protocole MQTT permettent d'augmenter la quantité de données qui transitent par le broker (Bastien, 2019).

La librairie "M2Mqtt" fournit une classe principale "MqttClient" qui représente le client MQTT pour se connecter à un broker. L'application fonctionne suivant le processus suivant : tout d'abord elle commence par la demande de l'adresse IP du broker, afin de se connecter. Une fois que la connexion avec le réseau est établie, l'application souscrit au Topic de l'assistant, puis écoute sur un port dans l'attente de messages envoyés sur ce Topic. Dès qu'un message est reçu, le script vérifie le contenu du message, et le convertit en un numéro d'animation. Il active ensuite le trigger correspondant à l'animation demandée (Figure 4.17) ainsi que le message vocal correspondant. L'activation de ce Trigger permet à l'assistant de faire la transition entre l'animation de repos et l'animation demandée. Enfin, les caméras employées dans l'environnement permettent de capturer et transmettre les séquences d'animation au plan d'affichage.

Conclusion

Cette étape nous a donc permis d'implémenter la représentation visuelle de l'assistant en utilisant la modélisation tridimensionnelle à l'aide des logiciels 3DsMax. Nous avons choisi une représentation du tronc et de la tête selon un modèle Automate-Humain. Les bras et le visage ont été animés pour augmenter le réalisme de l'assistant virtuel. Les messages vocaux ont été ajoutés. Un travail important de mise en cohérence entre l'expression du visage et la nature des messages vocaux a été réalisé. L'emplacement de l'assistant dans le cockpit a été choisi à la suite d'une concertation entre les membres de l'équipe du projet CMI.

CHAPITRE 5 : ÉVALUATION DE L'ASSISTANT VIRTUEL : EXPERIMENTATION AU SEIN D'UN SIMULATEUR DE CONDUITE

I. Introduction

Dans ce chapitre nous décrivons une expérimentation dont le but est de tester les différentes hypothèses formulées dans notre travail de thèse (Page 114-115). Dans cette expérimentation, trois interfaces seront comparées à savoir : l'interface CMI qui sert de référence, l'interface Assistant Vocal et l'interface Assistant Visuel. Le but est d'évaluer l'impact des différences entre les trois interfaces. Autrement dit, nous essayons de comprendre si les messages vocaux ajoutés à l'interface Baseline pour obtenir l'interface Vocal ou encore la représentation visuelle ajoutée à l'interface Assistant Vocal pour obtenir l'interface Assistant Visuel ont un impact sur la perception d'anthropomorphisme, la confiance, la performance et l'expérience des participants. L'assistant virtuel dont la conception est décrite au chapitre 4, sera comparé à l'interface de référence CMI.

II. Principe de l'expérimentation

Cette expérimentation consiste en la réalisation de scénarios de conduite au sein d'un cockpit de voiture autonome équipée d'interfaces anthropomorphiques. Plusieurs groupes de participants sont mobilisés, à raison d'une interface par groupe de participants. Trois interfaces sont comparées : l'interface CMI que nous considérons comme l'interface de référence dans cette étude, (figure 5.1), une interface intégrant l'assistant virtuel vocal (figure 5.2) et une interface intégrant l'assistant virtuel avec une représentation visuelle (figure 5.3).

L'interface CMI est une interface multimodale intégrant des interfaces visuelles, vocale et haptique. Les interfaces visuelles incluent notamment le tableau de bord qui affiche des informations tels que la vitesse, la disponibilité du mode automatisé, le temps disponible en mode automatisé. L'affichage lumineux au milieu du volant indique que le mode automatisé est activé et que le conducteur n'a plus la charge de la conduite. L'écran intégré au volant permet d'activer le mode automatisé et affiche l'icône du chauffeur. L'affichage tête haute visible sur la scène de conduite reprend les informations du tableau de bord. Au milieu du pare-brise, l'icône du

chauffeur sous forme iconique traduit l'activation du mode automatisé et affiche le temps restant en mode automatisé. La modalité vocale est créée grâce à l'intégration d'un système de son localisé dans l'appui-tête du siège conducteur. Enfin, la modalité haptique est créée grâce à l'intégration d'actuateurs dans le dossier et l'assise du siège conducteur. Elle sert de référence dans cette expérimentation et sera désignée comme "Baseline" dans la suite de ce chapitre.

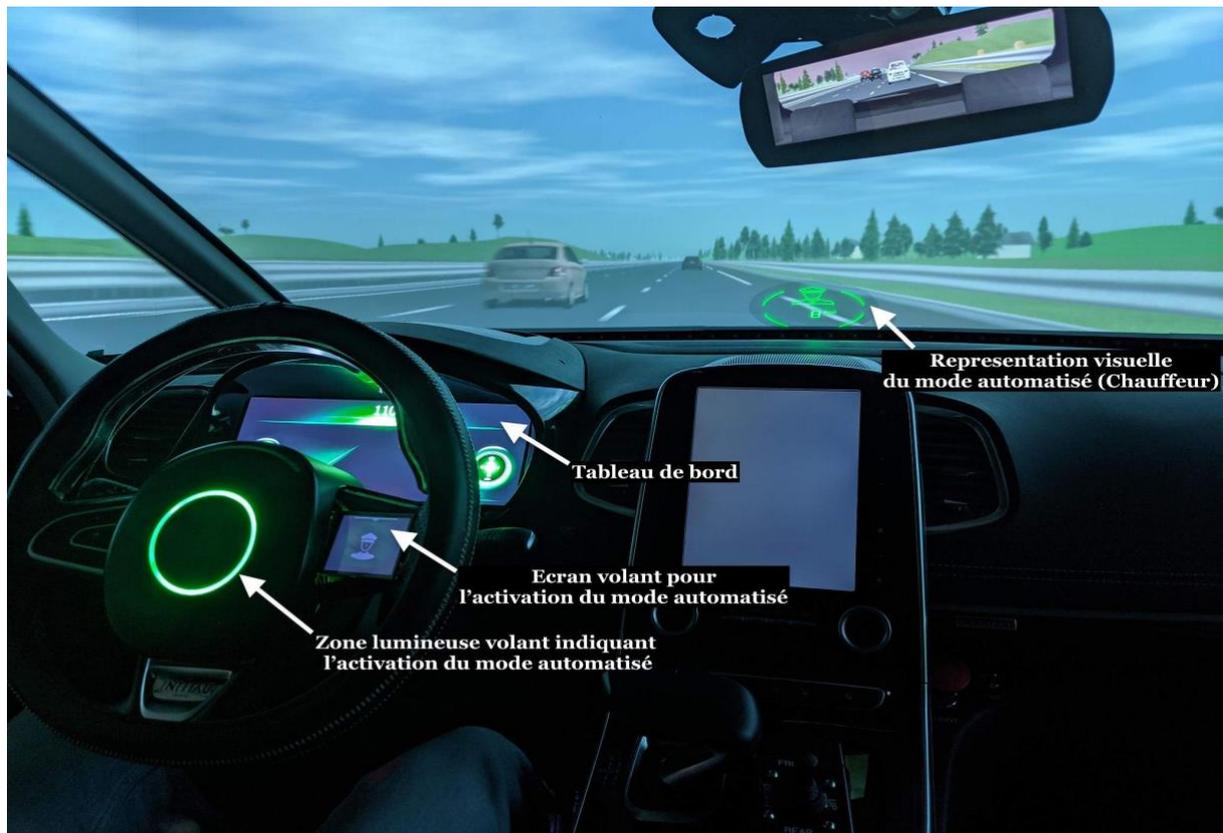


Figure 5.1: Interface CMI, elle sert de référence dans cette expérimentation (Baseline)

L'interface "Assistant vocal" représente l'interface "Baseline" enrichie des messages vocaux de l'assistant. Elle est obtenue en posant la tablette qui exécute l'application de l'assistant (face écran vers le bas) au milieu de la planche de bord du cockpit. Dans cette interface l'assistant prend la même représentation visuelle iconique que le chauffeur dans l'interface "Baseline".

Enfin, l'interface "Assistant Visuel" représente l'interface "Assistant Vocal" avec une représentation visuelle différente. Celle-ci est de type humanoïde réaliste. Elle est projetée dans le cockpit sous la forme d'un hologramme en trois dimensions. Elle est obtenue en posant la tablette qui exécute l'application de l'assistant (face écran vers le haut) au milieu de la planche de

bord du cockpit. La pyramide en plexiglass est ensuite posée sur l'écran pour générer l'image en trois dimensions sous forme d'hologramme.



Figure 5.2 : Interface Baseline enrichie par un assistant vocal (Assistant Vocal)

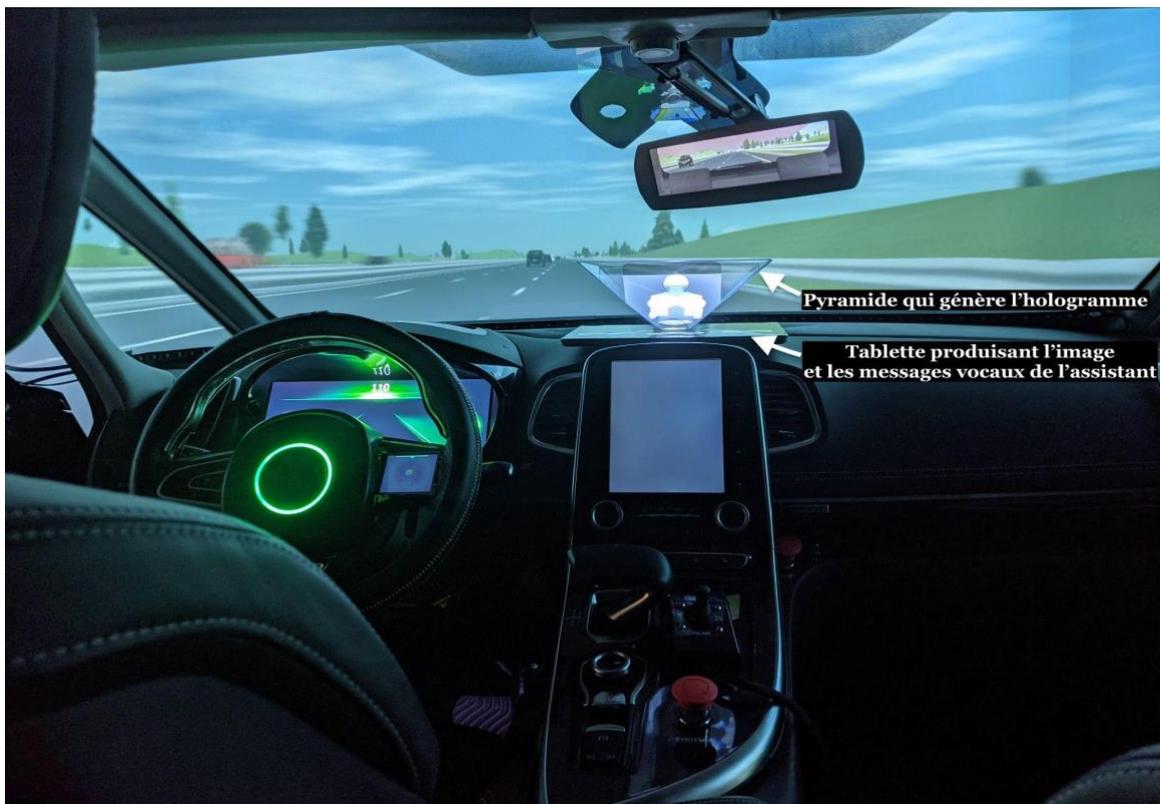


Figure 5.3 : Interface Assistant vocal enrichie d'une représentation visuelle de l'assistant (Assistant Visuel)

III. Questions de recherche et Hypothèses

Le but de cette expérimentation est de répondre aux questions suivantes. Pour chaque question, des hypothèses ont été formulées.

(Q1) : L'augmentation d'attributs anthropomorphiques entraîne-t-il une augmentation de la perception d'anthropomorphisme ?

- H1 : L'anthropomorphisme perçu est plus élevé lorsque l'interface intègre l'assistant représenté visuellement par rapport à l'interface intégrant l'assistant vocal et/ou l'interface Baseline (CMI).

(Q2) : L'augmentation d'attributs anthropomorphiques entraîne-t-il une augmentation du niveau de la confiance envers le système automatisé ?

- H2: Au cours de l'expérimentation (scénarios d'Entraînement, Activation, TOR 60, TOR 10 et Brouillard) le niveau de confiance est plus élevé pour les participants ayant expérimenté l'assistant représenté visuellement que pour les participants ayant expérimenté l'assistant vocal et/ou la baseline (CMI).
- H3 : A la fin de l'expérimentation, le niveau de confiance est plus élevé pour les participants ayant expérimenté l'assistant représenté visuellement que pour les participants ayant expérimenté l'assistant vocal ou la baseline (CMI).

(Q3) : La perception d'anthropomorphisme influence-t-elle la confiance ?

- H4 : Il existe une corrélation entre l'anthropomorphisme perçu et le niveau de confiance.

(Q4) : L'augmentation d'attributs anthropomorphiques entraîne-t-il de meilleures performances de conduite ainsi qu'une meilleure expérience avec le système de conduite automatisé ?

- H5 : Durant les scénarios reprise de contrôle en 60s (TOR 60) et en 10s (TOR 10), les performances de conduite (temps de réaction, écart à l'axe, temps avant collision) sont meilleures lorsque l'alerte de reprise de contrôle est émise par l'assistant représenté visuellement comparativement à l'assistant vocal ou la baseline (CMI).
- H6 : Durant les scénarios TOR 60 et TOR 10 l'expérience des participants est meilleure lorsque l'alerte de reprise de contrôle est émise par l'assistant représenté visuellement comparativement à l'assistant vocal ou la baseline (CMI).

- H7 : Durant le scénario du brouillard, les participants sont plus rassurés (reprennent moins le contrôle de la conduite et ont une meilleure expérience) par l'assistant représenté visuellement comparativement à l'assistant vocal ou la baseline (CMI).

IV. Protocole expérimental

Cette expérimentation a été réalisée sous la forme d'une simulation de conduite dans un cockpit de voiture autonome équipée d'une interface multimodale.

1. Matériel

L'environnement de simulation a été conçu et développé par l'équipe du projet CMI. L'assistant virtuel a été conçu séparément avant d'être intégré à l'architecture CMI.

1.1. L'environnement de simulation

L'expérimentation se déroule dans un garage sur le site de L'IRT SystemX. Pour simuler la conduite, une Renault Espace dont le cockpit a été équipé d'une interface multimodale est installée dans le garage. Les scénarios de conduite réalisés par l'équipe Nervtech au moyen du logiciel AVS Simulation sont projetés sur un écran panoramique afin de créer un environnement immersif pour le participant (figure 5.4 et 5.5). Toute l'expérimentation a été filmée par un système de plusieurs caméras installées à l'intérieur du cockpit.



Figure 5.4 : Environnement de l'expérimentation



Figure 5.5 : Cockpit et écran panoramique

2. Participants

Trente-six personnes ont participé à l'expérimentation. Selon le design expérimental inter-sujets, trois groupes de 12 personnes ont été formés et chacun des groupes a expérimenté l'une des trois interfaces. Les participants ont été recrutés par la société Eurosyn en se basant sur les critères suivants : une expérience de conduite (3 ans minimum), une conduite régulière (au moins 3 fois par semaine) sur plusieurs types de route (ville, autoroute, voies rapides), une connaissance minimale des systèmes d'aide à la conduite et un niveau de confiance bas dans l'automatisation de la conduite entre 0 et 6 points sur l'échelle de Likert. Cela signifie que les participants doivent être peu confiants dans l'automatisation de la conduite sans être réfractaires à cette technologie. Pour les participants ayant expérimenté les interfaces "Assistant Vocal" et "Assistant Visuel", une expérience minimale avec les assistants virtuels est demandée (connaissance de la technologie sans être réfractaires). D'autres critères d'exclusion tels que le mal des transports ou de simulateur ainsi que les problèmes visuels et auditifs ont été appliqués. Dans les trois groupes, un équilibre entre genres et tranches d'âge a été respecté (autant de femmes que d'hommes, les catégories Jeune, En couple et Post-Familial ont été représentées).

3. Déroulement de l'expérimentation

L'expérimentation s'est déroulée en plusieurs étapes. La première étape consiste dans l'accueil des participants sur le lieu de l'expérimentation. Une explication détaillée du but de l'expérimentation et les différentes consignes leur sont données. La deuxième étape est dédiée à l'expérimentation proprement dite et le recueil des données. Enfin une discussion informelle à la fin de l'expérimentation pour recueillir le ressenti des participants et les remercier.

3.1. Procédure

Afin d'introduire le moins de biais possible, les consignes ont été rédigées et sont lues au participant avant le début de chaque scénario de conduite. Au total, six scénarios de conduite ont été utilisés au cours de l'expérimentation. Deux scénarios ont été consacrés à l'entraînement et quatre scénarios (Activation, TOR 60, TOR 10, Brouillard) à l'expérimentation proprement dite.

Scénario	Description
Scénario d'entraînement 1	Premier scénario effectué par le participant. Ce scénario est destiné à la découverte des différentes interfaces présentes dans le cockpit et des procédures d'activation et de désactivation du mode autonome
Scénario d'entraînement 2	Ce scénario est prévu pour que le participant découvre la procédure de demande reprise de contrôle en 60s. Durant ces scénarios d'entraînement, l'expérimentateur accompagne le participant dans sa découverte pour expliquer et répondre aux éventuelles questions.
Scénario Activation	Ce scénario est le premier de la phase de test proprement dite. Son but est d'évaluer la performance du participant lors de sa première activation du mode automatisé en toute autonomie.
Scénario Reprise de contrôle en 60s (TOR 60)	Le scénario du TOR 60 inclut un trajet de 6 min en mode automatisé qui se termine par une demande de reprise de contrôle non urgente au cours de laquelle le participant dispose de 60 secondes pour reprendre le contrôle du véhicule. Cette demande est causée par la présence d'une sortie d'autoroute sur le trajet.
Scénario Reprise de contrôle en 10s (TOR 10)	Le scénario du TOR 10 inclut un trajet de 4 min en mode automatisé qui se termine par une demande de reprise de contrôle urgente au cours de laquelle le participant dispose de 10 secondes pour reprendre le contrôle du véhicule. Cette demande est causée par un défaut capteur détecté par le système.

Scénario Brouillard (Réassurance)	Le scénario du brouillard inclut un trajet en mode automatisé durant 4 min dans des conditions météo dégradées (brouillard). Au bout de 4 min le brouillard s'intensifie et le système décide d'adapter sa vitesse en freinant. Le participant est informé des intentions du système au travers des interfaces mais il n'y a pas de demande de reprise de contrôle.
-----------------------------------	---

Tableau 5.1 : Scénario de conduite réalisés par les participants au cours de l'expérimentation

Les consignes suivantes sont données pour les trois premiers scénarios :

- « Le scénario de conduite démarre à l'arrêt sur une bretelle d'autoroute. Je vous demande de démarrer le véhicule et de vous insérer sur l'autoroute. Une fois sur l'autoroute, activez le mode autonome dès qu'il vous est proposé. Je vous passerai le téléphone à ce moment-là pour jouer au jeu 2048. Si l'alerte de reprise en main se déclenche à un moment durant la conduite autonome, vous devez interrompre le jeu et reprendre le contrôle de la conduite le plus vite possible. »

Pour le scénario du Brouillard, où le but est d'évaluer le niveau de confiance du participant par sa capacité à laisser le système gérer une situation dégradée, la consigne est la suivante :

- « Le scénario de conduite démarre à l'arrêt sur une bretelle d'autoroute. Je vous demande de démarrer le véhicule et de vous insérer sur l'autoroute. Une fois sur l'autoroute, activez le mode autonome dès qu'il vous est proposé. Je vous passerai le téléphone à ce moment-là pour jouer au jeu 2048. Dans ce scénario, vous êtes libres de reprendre la main à tout moment si vous en ressentez le besoin. »

Les séances d'expérimentation sont individuelles et durent entre 2 et 3h. Après l'accueil du participant dans le respect des règles sanitaires en vigueur au moment de l'expérimentation, des explications sur l'objectif de l'expérimentation et du projet CMI sont données. Nous présentons ensuite les différentes données collectées dans le cadre de l'expérimentation avant de recueillir le consentement du participant par signature d'un formulaire RGPD prévu à cet effet. Le participant répond à un premier questionnaire qui évalue son modèle mental de la conduite automatisée.

Un second questionnaire sur le mal de simulateur nous permet de déterminer si le participant se trouve dans de bonnes conditions physiques pour réaliser une conduite en simulateur.

La séance se poursuit avec un tutoriel qui présente les différentes interfaces du cockpit CMI ainsi que les procédures d'utilisation. Le participant découvre donc comment activer et désactiver le

mode autonome, la différence entre le mode manuel et le mode autonome ainsi que les différentes alertes de reprise en main du véhicule. Tout au long du tutoriel, nous répondons aux questions du participant pour nous assurer que les informations sont comprises.

Le tutoriel est suivi par une phase d'entraînement sur le simulateur. Le participant s'installe dans le cockpit dont les différents composants lui sont présentés. Comme expliqué précédemment, deux scénarios de conduite sont utilisés pour que le participant comprenne l'activation, la désactivation, le fonctionnement des modes d'automatisation, la reprise en main en 60s, ainsi que la reprise en main en 10s.

A la fin de la phase d'apprentissage, le participant remplit un questionnaire de confiance puis les consignes concernant l'expérimentation proprement dite lui sont exposées. La tâche secondaire retenue pour cette expérimentation (Jeu 2048) est également présentée. Le jeu 2048 est un jeu de puzzle mathématique créé en 2014 par Gabriele Cirulli. Le but du jeu est d'arriver à au nombre 2048 en combinant des tuiles de nombres identiques (2, 4, 8 etc...). Les tuiles peuvent être déplacées dans le sens horizontal (droite ou gauche) et vertical (haut ou bas). Ce jeu a été choisi d'une part parce que c'est une tâche visuelle et manuelle qui mobilise l'attention du conducteur mais aussi les ressources nécessaires à l'activité de conduite, lui permettant ainsi de laisser le contrôle au système automatisé. Aussi, il représente une tâche de vie à bord réaliste que pourrait effectuer un conducteur lorsque le mode automatisé est activé.

Nous accordons quelques minutes aux participants qui ne connaissent pas ce jeu afin de s'y familiariser.

La phase d'expérimentation se compose de quatre scénarios de conduite. Pour tous les participants, le premier scénario porte sur l'activation du mode autonome et le dernier scénario porte sur la réassurance en situation dégradée. Un carré latin nous permet de déterminer l'ordre du deuxième et du troisième scénario pour chaque participant. Tous les scénarios débutent avec la lecture de la consigne et se terminent avec un entretien d'explicitation (Vermersch,1994). L'entretien d'explicitation a pour but de décrire une expérience vécue à la manière d'une introspection. A la différence des entretiens semi-directifs ou directifs, ce type d'entretien ne comporte pas de questions précises. Le participant est invité à raconter avec ses propres mots l'expérience qu'il a vécu. Des relances sont effectuées tout au long de l'entretien par l'expérimentateur pour permettre au participant de donner le plus de détails possibles sur son expérience. L'entretien est suivi d'un questionnaire sur la confiance du participant. Des pauses sont régulièrement proposées au participant tout au long de l'expérimentation.

A la fin des scénarios de conduite, le participant répond aux derniers questionnaires :

- L'anthropomorphisme perçu (Waytz,2014)
- La confiance globale

3.2 Mesures

Tout au long de l'expérimentation les mesures suivantes ont été réalisées :

1. L'anthropomorphisme dispositionnel (Waytz et al., 2010) réalisé au moment du recrutement et l'anthropomorphisme perçu (Waytz et al., 2014) réalisé à la fin de l'expérimentation.
2. La confiance initiale auto-reportée (Rajaonah, 2006) réalisée au moment du recrutement et la confiance situationnelle (Holthausen et al., 2020) réalisée après chaque scénario de conduite
3. Performances de conduite enregistrées pendant chaque scénario de conduite par le logiciel Scanner.
4. Les entretiens d'explicitation (Vermersch,1994) sont réalisés à la fin de chaque scénario de conduite.

V. Résultats

1. Perception d'anthropomorphisme

Cette partie a pour but de répondre à la question suivante :

(Q1) : L'augmentation d'attributs anthropomorphiques entraîne-t-il une augmentation de la perception d'anthropomorphisme ? Autrement dit, l'interface "Assistant Visuel" est-elle plus anthropomorphique l'interface "Assistant Vocal" qui serait elle-même plus anthropomorphique que l'interface "Baseline" ?

La perception d'anthropomorphisme a été mesurée avec une échelle auto-reportée (Waytz, 2014) (voir Annexe IV). Cette échelle comprend quatre questions qui ont pour but de mesurer à quel point les participants perçoivent le véhicule automatisé comme intelligent, conscient de son environnement, capable d'anticiper un événement et de planifier un trajet. Un score d'anthropomorphisme perçu est calculé pour chaque participant en réalisant une moyenne des

réponses à chacune de ces quatre questions. Plus le score est élevé et proche de 10, plus l'interface est perçue comme anthropomorphique.

La distribution des scores d'anthropomorphisme perçu (Figure 5.7) suggère que l'interface Assistant Vocal est perçue comme plus anthropomorphique (score médian = 8,5) que les interfaces Assistant Visuel (score médian = 7,5) et Baseline (score médian = 7,5). En revanche, ces différences ne sont pas statistiquement significatives comme le montre le test de Kruskal-Wallis (chi-squared = 0.99, df = 2, p-value = 0.61). En d'autres termes, nos résultats ne nous permettent pas de confirmer l'hypothèse selon laquelle l'augmentation d'attributs anthropomorphiques au sein d'une interface conduirait à un niveau d'anthropomorphisme perçu plus élevé.

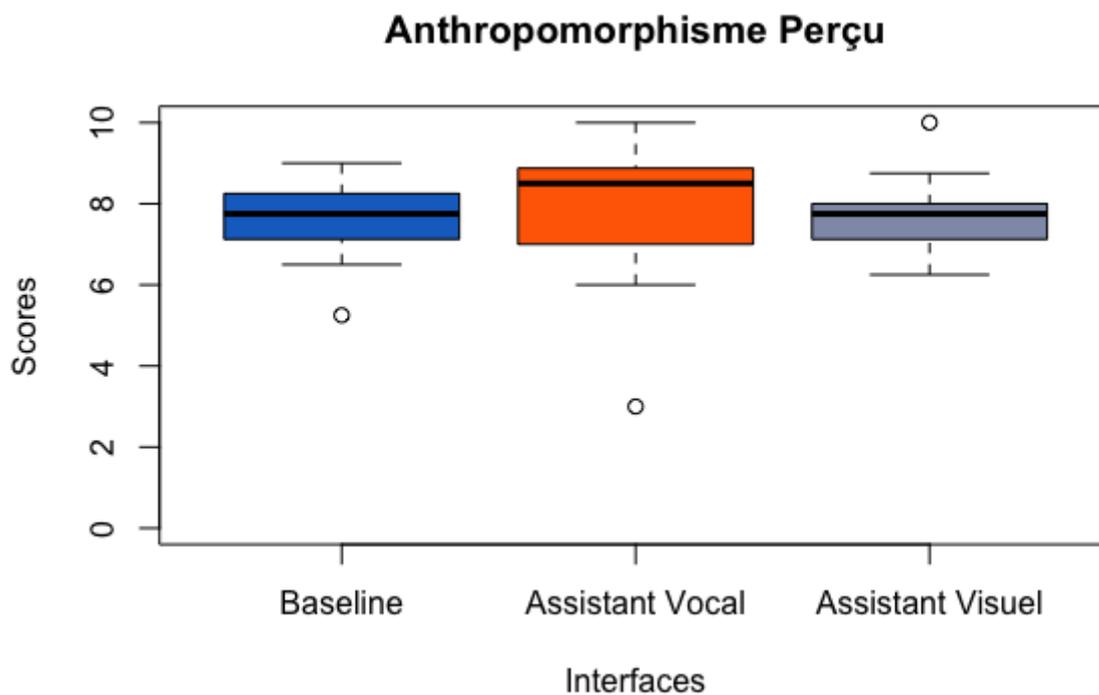


Figure 5.7 : Scores d'anthropomorphisme perçu par interface (Voire Annexes VII Tableau A.1 pour Scores médians et les écarts inter quartiles)

2. Confiance

Les analyses des données collectées sur la confiance vont nous permettre de répondre à la question Q2. L'interface "Assistant Visuel" inspire-t-il plus confiance que l'interface "Assistant Vocal" qui elle-même inspire plus confiance que l'interface "Baseline" ?

La confiance a été mesurée, pour chaque interface, à différents moments de l'expérimentation : avant toute interaction (Initiale), après un entraînement sur le simulateur (Post-Training), après chaque scénario de conduite durant la séance d'expérimentation (Activation, TOR 60, TOR 10, Brouillard) et à la fin de l'expérimentation. Dans la présentation des résultats, nous désignons cette confiance par le terme "**Multidimensionnelle**". Ce terme sert à caractériser le fait que les échelles utilisées pour la mesurer ont été construites sur la base de différentes dimensions de la confiance. Il sert aussi à marquer la différence avec ce que nous appelons la confiance "**Globale**" qui représente la réponse à une question générale sur la confiance.

Pour calculer le score de confiance multidimensionnelle initiale, les scores des items 5, 11, 13 et 14 à 19 de l'échelle de confiance initiale (voir Annexe II) ont été inversés puis une moyenne des scores de tous les items de l'échelle a été calculée. La même procédure a été utilisée pour calculer le score de confiance Post-Training. Les scores de confiance multidimensionnelle pour chaque scénario de conduite ont été calculés en inversant les scores des items 2, 4, 5 et 7 de l'échelle de confiance multidimensionnelle (voir Annexe III) puis une moyenne des scores de tous les items de l'échelle a été calculée. La confiance post-Expérimentation a été mesurée avec un questionnaire à un seul item (voir Annexe V). La mesure de la confiance globale nous permet d'étudier l'évolution de la confiance entre le début et la fin de l'expérimentation. Ainsi, un score de confiance Globale Initial et Post-Training est calculé en se basant sur l'item 2 de l'échelle de l'échelle de confiance initiale (voir Annexe II). Un score de confiance Globale est calculé pour chaque scénario de conduite en se basant sur l'item 1 de l'échelle de Holthausen et al., 2020) (voir Annexe III). Enfin, la confiance globale Post-Expérimentation est mesurée au moyen d'un questionnaire à un item (voir Annexe V) à la fin de l'expérimentation.

Les résultats révèlent les choses suivantes :

- Pour les 4 scénarios de conduite réalisés au cours de l'expérimentation (Activation, TOR60, TOR10, Brouillard), il n'est pas mis en évidence de différence significative entre les trois interfaces. En d'autres termes, nos résultats ne nous permettent pas de confirmer l'hypothèse selon laquelle l'augmentation d'attributs anthropomorphiques au sein d'une interface conduirait à un niveau de confiance plus élevé
- Les résultats obtenus avec les mesures globales et multidimensionnelles de la confiance sont majoritairement concordants, sauf pour la confiance initiale. En effet, le niveau de confiance globale Initial (Tableau 5.1) est significativement différent entre les conditions Baseline et Assistant Vocal ou Baseline et Assistant Visuel (Tableau 5.2 et 5.3). En

revanche, pour la confiance multidimensionnelle Initiale il n'y a pas de différence significative entre les trois interfaces (Tableau 5.4)

- Enfin, le niveau de confiance Post-Training (globale et multidimensionnelle) est significativement plus élevé dans la condition Baseline que dans les conditions Assistant Vocal et Visuel.

	Initial	Post-Training	Activation	TOR 60	TOR 10	Brouillard	Post-Expérimentation
Baseline	7 (1)	8 (0)	10 (1.25)	9.5(1.25)	7 (3.5)	8 (2.25)	8(2)
Assistant Vocal	6(1)	7 (1.25)	8 (2.25)	9 (1.25)	8 (4.25)	7 (3)	7.5(1.25)
Assistant Visuel	6(1)	7 (2)	8.5 (2)	9 (1.5)	7 (1.5)	8 (2)	7.5(2)
Test Kruskal-Wallis	0.0002*	0.0284*	0.0603	0.415	0.7895	0.6246	0.3944

Tableau 5.1 : Confiance globale (Scores médians et Écarts interquartiles)

	Assistant Visuel	Assistant Vocal
Assistant Vocal	1,00	
Baseline	0.0005*	0.0012*

Tableau 5.2 : Confiance globale Initiale

(P-values du Test Mann-Whitney par paires avec une correction Bonferroni ; Hyp alt= Baseline > Assistant Vocal et Visuel)

	Assistant Visuel	Assistant Vocal
Assistant Vocal	1,00	
Baseline	0.029*	0.031*

Tableau 5.3: Confiance globale Post-Training

(P-values du Test Mann-Whitney par paires avec une correction Bonferroni ; Hyp alt= Baseline > Assistant Vocal et Visuel)

	Initial	Post-Training	Activation	TOR 60	TOR 10	Brouillard
Baseline	6.7 (1.67)	8.03 (0.98)	8.43(1.14)	9.07(1.00)	5.71(3.64)	7(2.86)
Assistant Vocal	6.07(1.68)	6.78(1.70)	8.79(1.64)	9.29(1.39)	6.71(2.96)	6.64 (1.07)
Assistant Visuel	5.74(1.05)	6.55(1.54)	8(1.25)	8.93(1.11)	5.29(2.61)	6.36(1.86)
Test Kruskal-Wallis	0.1271	0.0122*	0.3823	0.5545	0.7003	0.5618

Tableau 5.4 : Confiance multidimensionnelle (Scores médians et Écarts interquartiles)

	Assistant Visuel	Assistant Vocal
Assistant Vocal	1,00	
Baseline	0.0068*	0.0307*

Tableau 5.5: Confiance multidimensionnelle Post-Training

(P-values du Test Mann-Whitney par paires avec une correction Bonferroni ; Hyp alt= Baseline > Assistant Vocal et Visuel)

Notre troisième question de recherche (Q3) porte sur l'influence de la perception d'anthropomorphisme sur la confiance. Pour y répondre, nous avons réalisé une analyse de corrélations entre les scores d'anthropomorphisme perçu et la confiance globale post-Expérimentation. Les résultats (Figure 5.8) révèlent une corrélation moyenne, mais significative entre l'anthropomorphisme perçu et la confiance globale post-Expérimentation ($\rho = 0.50$, $p\text{-value} = 0.002$).

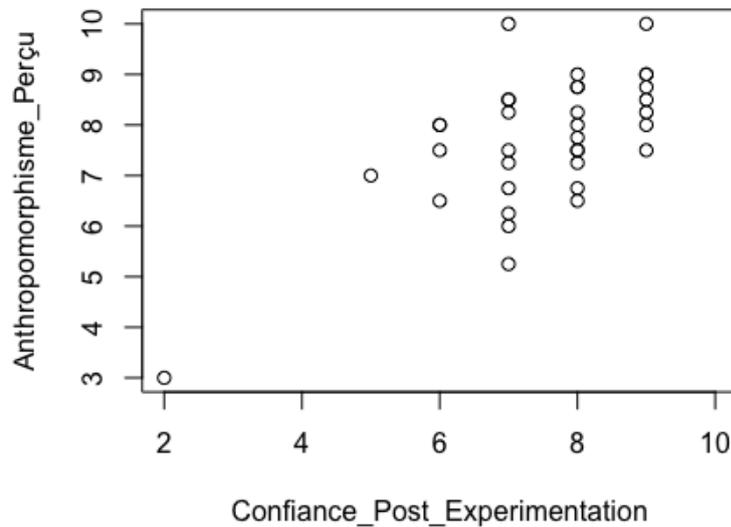


Figure 5.8: Graphique de corrélation ($\rho = 0.5$, $p\text{-value} = 0.002$) entre l’anthropomorphisme perçu (0: pas du tout anthropomorphique - 10 Très anthropomorphique, selon Waytz,2014) et la confiance Post-Expérimentation (selon l’échelle adaptée de Holthausen et al., 2020 0: pas confiant - 10 très confiant)

3. Performances et Expérience (selon le scénario de conduite)

La dernière question posée dans le cadre de cette étude (Q4) porte sur les performances et l’expérience des participants dans les différents scénarios de conduite. L’interface “Assistant Visuel” permet-il aux participants d’effectuer de meilleures performances et d’avoir une meilleure expérience avec le système automatisé que l’interface “Assistant Vocal” ? Et l’interface “Assistant Vocal” permet-il aux participants d’effectuer de meilleures performances et d’avoir une meilleure expérience avec le système automatisé que l’interface “Baseline” ?

La performance des participants a été mesurée grâce aux enregistrements du logiciel Scanner. Les indicateurs de performance (Temps de réaction, Écart à l’axe, Temps avant collision) ont été calculés à partir de ces données. De plus, l’expérience vécue par les participants a été recueillie au travers d’entretiens d’explicitation. Ces entretiens ont été analysés en trois étapes suivant la méthode décrite ci-après :

-Étape 1 : chaque entretien vocal a été écouté et retranscrit dans une feuille Excel selon une grille de lecture. La retranscription est littérale et conserve les mots employés par le participant. Cette étape a été réalisée par un seul expérimentateur.

-Étape 2 : deux expérimentateurs ont procédé chacun de leur côté à un codage des entretiens en se basant sur la retranscription des entretiens.

-Étape 3 : Un second codage est réalisé en groupe en confrontant les résultats obtenus par chaque expérimentateur pendant le premier codage.

Les résultats de ce double codage ont été mis en forme sous la forme de graphiques pour une meilleure lisibilité.

3.1 Scénario TOR 60s

Dans ce scénario, les participants expérimentent une alerte de reprise de contrôle envoyée 60s avant la fin du mode automatisé. Dans les conditions Assistant Vocal et Assistant Visuel, le message vocal de l'assistant explique la cause de la demande de reprise de contrôle (voir Annexe VI). Cette explication n'est pas disponible dans la condition Baseline. L'analyse des données de performance révèle que le temps de réaction médian des participants (11.3 s) dans la condition Assistant Visuel est significativement plus court (Figure 5.9) que dans les conditions Assistant Vocal ou Baseline comme le montre le test de Kruskal-Wallis ($\chi^2 = 7.9595$, $df = 2$, $p\text{-value} = 0.0186$). Autrement dit, les participants réagissent plus rapidement à la demande de reprise de contrôle quand celle-ci est émise par l'assistant visuel. Ces résultats sont confirmés par un test de Mann-Whitney par paire avec une correction de Bonferroni (Tableau 5.7).

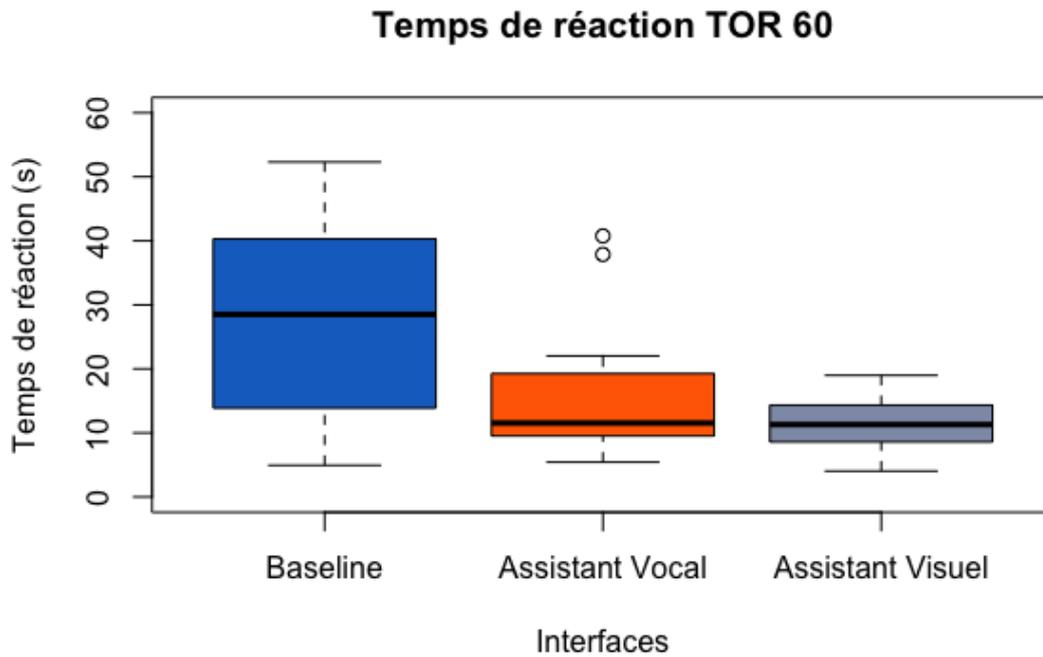


Figure 5.9 : Temps de réaction dans le scénario TOR 60 s

	Assistant Visuel	Assistant Vocal
Assistant Vocal	0.7706	
Baseline	0.0068	0.0895

Tableau 5.7: Performances TOR 60 s

(P-values du Test Mann-Whitney par paires avec une correction Bonferroni ; Hyp alt= Baseline < Assistant Vocal et Visuel)

Au-delà des performances, l'analyse des entretiens d'explicitation révèle que les participants ont bien compris qu'ils avaient 60s pour reprendre la main (Figure 5.10). En revanche, la cause de la demande de reprise de contrôle (une sortie d'autoroute) n'a pas été comprise par tous (6 participants sur 12 dans les conditions Assistant Vocal et Visuel et seulement 1 dans la condition Baseline). L'expérience vécue lors de ce scénario est positive quel que soit la condition. Les participants ont mentionné que le scénario s'était bien passé (sans difficulté) et que la désactivation était facile et confortable. Ils ont également jugé que le délai accordé par le système (60s) était suffisant pour reprendre le contrôle. (Figure 5.11).

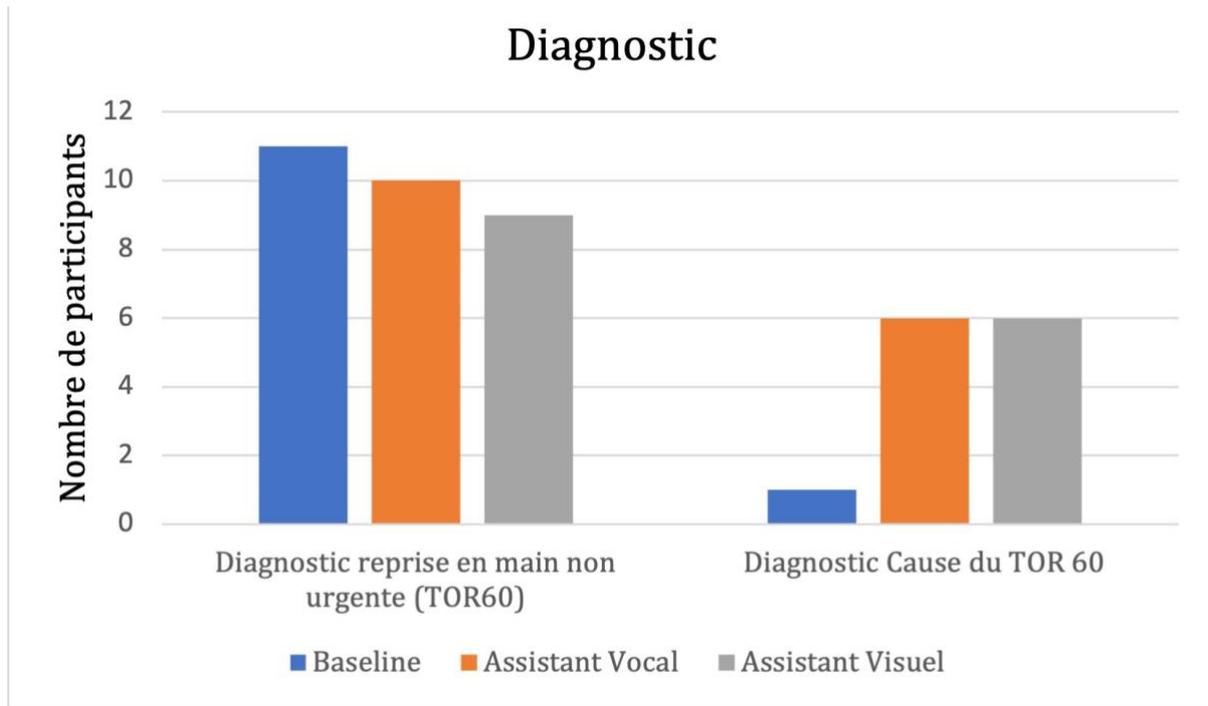


Figure 5.10 : Diagnostic et évaluation de la situation dans le cas du scénario TOR 60s

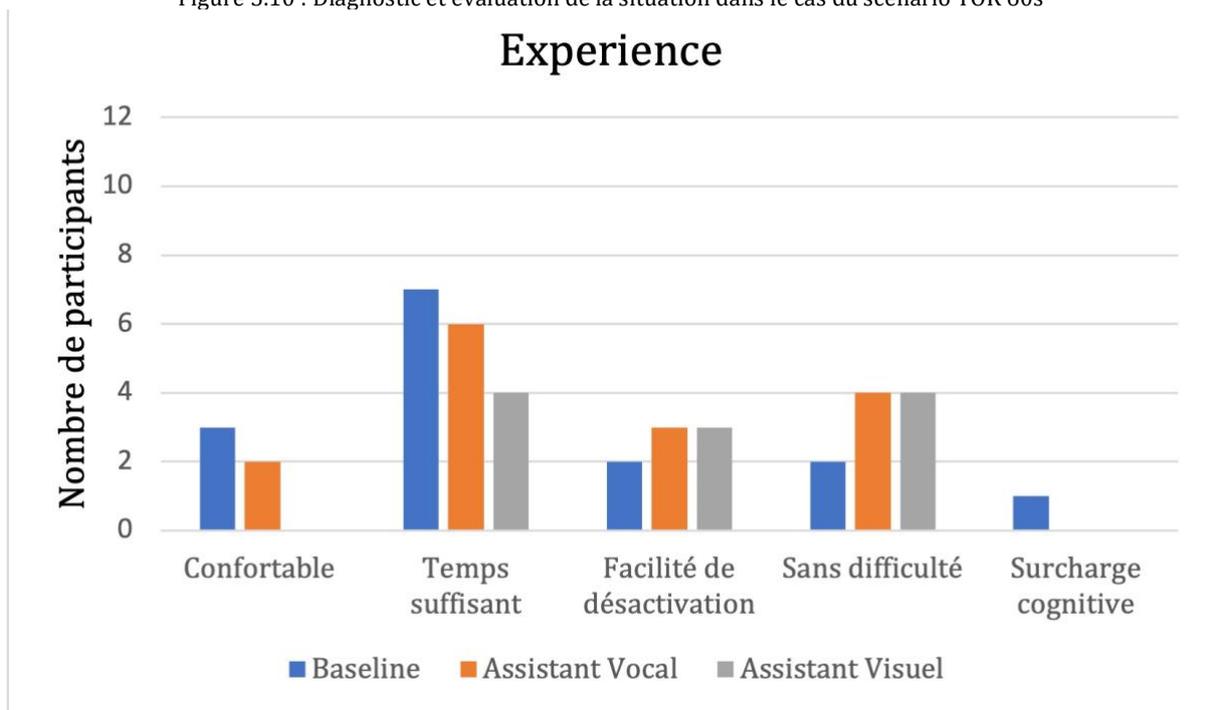


Figure 5.11: Expression des sujets concernant leur expérience dans le cadre du scénario TOR 60s

Neuf participants sur douze dans la condition Assistant Vocal contre seulement 5 dans la condition Assistant Visuel ont mentionné qu'ils avaient compris la non-urgence de la demande de reprise de contrôle (Type de TOR) grâce au message vocal de l'assistant (Figure 5.12). La plupart des

Clarisse Lawson-G p. 121

participants qui ont compris la cause du TOR (Figure 5.10) ont mentionné que c'était grâce au message vocal (4/6 dans la condition Assistant Vocal et 5/6 dans la condition Assistant Visuel.)

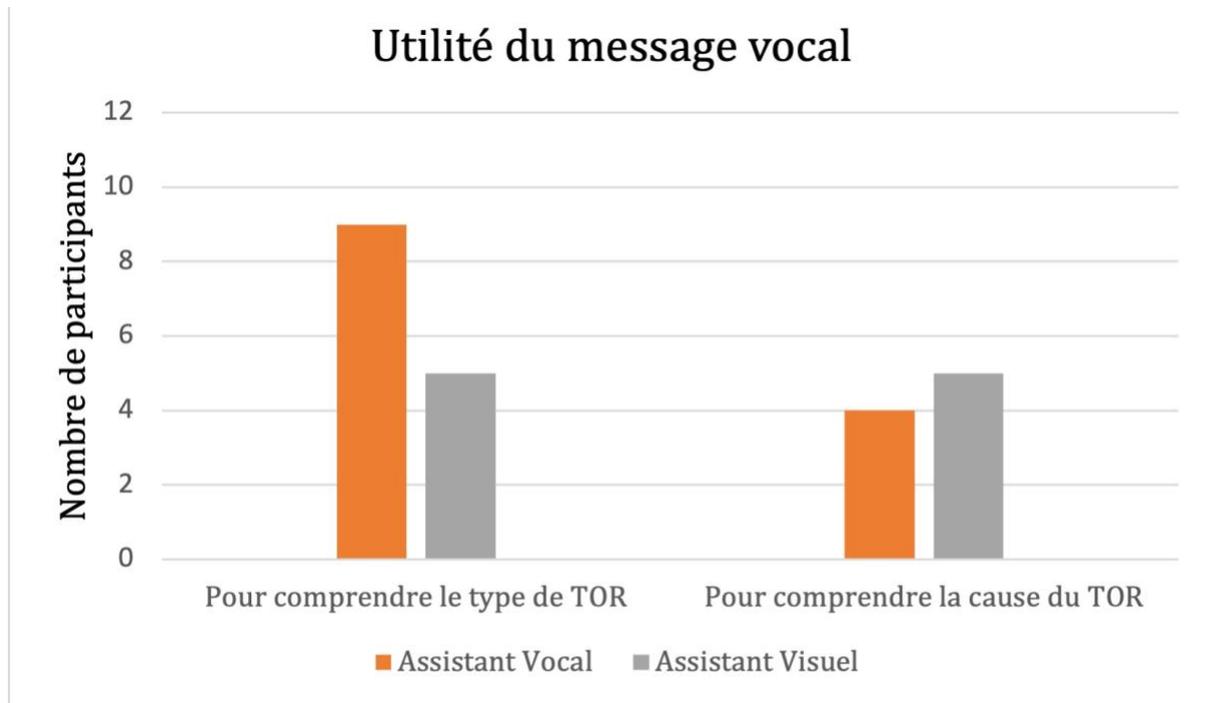


Figure 5.12 : Expression des participants concernant l'utilité du message vocal dans le cadre du scénario TOR 60s. [Le message vocal devait permettre aux participants de savoir que la demande de reprise de contrôle est non urgente (type de TOR) et d'en identifier la cause].

3.2 Scénario TOR 10s

Dans ce scénario, les participants expérimentent une alerte de reprise de contrôle envoyée 10s avant la fin du mode automatisé. Dans les conditions Assistant Vocal et Assistant Visuel, le message vocal de l'assistant explique la cause de la demande de reprise de contrôle (voir Annexe VI). Cette explication n'est pas disponible dans la condition Baseline. Nous avons formulé l'hypothèse que l'explication fournie par l'assistant devrait aider le participant à mieux comprendre la situation et à reprendre la main plus rapidement dans les conditions Assistant Vocal et Visuel. L'analyse des données de performance montre que les temps de réaction sont longs (+7s) dans tous les groupes de participants sans différence significative comme le montre le test de kruskal-Wallis ($\chi^2 = 0.8631$, $df = 2$, $p\text{-value} = 0.6495$)

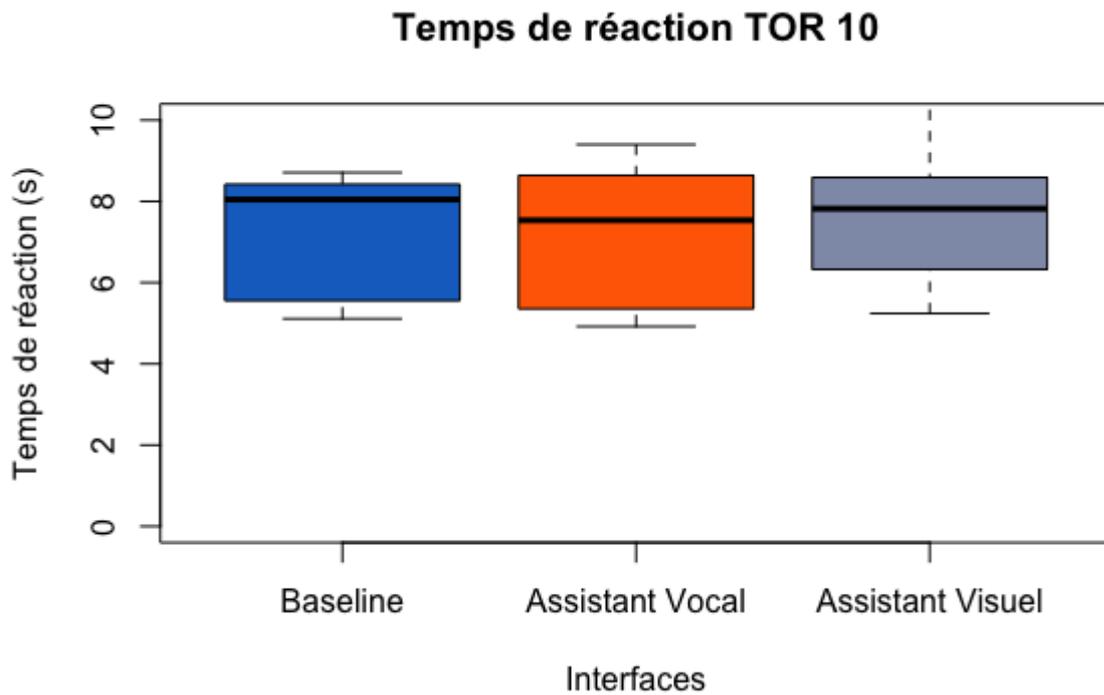


Figure 5.13 : Temps de réaction dans le scénario TOR 10 s

L'analyse des entretiens d'explicitation montre que les participants du groupe Assistant vocal ont une bonne compréhension de la situation, notamment que la demande de reprise de contrôle est urgente (Figure 5.14). En revanche, pour les groupes Baseline ou Assistant Visuel, à peine la moitié des participants ont compris qu'il s'agissait d'une demande urgente. Aussi, malgré le message vocal expliquant la cause de la demande de reprise en main dans les conditions Assistant Visuel et Vocal, les participants n'ont pas perçu cette information. Le message vocal n'a été utile ni pour diagnostiquer le type de reprise de contrôle, ni pour identifier la cause de la demande de reprise de contrôle (Figure 5.15).

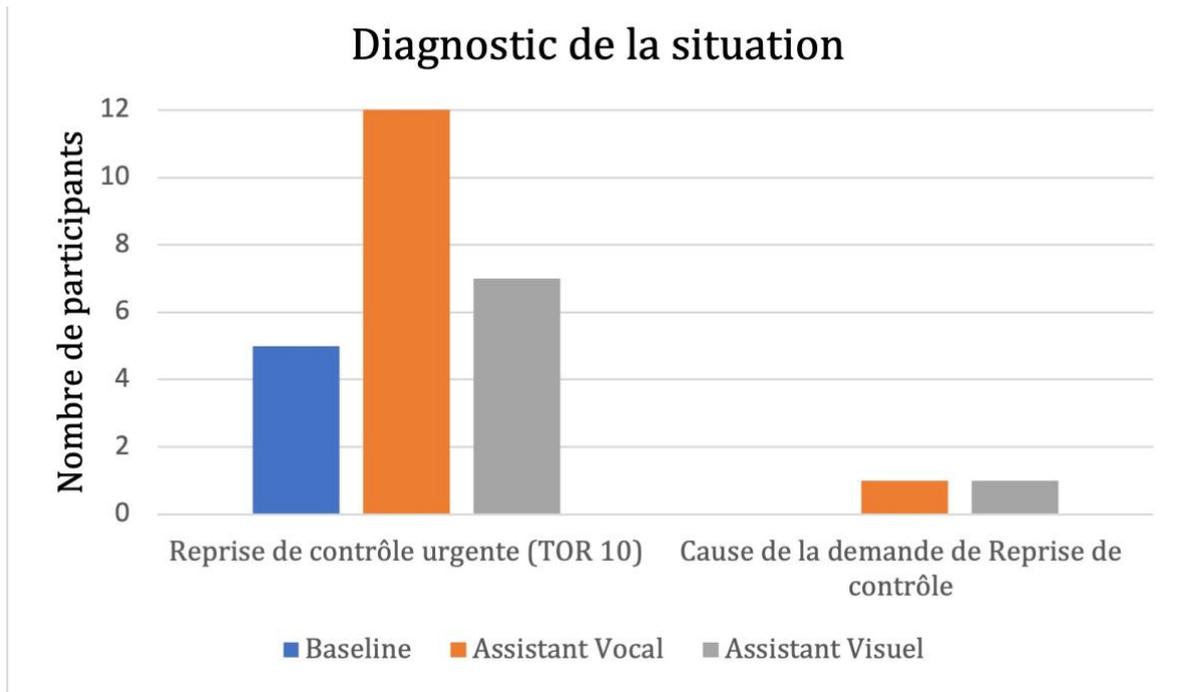


Figure 5.14: Diagnostic et compréhension de la situation dans le cas du scénario TOR 10



Figure 5.15: Expression des participants concernant l'utilité du message vocal dans le cadre du scénario TOR 10s.

Comme le montre la Figure 5.16, l'expérience des participants dans ce scénario est globalement négative quel que soit la condition expérimentée. La pression temporelle est l'expérience dominante exprimée dans tous les groupes mais surtout dans la condition Baseline. La surprise a

beaucoup plus été exprimée dans la condition Baseline que dans la condition Assistant Vocal ou encore la condition Assistant Visuel où ce ressenti est inexistant. Enfin, les participants ont exprimé de la confusion. Dans le groupe Baseline, deux participants ont confondu la demande de reprise en main urgente avec la demande non urgente. Dans les groupes Assistant Vocal et Visuel il s'agit d'une confusion concernant l'apparente différence entre la cause de la reprise en main annoncée par le message vocal de l'assistant et la situation d'urgence dans l'environnement de conduite. D'autres expériences négatives ont été mentionnées sous la forme de stress, de panique et de surcharge cognitive. On note également que quelques participants ont mentionné leur regret d'avoir fait confiance au système puisqu'ils ont été surpris par la suite.

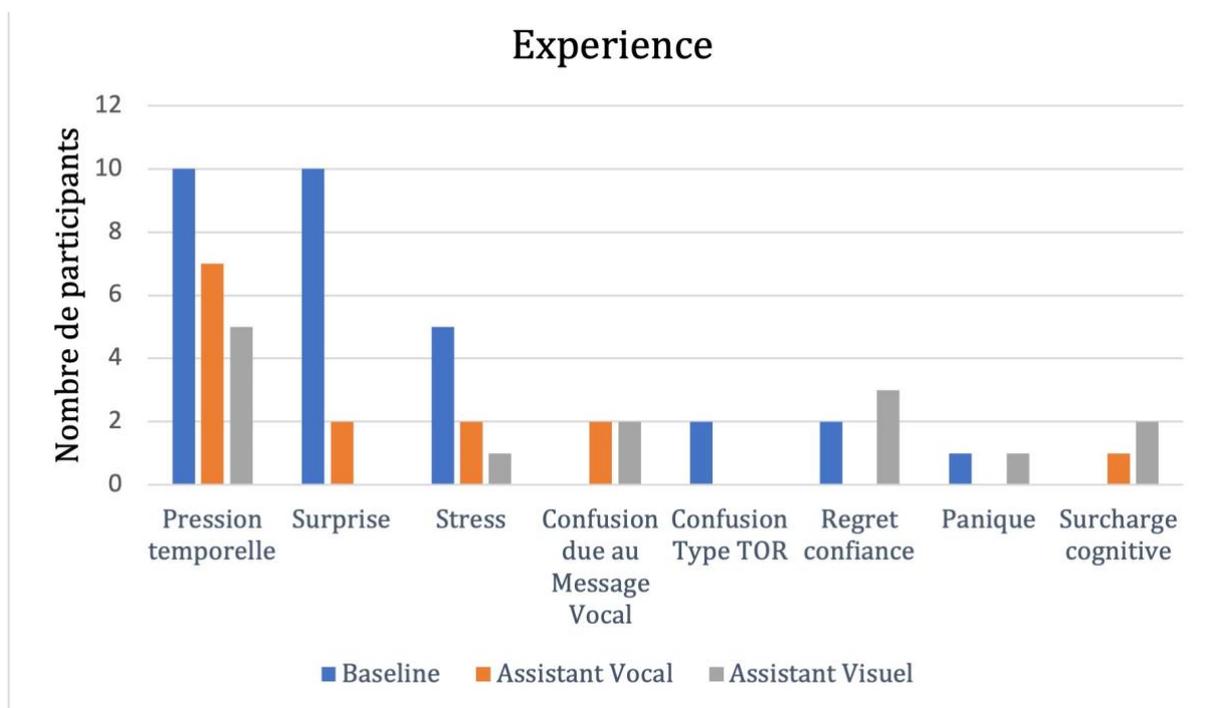


Figure 5.16: Expression des participants concernant la reprise en main urgente dans le cadre du scénario TOR 10s

Par ailleurs, certains participants des groupes Assistant Visuel et Baseline ont jugé les alertes du système comme tardives et pas suffisamment urgentes par rapport à l'urgence de la situation (Figure 5.17). Deux participants du groupe Assistant Visuel ont mentionné que le système aurait pu et dû gérer la situation tout seul au lieu de réaliser une demande de reprise de contrôle. Cette remarque montre clairement que ces participants n'ont pas compris la cause de la demande de reprise de contrôle (Défaut Capteur).

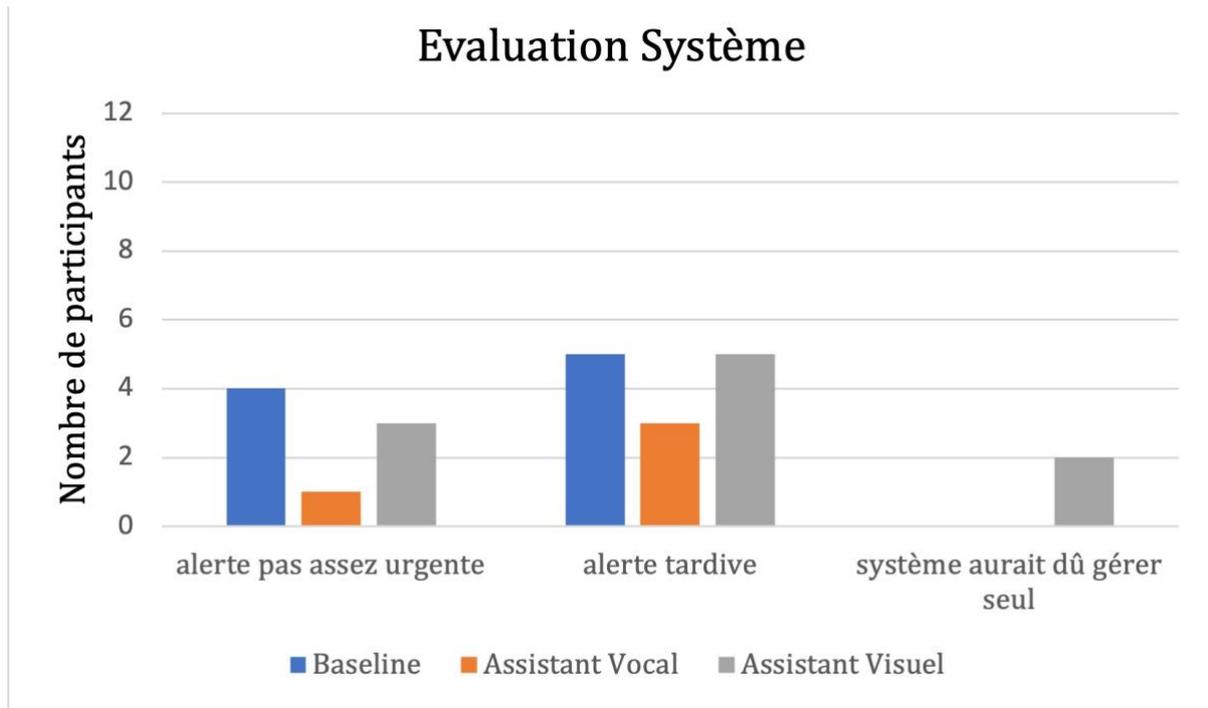


Figure 5.17 : Expression des sujets concernant l'évaluation de la réactivité du système dans le cadre du scénario TOR 10s

3.3 Scénario Brouillard

Au cours de ce scénario les participants expérimentent une situation stressante impliquant un freinage à l'initiative du système en raison d'une nappe de brouillard dense et un camion arrivant à une allure différente. L'analyse des entretiens nous permet de comprendre que la majorité des participants ont compris que le freinage du véhicule était dû à la densification du brouillard (Figure 5.18). Les participants des conditions Assistant Vocal et Visuel ont pratiquement tous perçu le camion. En revanche, dans la condition Baseline, la moitié des participants seulement a perçu le camion.

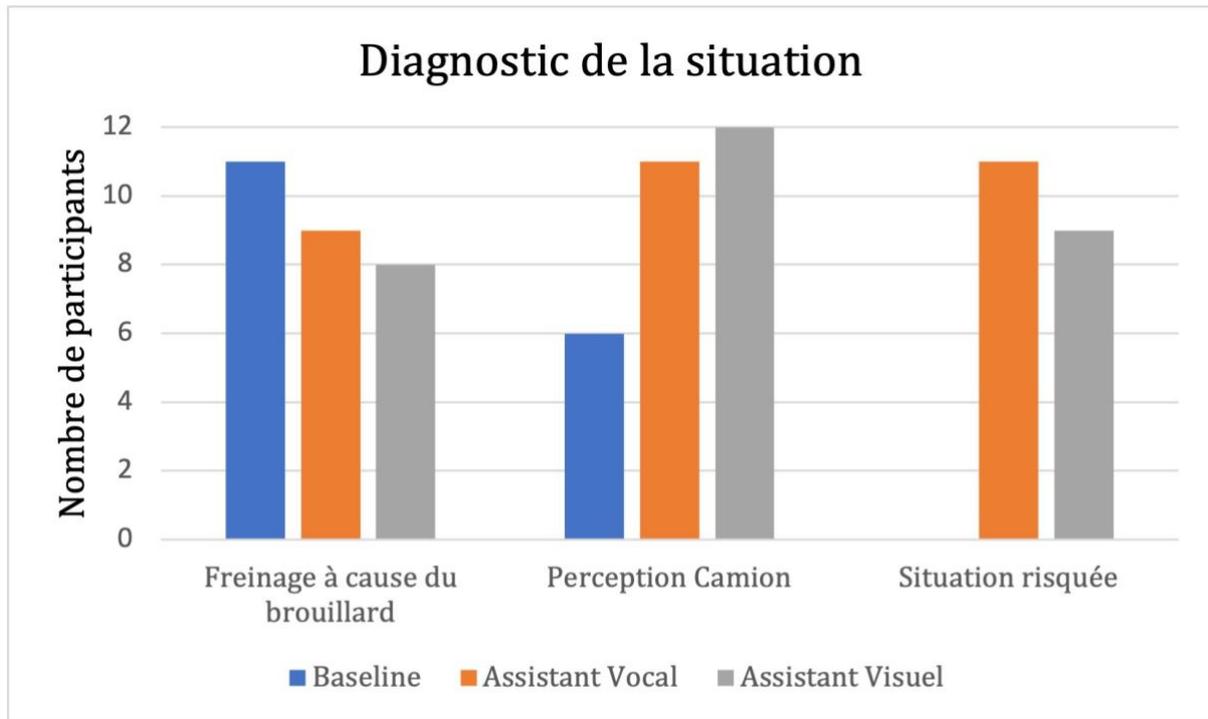


Figure 5.18 : Diagnostic et évaluation de la situation dans le cas du scénario de brouillard, pour chaque groupe de participants

Dans les conditions Assistant Visuel et Vocal, les participants ont jugé la situation comme « risquée » du fait de la présence et de la vitesse du camion. Néanmoins, ils ont décidé de laisser le système gérer la situation tout en surveillant son action (Figure 5.19). Nous notons cependant 2 reprises de contrôle dans le groupe Baseline en raison d'un doute sur les capacités du système. De même, deux participants ont repris le contrôle dans le groupe Assistant Visuel mais contrairement au groupe Baseline il s'agit d'une mauvaise interprétation du message vocal comme une demande de reprise de contrôle. Enfin, une personne a repris le contrôle dans le groupe Assistant Vocal parce qu'il a réagi par précipitation.

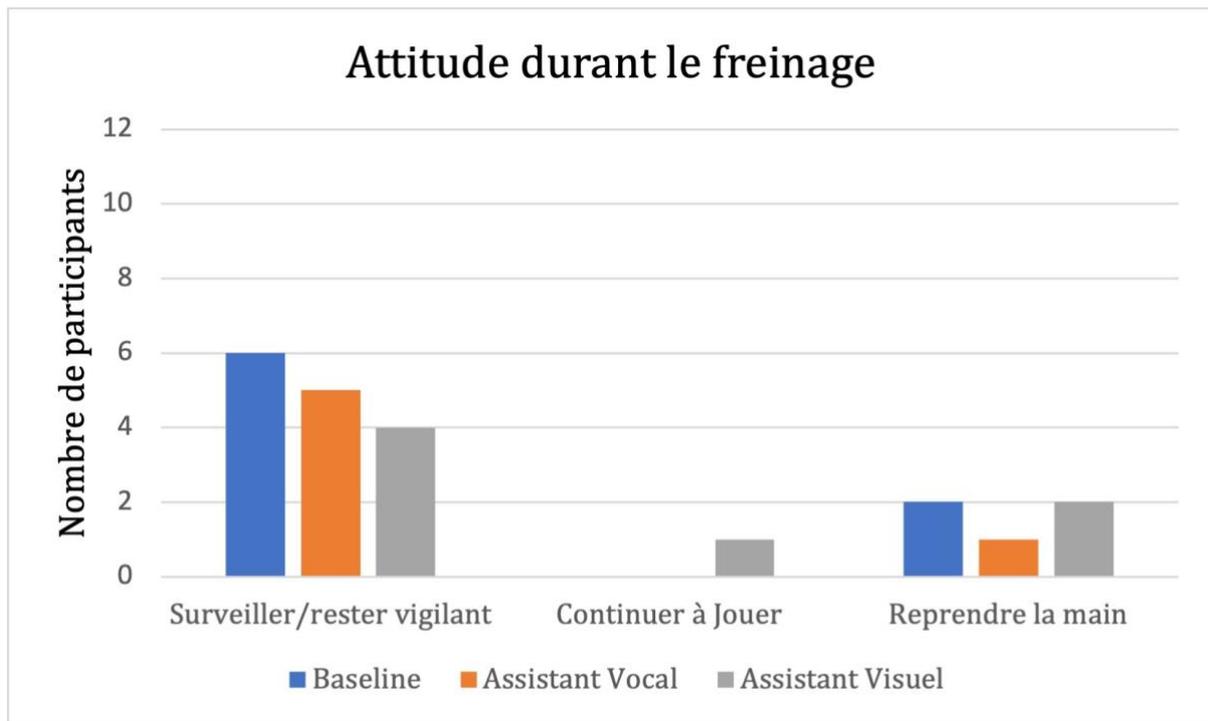


Figure 5.19: Attitude pendant le freinage au cours du scénario de brouillard pour chaque groupe de participants.

L'expérience des participants dans ce scénario est plutôt positive (Figure 5.20). Mais il n'est pas mis en évidence de différence notable entre les trois conditions. Dans les trois groupes les participants verbalisent la confiance et la réassurance dans leur discours. Cependant, l'objet de la confiance n'est pas le même selon le groupe. Pour les participants des groupes Assistant Vocal et Visuel, c'est le message vocal qui les a rassuré ou mis en confiance. En revanche, pour les participants du groupe Baseline, c'est la bonne gestion de la situation par le système qui les a rassurés ou mis en confiance.

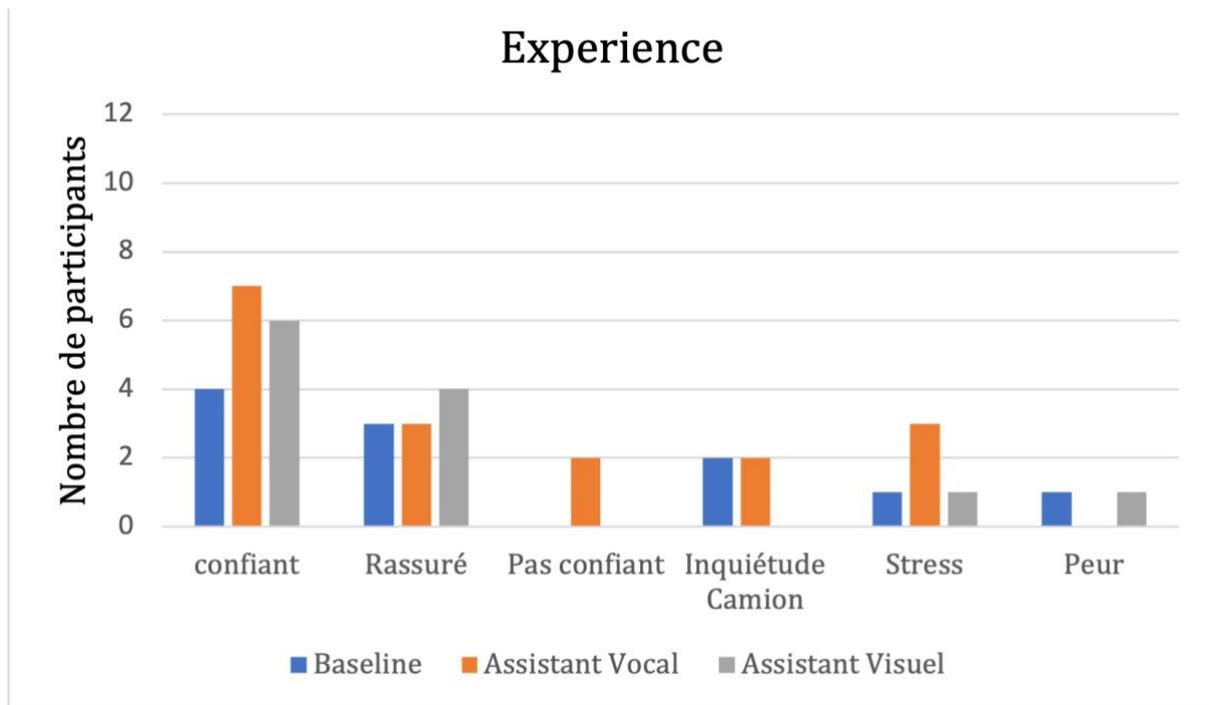


Figure 5.20: Expression des sujets pendant le freinage pour les 3 groupes de participants, au cours du scénario de brouillard.

Les participants des trois groupes ont jugé que le système avait bien géré la situation en effectuant un freinage (Figure 5.21). Cependant, le style de freinage (trop brusque, trop rapide) a été critiqué dans les 3 groupes. On observe cependant une légère différence entre la condition groupe Assistant Visuel et les deux autres conditions (plus de personnes ont verbalisé la bonne gestion de la situation par le système et moins de personnes ont critiqué le style du freinage). Peu de participants ont commenté les compétences du système dans cette situation.

Enfin, le message vocal a été globalement bien perçu dans les groupes Assistant Visuel et Vocal (Figure 5.22). Les participants ont jugé qu'il donnait confiance et qu'il était rassurant, sécurisant, nécessaire, efficace.

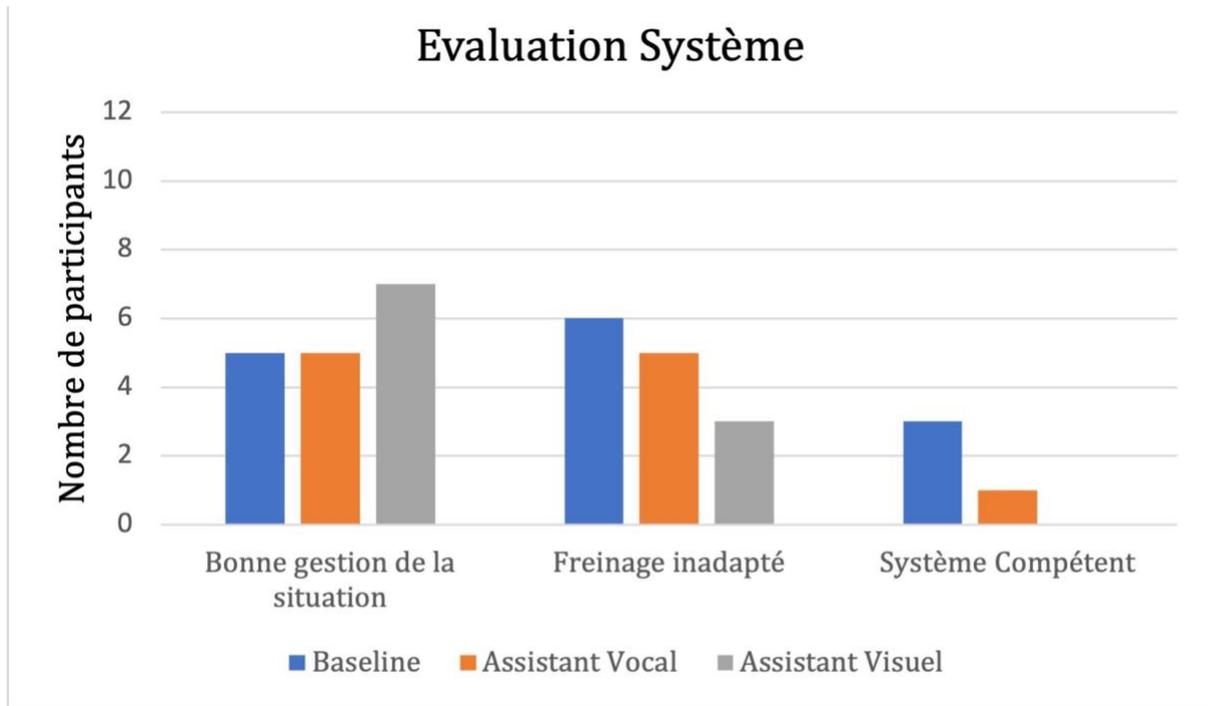


Figure 5.21 : Perception des actions du système au cours du scénario de brouillard

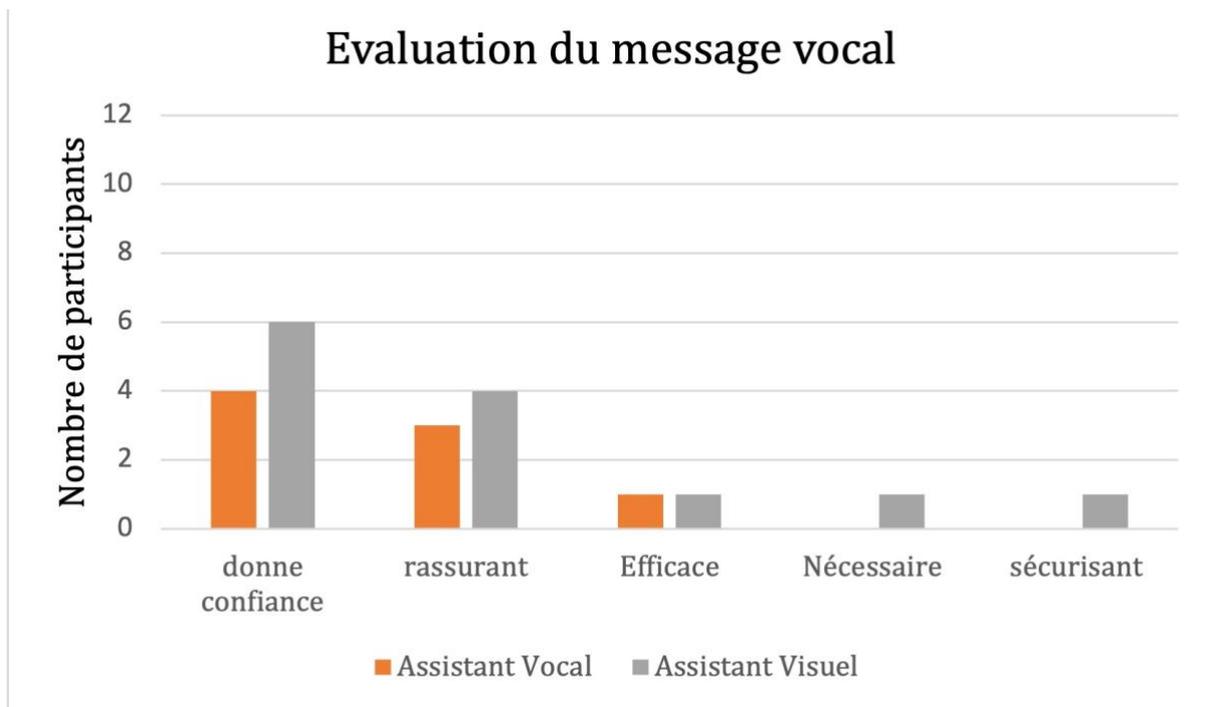


Figure 5.22 : Perception du message vocal de réassurance au cours du scénario de brouillard.

Discussion et conclusion

Un résumé des résultats mis en regard de nos hypothèses (page 115) peut être trouvé ci-dessous dans le tableau 5.8.

Anthropomorphisme

Nos résultats ne nous permettent pas de conclure sur le fait qu'une interface serait plus anthropomorphique d'une autre. En effet, elles ont toutes les trois reçues un score élevé d'anthropomorphisme (environ 7 sur l'échelle de mesure) sans que nous puissions mettre en évidence une différence significative.

Nos résultats suggèrent que chaque interface a réussi à être identifiée comme anthropomorphique. Le fait d'ajouter des attributs supplémentaires (voix, image) n'a pas eu d'effet positif. Plusieurs explications peuvent être avancées : d'une part, l'implémentation des attributs d'anthropomorphisme n'était peut-être pas d'une qualité suffisante pour observer un effet sur la perception des participants. En effet, des améliorations pourraient être portées aussi bien au niveau de la voix (variations de ton) que du visuel (animation). D'autre part, il se pourrait que l'anthropomorphisme mesuré dans cette expérience ne soit pas celui qui a été influencée par les trois types d'interfaces. En effet, la littérature identifie deux types d'anthropomorphisme (Kim & Sundar, 2012, Seyed Esfahani et al., 2020) : l'anthropomorphisme conscient (mindful) et inconscient (mindless). Le premier mesure la capacité à percevoir des qualités humaines dans une machine, notamment son "intelligence" et le second mesure la capacité d'un individu à considérer une machine comme une "entité vivante".

Confiance

Du point de vue des scores de confiance : à la fin de l'expérimentation, nous ne trouvons aucune différence significative entre les différentes interfaces, que ce soit pour la confiance globale ou multidimensionnelle. Aucune différence n'a été observée durant les scénarios de conduite expérimentaux (Activation, TOR 60, TOR 10 et Brouillard).

En revanche, on observe qu'au début de l'expérimentation le niveau de confiance globale des participants du groupe Baseline est significativement plus élevé que les participants des groupes Assistant Vocal et Assistant Visuel. Cette différence n'est pas observée pour la confiance initiale multidimensionnelle. Cependant, à la fin de la séance d'entraînement, le niveau de confiance globale et multidimensionnelle des participants du groupe Baseline est significativement plus

élevé que les participants des groupes Assistant Vocal et Assistant Visuel. Aucune différence n'est observée entre les interfaces Assistant Vocal et Assistant Visuel.

Les deux outils de mesure que nous avons utilisés pour évaluer la confiance ont donné des résultats cohérents. Il existe toutefois une différence au début de l'expérimentation. La mesure globale de la confiance suggère qu'au début de l'expérimentation et à la fin de la séance d'entraînement, le niveau de confiance des participants qui ont utilisé l'interface CMI était significativement plus élevé que celui de tous les autres participants. Cette différence disparaît ensuite puisqu'on observe aucune différence significative avec les mesures de la confiance globale réalisées après les différents scénarios de conduite et à la fin de l'expérimentation.

Une première explication serait que le niveau de confiance aurait augmenté dans les deux conditions Assistant Vocal et Assistant Visuel contrairement à la condition CMI. Pourtant une variation similaire a été observée dans les trois groupes ce qui ne soutient pas cette hypothèse.

La seconde explication provient de la méthode de recrutement. Les participants pour l'interface CMI ont été recrutés avec un niveau de confiance plus élevé (7) que pour les autres conditions (6). Il y aurait donc un temps d'adaptation et d'ajustement du niveau de confiance lors d'une première interaction avec un système. Comprendre ce phénomène d'adaptation devra faire l'objet de recherches complémentaires à ce travail. Enfin, les différences observées entre la confiance globale et la confiance multidimensionnelle au début de l'expérimentation suggèrent que l'usage d'une seule mesure peut engendrer des conclusions erronées.

Performance de conduite et expérience vécue

En ce qui concerne la performance de conduite, le temps de réaction a été significativement plus court dans la condition Assistant Visuel que dans les deux autres conditions pour une reprise en main programmée en 60s. En revanche, pour une reprise en main non programmée en 10s, les trois interfaces ne présentent pas de différence significative en termes de performances de conduite.

Les retours des participants concernant leur expérience dans les différents scénarios confirment l'observation faite au niveau des données quantitatives. Dans le scénario TOR 60 l'expérience est positive quel que soit le groupe et il n'y a pas de différence significative observée. Pour le scénario du TOR 10, l'expérience est négative notamment à cause de la pression temporelle qu'ont ressentie les participants dans les trois groupes et le sentiment d'avoir une IHM non adaptée à la situation. Pour le scénario du brouillard on n'observe pas de différence dans le comportement des

participants (2 personnes ont repris le contrôle dans les conditions CMI et Assistant Visuel et 1 personne a repris le contrôle dans la condition Assistant Vocal).

En revanche, les entretiens montrent plus de personnes qui expriment leur confiance dans le système dans les groupes Assistant vocal et Assistant visuel que dans le groupe CMI (7,6 et 4 respectivement). De plus, dans le groupe Baseline les personnes affirment être mises en confiance en observant le style de conduite du véhicule alors que dans les autres groupes ils parlent de confiance grâce au message de l'assistant.

Hypothèses	Validation
L'anthropomorphisme perçu est plus élevé lorsque l'interface intègre l'assistant représenté visuellement par rapport à l'interface intégrant l'assistant vocal ou l'interface Baseline	Cette hypothèse n'est pas validée. Toutes les interfaces sont perçues comme anthropomorphiques (scores élevés) mais il n'y a aucune différence entre les trois.
Au cours de l'expérimentation (scénarios d'Entraînement, Activation, TOR 60, TOR 10 et Brouillard) le niveau de confiance est plus élevé pour les participants ayant expérimenté l'assistant représenté visuellement que pour les participants ayant expérimenté l'assistant vocal ou la baseline	Cette hypothèse n'est pas validée dans la majorité des cas. Cependant, on observe une différence significative entre les scores de confiance à la fin de la séance d'entraînement.
Il existe une corrélation entre l'anthropomorphisme perçu et le niveau de confiance	Cette hypothèse est validée. La corrélation est moyenne mais significative.
Durant les scénarios TOR 60 et TOR 10, les performances de conduite (temps de réaction) sont meilleures lorsque l'alerte de reprise de contrôle est émise par l'assistant représenté visuellement comparativement à l'assistant vocal ou la baseline.	Cette hypothèse est validée uniquement pour le scénario TOR 60. Les participants dans la condition "Assistant Virtuel" ont enregistré un temps de réaction significativement plus court que tous les autres participants.

<p>Durant les scénarios TOR 60 et TOR 10 l'expérience des participants est meilleure lorsque l'alerte de reprise de contrôle est émise par l'assistant représenté visuellement comparativement à l'assistant vocal ou la baseline.</p>	<p>Cette hypothèse n'est pas validée. Dans toutes les conditions, l'expérience des participants est globalement positive dans le scénario TOR 60 et globalement négative dans le scénario TOR 10.</p>
<p>Durant le scénario du brouillard, les participants sont plus rassurés (reprennent moins le contrôle de la conduite et ont une meilleure expérience) par l'assistant représenté visuellement comparativement à l'assistant vocal ou la baseline (CMI)</p>	<p>Cette hypothèse n'est pas validée car la proportion des personnes qui reprennent le contrôle est pratiquement la même dans les trois conditions. Aussi, les retours des participants sur ce scénario sont globalement positifs.</p>

Tableau 5.8: Résumé des résultats d'expérimentation et validation des hypothèses

DISCUSSION GENERALE

Rappel des objectifs et discussion des résultats

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet plus large (cf. la description du projet CMI au chapitre 1) visant à définir l'interface multimodale d'un véhicule hautement automatisé pour accompagner le conducteur dans les séquences de transfert de contrôle. L'interface proposée dans le cadre de ce projet comporte une partie visuelle centrée sur un affichage ambiant au niveau du cockpit, une partie auditive avec des sons vocaux et non vocaux et une partie haptique avec des vibrations dans le siège conducteur.

À l'origine de ce travail de thèse, nous nous sommes posé la question de la confiance que l'utilisateur peut avoir dans le système automatisé. En effet, la confiance que l'utilisateur a dans la capacité de décision d'un véhicule automatisé est un facteur clé pour l'adoption de cette technologie, son utilisation efficace et l'expérience utilisateur qui en découle de façon générale. Plusieurs études (Waytz et al., 2014 ; de Visser et al., 2016; Forster et al., 2017; Kulms & Kopp, 2019; Christoforakos et al., 2021) suggèrent que l'anthropomorphisme est un facteur qui augmente la confiance des utilisateurs. Il s'agit donc de concevoir une interface anthropomorphe en partant de l'interface multimodale proposée dans le cadre du projet CMI. Notre vision de l'interface anthropomorphe consiste en une incarnation du système automatisé sous la forme d'une représentation visuelle et sonore permettant de donner au système une existence individuelle. Cette incarnation est déclinée dans cette thèse sous le concept d'un assistant virtuel.

Au travers de notre revue de littérature, nous avons montré que les concepts d'anthropomorphisme et de confiance sont complexes à définir et à mesurer. Dans le cas de l'anthropomorphisme, la plupart des travaux sont issus du champ de la robotique sociale (Kim & Sundar, 2012 ; Festerling & Siraj, 2021). Ces travaux suggèrent que l'utilisation de caractéristiques humaines tels qu'une représentation visuelle, un nom, une personnalité, une voix, un style de communication ou encore des comportements humains sont des éléments que l'on peut utiliser seuls ou combinés pour obtenir une interface anthropomorphe (Araujo, 2018; Fink, 2012; Diederich et al., 2020; Hegel et al., 2011; Seeger et al., 2021; Waytz et al., 2014).

La démarche employée pour concevoir l'assistant virtuel consiste donc à s'appuyer sur plusieurs éléments anthropomorphiques. Afin d'évaluer l'impact de chacun de ces éléments sur la perception de l'interface et la confiance des utilisateurs, nous avons imaginé deux versions de l'assistant virtuel à comparer avec l'interface CMI. Les deux versions de l'assistant virtuel ont été conçues avec une intention de gradation en termes d'éléments anthropomorphiques qui composent l'interface. Ainsi, en partant de l'interface "CMI", un élément anthropomorphique (messages vocaux) a été ajouté pour obtenir l'interface "Assistant vocal". De même, un élément anthropomorphique (représentation visuelle) a été ajouté à l'interface "Assistant vocal" pour obtenir l'interface "Assistant visuel".

Plus concrètement, pour obtenir l'interface "Assistant vocal", nous avons sélectionné une voix aux caractéristiques humaines (masculine, grave). La sélection d'une voix pour un assistant virtuel et le design conversationnel qui en découle soulève différentes questions qu'il serait utile d'aborder d'un point de vue empirique. On pourrait se demander par exemple, quelles caractéristiques sont essentielles pour que la voix soit perçue comme la plus anthropomorphique et digne de confiance ou encore l'intérêt d'utiliser une voix de synthèse comparativement à une voix humaine. Cependant, nous avons choisi dans le cadre de cette thèse de réaliser une simple comparaison de différentes voix de synthèse disponibles gratuitement sur le marché et de sélectionner celle qui, selon nous, correspondait le plus à la personnalité que nous souhaitons développer pour l'assistant virtuel. La voix qui a été choisie pour l'assistant virtuel (Voix Paul du logiciel Any Text To Voice) a servi à enregistrer des messages vocaux pour différents cas d'usage de conduite.

Pour obtenir l'interface "Assistant visuel", une représentation visuelle a été ajoutée à l'interface "Assistant vocal". Tout comme la voix, la représentation visuelle de l'assistant peut agir sur la perception que peut avoir un utilisateur de la technologie incarnée par cet assistant. En effet, l'apparence visuelle permet de former les premières impressions sur une technologie et participe à la décision d'utiliser ou pas cette technologie (Stal et al., 2020). On peut se demander notamment si cette technologie est capable de délivrer le service attendu et si elle est digne de confiance. Ce concept est d'autant plus important pour un assistant virtuel qui incarne le système d'un véhicule automatisé et prend ainsi un rôle de chauffeur. Il est donc essentiel de sélectionner l'apparence visuelle de cet assistant en s'assurant qu'elle donne une impression de compétence et inspire confiance aux utilisateurs. Contrairement à la sélection de la voix, la sélection de la représentation visuelle a fait l'objet d'une étude dans le cadre de cette thèse. Nous avons suivi une approche centrée sur l'utilisateur, empirique et itérative. Nous avons également fait progresser notre réflexion en trois étapes en augmentant le niveau de fidélité de notre évaluation.

Dans un premier temps nous nous sommes placés dans une perspective d'évaluation de la confiance face à des prototypes statiques dans une situation contrôlée mais à faible fidélité écologique. L'objectif de ce premier travail était de sélectionner des prototypes statiques plausibles pour le rôle d'agent virtuel de conduite, et d'évaluer la perception d'utilisateurs potentiels au regard de critères de confiance, d'anthropomorphisme et d'appréciation.

Étude sur des prototypes statiques et modélisation 3D

Nous nous sommes placés dans un espace de design qui nous a permis de sélectionner des prototypes statiques qui ont été catégorisés par une procédure de tri d'image. Ces prototypes ont ensuite été évalués en utilisant l'échelle d'anthropomorphisme, de confiance et d'appréciation de Waytz et al. (2014) au travers d'un questionnaire en ligne. Les résultats indiquent que les modèles Automate-humains, humains et abstraits sont ceux qui inspirent le plus la confiance et qu'ils sont préférés aux modèles Automate-Animal et Animal. Les modèles Humain et Abstrait ont été jugés comme les plus anthropomorphiques. Ces résultats confirment nos attentes selon lesquelles certaines représentations visuelles sont plus appropriées que d'autres pour le rôle spécifique de la conduite : en l'occurrence les représentations de type animal sont les moins appréciées et inspirent moins confiance dans ce contexte. En revanche, le fait que les représentations de type Automate-Humain soient perçus comme moins anthropomorphiques que les représentations de type Humain ou Abstrait est un résultat surprenant. En effet, selon la corrélation entre l'anthropomorphisme et la confiance, nous aurions pu nous attendre à ce que les représentations perçus comme les plus anthropomorphiques soient également celles qui inspirent le plus confiance. D'autre part, on remarque qu'une grande majorité de participants ont attribué des scores neutres et cela sur les trois échelles (anthropomorphisme, confiance, préférence). Ce résultat pourrait traduire une difficulté pour ces participants à se projeter dans l'usage suggéré et donc une limitation à l'utilisation d'un questionnaire en ligne pour ce type d'expérimentation. Néanmoins, cette méthodologie reste efficace pour un premier tri parmi différentes représentations visuelles. Il conviendrait de la compléter par une expérimentation dans un environnement plus écologique afin d'obtenir des mesures plus précises sur la confiance, l'anthropomorphisme et la préférence. Par ailleurs, plusieurs questions restent encore non résolues, notamment l'impact des spécificités de chaque utilisateur (genre, âge, niveau d'études, revenus, etc.) sur sa perception des différents types de représentation visuelle. Aussi, d'autres dimensions de la représentation visuelle comme le style graphique et les propriétés physiques restent à explorer dans de futures études. Néanmoins, le résultat de ce travail nous a permis de

sélectionner un type représentation visuelle (Automate-Humain) pour la mise en œuvre de notre assistant virtuel.

Pour la suite de nos travaux, il s'agissait de réaliser la représentation visuelle de type Automate-Humain. Cette implémentation s'est effectuée au cours de deux itérations de modélisation tridimensionnelle, une étape d'animation et le développement d'une application associant la représentation visuelle et les messages vocaux. Cet ensemble a été intégré à l'interface de référence CMI de manière à obtenir l'interface que nous appelons "Assistant Visuel".

Résultats de l'étude en simulation de conduite

La troisième étape de notre approche consiste en une étude dans un simulateur de conduite automatisée (niveau 3 défini par la SAE International, version 2021) sur des scénarios réalistes de conduite routière. Le but est de comparer l'interface CMI et les deux versions de l'assistant virtuel en mesurant la perception d'anthropomorphisme des participants, leur niveau de confiance tout au long de l'étude ainsi que leurs performances et expériences vécues selon les scénarios de conduite. Trente-six participants répartis en trois groupes de douze ont participé à cette expérimentation, chaque groupe étant exposé à l'une des trois interfaces.

Résultats concernant l'anthropomorphisme

En ce qui concerne la perception d'anthropomorphisme, l'expérimentation a révélé que l'interface Assistant vocal obtient un score élevé sur la mesure d'anthropomorphisme perçu, mais ce score n'est pas significativement différent de celui obtenu par l'interface CMI (interface baseline). De même, l'interface Assistant visuel obtient un score élevé sur la mesure d'anthropomorphisme perçu, mais ce score n'est pas significativement différent de celui obtenu par l'interface CMI ou encore l'interface Assistant vocal. Nous ne mettons donc pas en évidence de différence significative entre l'interface "CMI", l'interface "Assistant Vocal" et l'interface "Assistant Visuel" en ce qui concerne l'anthropomorphisme perçu. Ces résultats suggèrent d'une part que les éléments anthropomorphiques utilisés ont eu l'effet désiré (score d'anthropomorphisme perçu élevé pour les trois interfaces) et d'autre part que la combinaison d'éléments anthropomorphiques (messages, représentation visuelle) ne s'est pas traduit en une perception d'anthropomorphisme plus élevée. Ce dernier résultat peut cependant s'expliquer de deux façons.

En premier lieu, l'implémentation des éléments anthropomorphiques reste perfectible, ce qui a pu rendre la différence avec l'interface de référence moins évidente. Par exemple, la voix de

l'assistant pourrait être améliorée en y ajoutant des variations de ton, de débit et d'émotion en fonction du cas d'usage. De plus, les messages vocaux préenregistrés ont tendance à se répéter et ont donc pu manquer de réalisme aux yeux des participants. La représentation visuelle a également une marge d'amélioration du point de vue de sa modélisation et de son animation. En effet, les animations du corps de l'assistant peuvent être améliorées pour plus de fluidité et de réalisme et celles du visage ont manqué de visibilité du fait de la résolution minimale du système tablette-pyramide qui a été utilisé pour obtenir un effet holographique.

La seconde explication possible en ce qui concerne le manque de différence entre les trois interfaces en termes d'anthropomorphisme perçu réside dans le fait que le type d'anthropomorphisme mesuré n'est probablement pas influencé par les variations dans l'interface. En effet, la littérature identifie deux types d'anthropomorphisme (Kim & Sundar, 2012, Seyed Esfahani et al., 2020): l'anthropomorphisme conscient (mindful) et inconscient (mindless). Le premier mesure la capacité à percevoir des qualités humaines dans une machine, notamment son "intelligence" et la seconde mesure la capacité d'un individu à considérer une machine comme une "entité vivante". Dans le cadre de cette thèse, l'anthropomorphisme mesuré peut être qualifié de "mindful" puisque l'outil de mesure qui a été utilisé (Waytz et al., 2014) évalue comment le participant perçoit l'intelligence du système, sa capacité à effectuer des actions de manière autonome, sa capacité à être conscient de son environnement et sa capacité d'anticipation. Il est possible que les variations de l'interface par l'ajout d'une représentation visuelle ou des messages vocaux plus riches, n'aient pas d'influence sur la perception d'intelligence ou de compétences (autonomie, anticipation, conscience de l'environnement). Ceci expliquerait le manque de différence entre les trois interfaces.

En résumé, deux choses ont pu influencer les résultats que nous avons obtenu en ce qui concerne la perception d'anthropomorphisme : 1) tout d'abord l'implémentation perfectible des différents éléments anthropomorphiques, 2) le type d'anthropomorphisme mesuré n'est peut-être pas influencé par les variations de l'interface. Cette étude ne répond que partiellement aux questions précédemment formulées sur l'anthropomorphisme. Cependant, nous disposons maintenant d'un résultat empirique sur la perception anthropomorphique que peut induire une interface intégrant un assistant vocal ou une interface intégrant un assistant représenté visuellement. Pour aller plus loin, il conviendrait de réaliser également une mesure de l'anthropomorphisme inconscient (mindless). Étant donné que ce type d'anthropomorphisme dépend du modèle mental de chaque individu (Park et Namkung, 2021), cette mesure permettrait, par exemple, de déterminer si les

personnes sujettes à ce type d'anthropomorphisme perçoivent l'interface différemment et si cette perception affecte leur confiance ou encore leur usage de l'interface.

Résultats concernant la confiance

Le second axe de notre recherche abordée dans cette expérimentation concerne l'impact des différents ajouts d'éléments anthropomorphiques sur la confiance des participants. Autrement dit : est-ce que les participants ayant utilisé l'interface Assistant Visuel font plus confiance au système automatisé que ceux qui ont utilisé l'interface Assistant vocal ? De même est-ce que les participants ayant utilisé l'interface Assistant Vocal font plus confiance au système automatisé que les utilisateurs ayant utilisé l'interface de référence CMI ? Comme notre revue de littérature l'a montré (cf. Section Confiance Chapitre 2) la confiance est un concept complexe à définir et à mesurer. Nous nous sommes basés sur des outils de mesure utilisés dans de précédentes études dans le domaine de l'automatisation de la conduite. Ainsi, deux types de confiance ont été mesurés lors de cette expérimentation : 1) la confiance globale et 2) la confiance multidimensionnelle (cf la description de ces concepts page 123).

Les résultats obtenus en ce qui concerne la confiance globale ne permettent pas d'établir de différence significative entre les trois interfaces comparées (CMI, Assistant Vocal, Assistant Visuel), excepté dans certaines situations. En effet, nous observons, au début de l'expérimentation et à la fin de la séance d'entraînement, que le niveau de confiance globale des participants du groupe CMI est significativement plus élevé que les participants des groupes "Assistant Vocal" et Assistant Visuel" Cependant, aucune différence n'est observée pour la confiance globale entre les interfaces Assistant Vocal et Assistant Visuel du début à la fin de l'expérimentation.

Concernant la confiance multidimensionnelle, les résultats sont légèrement différents. Au début de l'expérimentation, contrairement à la confiance globale, aucune différence significative n'est observée entre les niveaux de confiance multidimensionnelle des participants des trois groupes. Toutefois, à la fin de la séance d'entraînement, les résultats montrent que le niveau de confiance multidimensionnelle des participants qui ont utilisé l'interface CMI est significativement plus élevé que celui des participants qui ont utilisé les interfaces Assistant Vocal et Assistant Visuel. Ce résultat est cohérent avec la mesure de la confiance globale. Les mesures qui ont été réalisées à la suite des différents scénarios de conduite (Activation, TOR 60, TOR 10, Réassurance) montrent également qu'il n'y a pas de différence significative entre les niveaux de confiance multidimensionnelle des participants dans les trois groupes.

Nous pouvons conclure que les résultats pour la confiance globale et la confiance multidimensionnelle sont cohérents, excepté pour la mesure réalisée au début de l'expérimentation. A ce stade, il est difficile d'expliquer la différence des résultats obtenus avec ces deux mesures au début de l'expérimentation. De même, il est impossible de conclure sur la mesure la plus précise. Il serait sans doute plus judicieux d'effectuer une interprétation de chaque mesure indépendamment de l'autre.

La mesure globale de la confiance suggère qu'au début de l'expérimentation et à la fin de la séance d'entraînement, le niveau de confiance des participants qui ont utilisé l'interface CMI était significativement plus élevé que celui de tous les autres participants. Cette différence disparaît ensuite puisqu'on observe aucune différence significative avec les mesures de la confiance globale réalisées après les différents scénarios de conduite et à la fin de l'expérimentation. On pourrait penser que la disparition de cet écart est due au fait que le niveau de confiance des participants du groupe CMI a cessé d'augmenter pendant que celui des participants des groupes Assistant Vocal et Assistant Visuel continuait d'augmenter. Cette hypothèse ne se vérifie pas puisque d'un scénario de conduite à l'autre, le niveau de confiance globale a varié (à la hausse comme à la baisse) dans tous les groupes de participants. Simplement, cette variation était similaire dans tous les groupes produisant cet effet de disparition d'écart et d'absence de différence entre les trois groupes. Cela pourrait signifier que le niveau de confiance globale des participants dépend du scénario de conduite qu'ils expérimentent et pas de l'interface utilisée. Ainsi, puisqu'ils ont expérimenté les mêmes scénarios de conduite, leur niveau de confiance était le même quelle que soit l'interface. Il reste cependant à expliquer pourquoi le niveau de confiance globale est différent à la fin de la séance d'entraînement puisque les scénarios d'entraînement étaient les mêmes quel que soit l'interface. Une première piste de réflexion serait la différence des niveaux de confiance au début de l'expérimentation. Les participants qui ont utilisé l'interface CMI ont été recrutés avec un niveau de confiance globale plus élevé (7) les participants qui ont utilisé les interfaces Assistant Vocal et Assistant Visuel (6). La séance d'entraînement a peut-être été l'occasion pour les participants d'ajuster leur niveau de confiance. Il y aurait donc un temps d'adaptation et d'ajustement du niveau de confiance lors d'une première interaction avec un système. Il conviendrait de réaliser une expérimentation supplémentaire pour d'une part confirmer l'existence de ce temps d'ajustement et d'autre part déterminer l'impact de l'interface utilisée sur le processus d'ajustement du niveau de confiance. Enfin, les différences observées entre la confiance globale et la confiance multidimensionnelle au début de l'expérimentation suggèrent

que l'usage d'une seule mesure peut engendrer des conclusions erronées. Il faudrait donc combiner les mesures pour des résultats plus précis.

Résultats concernant la performance de conduite et l'expérience vécue

La dernière hypothèse formulée dans cette thèse concerne l'impact des différentes interfaces sur la performance de conduite et l'expérience vécue des participants selon les différents scénarios de conduite. Les résultats montrent que dans une situation de reprise de contrôle non urgente, les participants dans les groupes Assistant Visuel réagissent plus vite à la demande de reprise de contrôle que les participants des autres groupes.

En revanche, dans une situation de reprise de contrôle urgente aucune différence n'est observée entre les trois groupes de participants. Ces observations peuvent traduire le fait que la présence d'une incarnation visuelle incite les participants à réagir plus rapidement. En revanche, dans une situation urgente, quel que soit l'interface les participants prennent en moyenne 8 secondes pour réagir. Ce résultat est confirmé par les études de Mok et al., 2017 et Mok et al., 2015 qui ont démontré que quel que soit la situation, en présence de tâche de vie à bord ou non, les participants mettent entre 5 et 8 secondes pour réagir à une demande de reprise de contrôle. L'expérience des participants dans ces deux scénarios est également similaire quel que soit l'interface.

La mise en œuvre d'un dernier scénario a permis d'évaluer la performance des interfaces pour rassurer les conducteurs dans une situation risquée (brouillard dense et camion approchant par l'arrière à une vitesse plus élevée). Les résultats obtenus ont montré que la majorité des participants étaient rassurés lors de cette manœuvre quel que soit l'interface expérimentée. Cependant, les participants dans la condition d'interface baseline étaient rassurés parce qu'ils observaient les manœuvres du véhicule ; alors que les participants dans les conditions Assistant Vocal et Assistant Visuel étaient rassurés parce que l'assistant virtuel a annoncé vocalement des manœuvres qu'il réalisait. Il est difficile de savoir si le manque de différence observée signifie qu'il n'y a pas besoin d'utiliser un message vocal rassurant dans ce genre de situation puisque les participants dans la condition Baseline n'ont pas exprimé le besoin d'avoir plus d'informations. Cependant, il est possible d'imaginer que le niveau de confiance ainsi que l'expérience des participants avec le système au moment où ils ont réalisé ce scénario (4e de la série durant l'expérimentation) ont contribué à les rassurer. Ils n'auraient donc pas eu besoin d'interface supplémentaire pour les rassurer.

CONCLUSION GENERALE

Le sujet de cette thèse était la conception d'un assistant virtuel anthropomorphique pour la confiance dans une voiture automatisée. Ce sujet nous a permis d'explorer différents domaines de recherche tels que la conception d'interfaces pour le transfert de contrôle et la réassurance dans un véhicule automatisé, la conception d'agents virtuels, le design anthropomorphique ainsi que les concepts d'anthropomorphisme perçu et de confiance dans un système automatisé. Plus concrètement, notre travail a consisté à concevoir, implémenter et intégrer un assistant virtuel anthropomorphique dans le simulateur d'un cockpit de voiture automatisée. L'apport de cet assistant a ensuite été testé au cours d'une expérimentation. De nos différents résultats d'expérimentations il est possible de retenir ce qui suit :

- Les représentations visuelles de type Humain, Automate-Humain et Abstrait sont préférées et sont perçues comme plus dignes de confiance que les représentations de type animales pour un rôle de personnification d'un système de conduite automatisé.
- Des difficultés dans l'implémentation d'une représentation visuelle de type Automate-Humain ont été révélées. En effet, ce type de représentation requiert une implémentation aboutie en termes de modélisation et d'animation pour atteindre le niveau de réalisme nécessaire pour un impact positif sur les utilisateurs. Aussi, l'expérience avec les assistants virtuels mainstream nous apprend la difficulté à maîtriser les réponses vocales d'un assistant. Cette difficulté est accrue dans un contexte de conduite où les cas d'usage changent en permanence et parfois en l'espace de quelques secondes. Cette spécificité engendre des situations où l'assistant vocal est parfois en train de délivrer un message vocal pour une situation qui a déjà changé. Pour pallier ce problème, un assistant virtuel équipé d'un système à messages vocaux pré-enregistrés est très vite limité. Il faudrait par exemple une intelligence artificielle capable d'adapter sa réponse vocale en temps réel au contexte et à l'environnement de conduite. De plus, le design conversationnel doit prendre en compte cette spécificité pour privilégier les interventions directes et courtes aux phrases trop élaborées.
- Les résultats de l'expérimentation en simulateur montrent que l'assistant virtuel dans sa version visuelle peut inciter le conducteur à réagir plus vite dans une situation de transfert de contrôle programmée (60s). En revanche, pour un transfert de contrôle non programmé engendré (10s) par une situation d'urgence, l'assistant virtuel comme il a été

conçu dans cette thèse n'apporte pas de valeur ajoutée. Toutefois, selon les retours des participants, une consigne sur l'action immédiate à effectuer dans la situation (par exemple freiner, accélérer, changer de voix) serait utile. Enfin, l'assistant virtuel dans sa version vocale ou visuelle peut aider à rassurer le conducteur dans une situation où le système prend des décisions de sa propre initiative (freinage dans une nappe de brouillard).

- Concernant la perception d'anthropomorphisme, nous avons observé que l'assistant virtuel, conçu dans cette thèse, est une interface efficace mais non nécessaire pour l'obtention d'un bon niveau d'anthropomorphisme conscient. En effet, les éléments utilisés dans l'interface CMI (une représentation visuelle iconique, des messages vocaux brefs) apparaissent suffisants pour obtenir un bon niveau d'anthropomorphisme perçu.
- Enfin, en ce qui concerne la confiance, les résultats montrent qu'il y a bien une différence significative entre les niveaux de confiance du début et à la fin de l'expérimentation pour les participants des trois groupes. En revanche, en comparant les groupes entre eux, nous constatons une différence significative entre le groupe CMI et les groupes Assistant Virtuel au début de l'expérimentation et à la fin de la séance d'entraînement, mais pas au cours de l'expérimentation et à la fin. Ce résultat signifie qu'un facteur autre que la variation de l'interface influe sur la variation du niveau de confiance des participants. Ce facteur pourrait être l'expérience acquise durant l'interaction avec le système automatisé.

Des études complémentaires seraient nécessaires pour répondre aux différentes questions qui n'ont pas pu être abordées dans le cadre de cette thèse. Tout d'abord, en ce qui concerne la représentation visuelle d'un assistant virtuel, l'impact des dimensions de propriétés physiques et de style graphique reste encore à explorer. De plus, l'influence des spécificités individuelles des utilisateurs sur la perception de différents types de représentation visuelle reste encore à établir. En ce qui concerne l'anthropomorphisme et la confiance, des approfondissements restent à envisager notamment pour clarifier ces concepts mais surtout pour consolider les outils de mesure (qui peuvent diverger d'une étude à l'autre). Enfin, nous nous sommes concentrés sur l'augmentation de la confiance au travers d'une interface anthropomorphique. Nous pensons que, dans le futur, il faudra réfléchir en termes de mesure / adaptation du niveau de confiance, c'est-à-dire viser le bon niveau de confiance plutôt que le niveau maximum de confiance. Ceci permettrait d'éviter le phénomène de sur-confiance.

BIBLIOGRAPHIE

- Admoni, H., & Scassellati, B. (2012). A Multi-Category Theory of Intention. *CogSci*.
- Ajzen, I., & Fishbein, M. (2000). Attitudes and the Attitude-Behavior Relation : Reasoned and Automatic Processes. *European Review of Social Psychology - EUR REV SOC PSYCHOL*, 11, 1-33. <https://doi.org/10.1080/14792779943000116>
- Ajitha, P. V., & Nagra, A. (2021). An Overview of Artificial Intelligence in Automobile Industry – A Case Study on Tesla Cars. *Solid State Technology*, 64(2), 11.
- Antifakos, S., Kern, N., Schiele, B., & Schwaninger, A. (2005). Towards improving trust in context-aware systems by displaying system confidence. In *Proceedings of Mobile HCI 2005* (pp. 9–14). New York, NY: ACM. <https://doi.org/10.1145/1085777.1085780>
- Antrobus, V., Burnett, G., & Large, D. R. (s. d.). *'Trust me – I'm AutoCAB': Using natural language interfaces to improve the trust and acceptance of level 4/5 autonomous vehicles*. 6.
- Araujo, T. (2018). Living up to the chatbot hype : The influence of anthropomorphic design cues and communicative agency framing on conversational agent and company perceptions. *Computers in Human Behavior*, 85, 183-189. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.03.051>
- Aremyr, E., Jönsson, M., & Strömberg, H. (2019). Anthropomorphism : An Investigation of Its Effect on Trust in Human-Machine Interfaces for Highly Automated Vehicles. In S. Bagnara, R. Tartaglia, S. Albolino, T. Alexander, & Y. Fujita (Éds.), *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018)* (p. 343-352). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96074-6_37
- Ashby Plant, E., Baylor, A. L., Doerr, C. E., & Rosenberg-Kima, R. B. (2009). Changing middle-school students' attitudes and performance regarding engineering with computer-based social models. *Computers & Education*, 53(2), 209–215. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2009.01.013>
- Atiyeh, C., 2012. Predicting Traffic Patterns, One Honda at a Time. In: MSN Auto, (June).
Automated Driving Systems 2.0: A Vision for Safety. Publication DOT HS 812 442.
USDOT, United States Department of Transportation.
- Bainbridge, W.A., Hart, J., Kim, E.S. and Scassellati, B. (2008) *, "The effect of presence on human robot interaction", RO-MAN 2008 - the 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, IEEE, pp. 701-706.
- Bartneck, C., Croft, E. and Zoghbi, S. (2009) Measuring the anthropomorphism, animacy, likeability, perceived intelligence and perceived safety of robots. *International Journal of Social Robotics*, 1(1), 71-81.

- Basu, C., & Singhal, M. (2016). Trust Dynamics in Human Autonomous Vehicle Interaction: A Review of Trust Models. In AAAI Spring Symposium Series (pp85–91). Retrieved from <https://www.aaai.org/ocs/index.php/SSS/SSS16/paper/view/12746>
- Baylor, A. L., & Kim, Y. (2004). Pedagogical Agent Design: The Impact of Agent Realism, Gender, Ethnicity, and Instructional Role. *Intelligent Tutoring Systems*. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30139-4_56
- Bazilinskyy, Pavlo & Petermeijer, Sebastiaan & Petrovych, Veronika & Dodou, Dimitra & de Winter, Joost. (2015). Take-over requests in highly automated driving: A crowdsourcing multimedia survey on auditory, vibrotactile, and visual displays. *Transportation Research Part F Traffic Psychology and Behaviour*. 56. 82-98. 10.1016/j.trf.2018.04.001.
- Beggiato, M., Hartwich, F., Schleinitz, K., Krems, J., Othersen, I., & Petermann-Stock, I. (2015, novembre 26). *What would drivers like to know during automated driving? Information needs at different levels of automation*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2462.6007>
- Bengler, K., Dietmayer, K., Farber, B., Maurer, M., Stiller, C., & Winner, H. (2014). Three Decades of Driver Assistance Systems : Review and Future Perspectives. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 6(4), 6-22. <https://doi.org/10.1109/MITS.2014.2336271>
- Berger, C. R., & Bradac, J. J. (1982). *Language and social knowledge : Uncertainty in interpersonal relations*. E. Arnold.
- Bickmore, T. and Cassell, J. (2001) *, "Relational agents: a model and implementation of building user trust", Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '01, ACM Press, New York, pp. 396-403.
- Billard, A. (2005). *Challenges in designing the body and the mind of an interactive robot*. /paper/Challenges-in-designing-the-body-and-the-mind-of-an-Billard/3419853f4274584efa5f620e8a7e8cf1fdac75f4
- Bindewald, J. M., Rusnock, C. F., & Miller, M. E. (2018). Measuring Human Trust Behavior in Human-Machine Teams. In D. N. Cassenti (Éd.), *Advances in Human Factors in Simulation and Modeling* (p. 47-58). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60591-3_5
- Biondi, F., Lohani, M., Hopman, R., Mills, S., Cooper, J., & Strayer, D. (2018). 80 MPH and out-of-the-loop: Effects of real-world semi-automated driving on driver workload and arousal. Proceedings of the Conference of the Human Factors and Ergonomics Society, Los Angeles, CA.
- Biondi, F., Alvarez, I., & Jeong, K.-A. (2019). Human–Vehicle Cooperation in Automated Driving : A Multidisciplinary Review and Appraisal. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 35, 1-15. <https://doi.org/10.1080/10447318.2018.1561792>

- Blow, M., Dautenhahn, K., Appleby, A., Nehaniv, C., & Lee, D. (2006). *The art of designing robot faces : Dimensions for human-robot interaction*. 331-332. <https://doi.org/10.1145/1121241.1121301>
- Borghetti, B. J., Giametta, J. J., & Rusnock, C. F. (2017). Assessing continuous operator workload with a hybrid scaffolded neuroergonomic modeling approach. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 59, 134–146. <https://doi.org/10.1177/0018720816672308>
- Breazeal, C. (2002). *Designing sociable robots*. <https://doi.org/10.7551/mitpress/2376.001.0001>
- Broadbent, E., Kumar, V., Li, X., Sollers, J., Stafford, R.Q., MacDonald, B.A. and Wegner, D.M. (2013) *, “Robots with display screens: a robot with a more humanlike face display is perceived to have more mind and a better personality”, *PloS One*, Vol. 8 No. 8, e72589.
- Burgoon, J. K., Twitchell, D. P., Jensen, M. L., Meservy, T. O., Adkins, M., Kruse, J., et al. (2009). Detecting Concealment of Intent in Transportation Screening: A Proof of Concept. [Electronic version]. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 10(1), 103-112.
- Cahour, Beatrice & Forzy, Jean-François. (2009). Does projection into use improve trust and exploration? An example with a cruise control system. *Safety Science*. 47. 1260-1270. [10.1016/j.ssci.2009.03.015](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.03.015).
- Castelfranchi, C., & Falcone, R. (2000, janvier 1). *Trust is Much More Than Subjective Probability : Mental Components and Sources of Trust*. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2000.926815>
- Cassell, J. and Bickmore, T. (2003) *, “Negotiated collusion: modeling social language and its relationship effects in intelligent agents”, *User Modelling and User-Adapted Interaction*, Vol. 13 Nos 1-2, pp. 89-132.
- Chaiken, S. (1987) The heuristic model of persuasion IN: Zanna, M.P., Olson, J.M. and Herman, C.P. (eds.) *Social influence: The Ontario Symposium* (pp 3-39). Hillsdale, NJ: Erlbaum,
- Chouk, I., et Perrien, J. (2004). «Les facteurs expliquant la confiance du consommateur lors d’un achat sur un site marchand : Une étude exploratoire». *Décision marketing*.
- Christoforakos, L., Gallucci, A., Surmava-Große, T., Ullrich, D., & Diefenbach, S. (2021). Can Robots Earn Our Trust the Same Way Humans Do? A Systematic Exploration of Competence, Warmth, and Anthropomorphism as Determinants of Trust Development in HRI. *Frontiers in Robotics and AI*, 8. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/frobt.2021.640444>
- Corritore, C., Kracher, B., & Wiedenbeck, S. (2003). On-line trust : Concepts, evolving themes, a model. *International Journal of Human-Computer Studies*, 58, 737-758. [https://doi.org/10.1016/S1071-5819\(03\)00041-7](https://doi.org/10.1016/S1071-5819(03)00041-7)
- Cowell, A.J. and Stanney, K.M. (2005) *, “Manipulation of non-verbal interaction style and demographic embodiment to increase anthropomorphic computer character credibility”, *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 62 No. 2, pp. 281-306.

- Currall, S. C., & Judge, T. A. (1995). Measuring trust between organizational boundary role persons. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 64(2), 151-170. <https://doi.org/10.1006/obhd.1995.1097>
- Dautenhahn, K., Woods, S., Kaouri, C., Walters, M. L., Kheng Lee Koay, & Werry, I. (2005). What is a robot companion—Friend, assistant or butler? *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1192-1197. <https://doi.org/10.1109/IROS.2005.1545189>
- Devlin, C. E. (2013). Neural Correlates of Human Trust in Automation. Poster session presented at University of Dayton. Retrieved from https://ecommons.udayton.edu/stander_posters/245/
- Desai, M., Kaniarasu, P., Medvedev, M., Steinfeld, A., & Yanco, H. (2013). Impact of robot failures and feedback on real-time trust. *Proceedings of the 8th ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*, 251-258.
- de Visser, E. J., Monfort, S. S., McKendrick, R., Smith, M. A. B., McKnight, P. E., Krueger, F., & Parasuraman, R. (2016). Almost human : Anthropomorphism increases trust resilience in cognitive agents. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 22(3), 331-349. <https://doi.org/10.1037/xap0000092>
- Dey, D., Ackermans, S., Martens, M., Pfleging, B., & Terken, J. (2022). Interactions of Automated Vehicles with Road Users. In A. Riener, M. Jeon, & I. Alvarez (Éds.), *User Experience Design in the Era of Automated Driving* (p. 533-581). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77726-5_20
- Diederich, S., Brendel, A. B., & Kolbe, L. M. (2020). Designing Anthropomorphic Enterprise Conversational Agents. *Business & Information Systems Engineering*, 62(3), 193-209. <https://doi.org/10.1007/s12599-020-00639-y>
- Disalvo, C., Gemperle, F., Forlizzi, J., & Kiesler, S. (2002). *All robots are not created equal : The design and perception of humanoid robot heads*. 321-326, 321-326. <https://doi.org/10.1145/778712.778756>
- Drnec, K., Marathe, A. R., Lukos, J. R., & Metcalfe, J. S. (2016). From trust in automation to decision neuroscience: Applying cognitive neuroscience methods to understand and improve interaction decisions involved in human automation interaction. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00290>
- Duffy, B. (2003). Anthropomorphism and the social robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 42, 177-190. [https://doi.org/10.1016/S0921-8890\(02\)00374-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8890(02)00374-3)
- Dzindolet, M. T., Peterson, S. A., Pomranky, R. A., Pierce, L. G., & Beck, H. P. (2003). The role of trust in automation reliance. *International Journal of Human-Computer Studies*, 58(6), 697-718. [https://doi.org/10.1016/S1071-5819\(03\)00038-7](https://doi.org/10.1016/S1071-5819(03)00038-7)

- Ekman, F., Johansson, M., & Sochor, J. (2018). Creating Appropriate Trust in Automated Vehicle Systems : A Framework for HMI Design. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 48(1), 95-101. <https://doi.org/10.1109/THMS.2017.2776209>
- Epley, N., Waytz, A., & Cacioppo, J. (2007). On Seeing Human: A Three-Factor Theory of Anthropomorphism. *Psychological review*, 114, 864-886. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.114.4.864>
- Fagnant, D.J., Kockelman, K.M., 2018. Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas. *Transportation* 45 (1), 143–158.
- Festerling, J., & Siraj, I. (2021). Anthropomorphizing Technology: A Conceptual Review of Anthropomorphism Research and How it Relates to Children’s Engagements with Digital Voice Assistants. *Integrative Psychological and Behavioral Science*. <https://doi.org/10.1007/s12124-021-09668-y>
- Fink, J. (2012). Anthropomorphism and Human Likeness in the Design of Robots and Human-Robot Interaction. In S. S. Ge, O. Khatib, J.-J. Cabibihan, R. Simmons, & M.-A. Williams (Éds.), *Social Robotics* (p. 199-208). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34103-8_20
- Forrest, A., M. Konca. *Autonomous Car & Society* In. Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA, 2007. vol. IQP OVP 06B1.
- Forster, Y., Naujoks, F., & Neukum, A. (2017). Increasing anthropomorphism and trust in automated driving functions by adding speech output. *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 365-372. <https://doi.org/10.1109/IVS.2017.7995746>
- Fraedrich, E., Cyganski, R., Wolf, I., & Lenz, B. (2016). *User Perspectives on Autonomous Driving A Use-Case-Driven Study in Germany*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2539.4969>
- Franklin, S., & Graesser, A. (1996). Is it an Agent, or Just a Program? A Taxonomy for Autonomous Agents. *Proceedings of the Workshop on Intelligent Agents III, Agent Theories, Architectures, and Languages*, 21–35.
- French, B., Duenser, A., & Heathcote, A. (2018). *Trust in Automation A Literature Review*. /paper/Trust-in-Automation-A-Literature-Review-French-Duenser/92f07d3d1356307decb6e97382ad884d0f62668d
- Gambetta, D. (2000). Trust : Making and Breaking Cooperative Relations. *The British Journal of Sociology*, 13. <https://doi.org/10.2307/591021>
- Gaudiello, I., Zibetti, E., Lefort, S., Chetouani, M., & Ivaldi, S. (2016). Trust as an indicator of robot functional and social acceptance. An experimental study on user confirmation to iCub answers. *Computers in Human Behavior*, 61, 633–655. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.03.057>

- Gold, C., Körber, M., Hohenberger, C., Lechner, D., & Bengler, K. (2015). Trust in automation – Before and after the experience of take-over scenarios in a highly automated vehicle. *Procedia Manufacturing*, 3, 3025–3032. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.847>
- Goodyear, K., Parasuraman, R., Chernyak, S., de Visser, E., Madhavan, P., Deshpande, G., & Krueger, F. (2017). An fMRI and effective connectivity study investigating miss errors during advice utilization from human and machine agents. *Social Neuroscience*, 12, 570–581. <https://doi.org/10.1080/17470919.2016.1205131>
- Gratch, J., Wang, N., Okhmatovskaia, A., Lamothe, F., Morales, M., van der Werf, R.J. and Morency, L.-P. (2007) *, “Can virtual humans Be more engaging than real ones?”, 12th International Conference on Human-Computer Interaction, pp. 286-297.
- Gremillion, G. M., Metcalfe, J. S., Marathe, A. R., Paul, V. J., Christensen, J., Drnec, K., Atwater, C. (2016). Analysis of trust in autonomy for convoy operations. In *Proceedings of SPIE Defense and Security 2016 (98361Z)*, Maryland, US. <https://doi.org/10.1117/12.2224009>
- Groom, V., Nass, C., Chen, T., Nielsen, A., Scarborough, J.K. and Robles, E. (2009) *, “Evaluating the effects of behavioral realism in embodied agents”, *International Journal of Human Computer Studies*, Elsevier, Vol. 67 No. 10, pp. 842-849.
- Gulz, A., Haake, M., & Tärning, B. (2007). *VISUAL GENDER AND ITS MOTIVATIONAL AND COGNITIVE EFFECTS – A USER STUDY*. 22.
- Haake, M., & Gulz, A. (2009). A Look at the Roles of Look & Roles in Embodied Pedagogical Agents—A User Preference Perspective. *I. J. Artificial Intelligence in Education*, 19, 39-71.
- Hancock, P. A., Billings, D. R., Schaefer, K. E., Chen, J. Y. C., Visser, E. J. de, & Parasuraman, R. (2011). A Meta-Analysis of Factors Affecting Trust in Human-Robot Interaction: *Human Factors*. <https://doi.org/10.1177/0018720811417254>
- Häuslschmid, R., von Bülow, M., Pflöging, B., & Butz, A. (2017). Supporting Trust in Autonomous Driving. *Proceedings of the 22nd International Conference on Intelligent User Interfaces*, 319-329. <https://doi.org/10.1145/3025171.3025198>
- Hayes, B., 2011. Leave the driving to it. *Am. Sci.* 99 (5), 362.
- Heironimus, A., Guznov, S., & Pfahler, M. (2017). Use of fNIRS to assess airmen’s trust in automation. Poster presented at Air Force Research Laboratory, Dayton, Ohio, US. Retrieved from https://www.asma.org/asma/media/AsMA/pdf-meetings/2017%20Annual%20Meeting/posters-2017/201705_362_Heironimus.pdf
- Helldin, T., Falkman, G., Riveiro, M., & Davidsson, S. (2013). Presenting system uncertainty in automotive UIs for supporting trust calibration in autonomous driving. *Proceedings of the 5th International*

Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '13, 210-217. <https://doi.org/10.1145/2516540.2516554>

Hergeth, S., Lorenz, L., Vilimek, R., & Krems, J. F. (2016). Keep your scanners peeled: Gaze behavior as a measure of automation trust during highly automated driving. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 58, 509–519. <https://doi.org/10.1177/0018720815625744>

Hester, M., Lee, K., & Dyre, B. P. (2017). “Driver Take Over”: A preliminary exploration of driver trust and performance in autonomous vehicles. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 61, 1969–1973. <https://doi.org/10.1177/1541931213601971>

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>

Holtgraves, T.M., Ross, S.J., Weywadt, C.R. and Han, T.L. (2007) *, “Perceiving artificial social agents”, *Computers in Human Behavior*, Vol. 23 No. 5, pp. 2163-2174.

Holthausen, Brittany & Wintersberger, Philipp & Walker, Bruce & Riener, Andreas. (2020). Situational Trust Scale for Automated Driving (STS-AD): Development and Initial Validation. 10.1145/3409120.3410637.

Ingham, J. (1999). *What is an Agent?*

Jiun-Yin Jian, Ann M. Bisantz, and Colin G. Drury. 2000. Foundations for an Empirically Determined Scale of Trust in Automated Systems. *International Journal of Cognitive Ergonomics* 4, 1 (March 2000), 53–71. DOI: http://dx.doi.org/10.1207/S15327566IJCE0401_04

Kalegina, A., Schroeder, G., Allchin, A., Berlin, K., & Cakmak, M. (2018). Characterizing the Design Space of Rendered Robot Faces. *Proceedings of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction - HRI '18*, 96-104. <https://doi.org/10.1145/3171221.3171286>

Kaptein, M., Markopoulos, P., de Ruyter, B. and Aarts, E. (2011) *, “Two acts of social intelligence: the effects of mimicry and social praise on the evaluation of an artificial agent”, *AI and Society*, Vol. 26 No. 3, pp. 261-273.

Khastgir, S., Birrell, S., Dhadyalla, G., & Jennings, P. (2018, July). Effect of Knowledge of Automation Capability on Trust and Workload in an Automated Vehicle: A Driving Simulator Study. In *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics* (pp. 410-420). Springer, Cham.

Kim, C., Lee, S.G. and Kang, M. (2012) *, “I became an attractive person in the virtual world: users’ identification with virtual communities and avatars”, *Computers in Human Behavior*, Vol. 28 No. 5, pp. 1663-1669

- Kim, Y., & Sundar, S. S. (2012). Anthropomorphism of computers: Is it mindful or mindless? *Computers in Human Behavior*, 28, 241-250. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2011.09.006>
- Knack, S. (2001). Trust, Associational Life and Economic Performance. In John F. Helliwell (ed), *The Contribution of Human and Social Capital to Sustained Economic Growth and Well-Being. Quebec: Human Resources Development.*
- Koo, J., Kwac, J., Ju, W., Steinert, M., Leifer, L., & Nass, C. (2015). Why did my car just do that? Explaining semi-autonomous driving actions to improve driver understanding, trust, and performance. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 9(4), 269-275. <https://doi.org/10.1007/s12008-014-0227-2>
- Kopp, S., Gesellensetter, L., Krämer, N. C., & Wachsmuth, I. (2005). A Conversational Agent as Museum Guide – Design and Evaluation of a Real-World Application. In T. Panayiotopoulos, J. Gratch, R. Aylett, D. Ballin, P. Olivier, & T. Rist (Éds.), *Intelligent Virtual Agents* (p. 329-343). Springer. https://doi.org/10.1007/11550617_28
- Körber, M., & Bengler, K. (2014). Potential Individual Differences Regarding Automation Effects in Automated Driving. Proceedings of the XV International Conference on Human Computer Interaction - Interacción '14, September, 1-7. <https://doi.org/10.1145/2662253.2662275>
- Krämer, N. C., Simons, N., & Kopp, S. (2007). The Effects of an Embodied Conversational Agent's Nonverbal Behavior on User's Evaluation and Behavioral Mimicry. In C. Pelachaud, J.-C. Martin, E. André, G. Chollet, K. Karpouzis, & D. Pelé (Éds.), *Intelligent Virtual Agents* (p. 238-251). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74997-4_22
- Kraus, J. M., Nothdurft, F., Hock, P., Scholz, D., Minker, W., & Baumann, M. (2016). Human After All : Effects of Mere Presence and Social Interaction of a Humanoid Robot as a Co-Driver in Automated Driving. *Adjunct Proceedings of the 8th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 129-134. <https://doi.org/10.1145/3004323.3004338>
- Kulms, P., & Kopp, S. (2019). More Human-Likeness, More Trust? The Effect of Anthropomorphism on Self-Reported and Behavioral Trust in Continued and Interdependent Human-Agent Cooperation. *Proceedings of Mensch und Computer 2019*, 31-42. <https://doi.org/10.1145/3340764.3340793>
- Kuzminykh, A., Sun, J., Govindaraju, N., Avery, J., & Lank, E. (2020). *Genie in the Bottle : Anthropomorphized Perceptions of Conversational Agents*. 1-13. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376665>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.04.014>
- Large, D. R., Harrington, K., Burnett, G., Luton, J., Thomas, P., & Bennett, P. (2019). To Please in a Pod : Employing an Anthropomorphic Agent-Interlocutor to Enhance Trust and User Experience in an

- Autonomous, Self-Driving Vehicle. *Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 49-59.
<https://doi.org/10.1145/3342197.3344545>
- Lazanyi, K., & Maraczi, G. (2017). Dispositional trust—Do we trust autonomous cars? *2017 IEEE 15th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*.
<https://doi.org/10.1109/SISY.2017.8080540>
- LE BLANC, Benoît. Cognition et cognitique. *Hermès, La Revue*, 2018, no 1, p. 37-38.
- Lee, J. D., & Moray, N. (1994). Trust, self-confidence, and operators' adaptation to automation. *International Journal of Human-Computer Studies*, 40(1), 153-184.
<https://doi.org/10.1006/ijhc.1994.1007>
- Lee, J. D., & See, K. A. (2004). Trust in Automation: Designing for Appropriate Reliance. *Human Factors*, 31.
- Lee, J., & Moray, N. (1992). Trust, control strategies and allocation of function in human-machine systems. *Ergonomics*, 35(10), 1243-1270. <https://doi.org/10.1080/00140139208967392>
- Lee, K., Jung, Y., Kim, J., & Kim, S. (2006a). Are physically embodied social agents better than disembodied social agents? : The effects of physical embodiment, tactile interaction, and people's loneliness in human-robot interaction. *International Journal of Human-Computer Studies*, 64, 962-973.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2006.05.002>
- Lee, K.M., Peng, W., Jin, S.A. and Yan, C. (2006b) *, "Can robots' manifest personality? an empirical test of personality recognition, social responses, and social presence in human-robot interaction", *Journal of Communication*, Vol. 56 No. 4, pp. 754-772.
- Lee, M.K., Kiesler, S., Forlizzi, J., Srinivasa, S. and Rybski, P. (2010) *, "Gracefully mitigating breakdowns in robotic services", 2010 5th ACM/IEEE International Conference on HumanRobot Interaction (HRI), IEEE, pp. 203-210.
- Lee, S. C., Sanghavi, H., Ko, S., & Jeon, M. (2019). Autonomous driving with an agent : Speech style and embodiment. *Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications: Adjunct Proceedings*, 209-214.
<https://doi.org/10.1145/3349263.3351515>
- Lemoine, J.-F., & Cherif, E. (2012). Comment générer de la confiance envers un agent virtuel à l'aide de ses caractéristiques ? Une étude exploratoire. *Management & Avenir*, 58, 169.
<https://doi.org/10.3917/mav.058.0169>
- Lewis, J. D., & Weigert, A. (1985). Trust as a Social Reality. *Social Forces*, 63(4), 967-985. JSTOR.
<https://doi.org/10.2307/2578601>

- Li, D., Rau, P. L. P., & Li, Y. (2010). A Cross-cultural Study : Effect of Robot Appearance and Task. *International Journal of Social Robotics*, 2(2), 175-186. <https://doi.org/10.1007/s12369-010-0056-9>
- Limerick, H., Coyle, D., & Moore, J. W. (2014). The experience of agency in human-computer interactions : A review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2014.00643>
- Litman, T., 2018. Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning. Victoria Transport Policy Institute 28.
- Liu, P., Yang, R., & Xu, Z. (2019). Public Acceptance of Fully Automated Driving : Effects of Social Trust and Risk/Benefit Perceptions. *Risk Analysis*. <https://doi.org/10.1111/risa.13143>
- Lobinger, K., & Brantner, C. (2020). Picture-sorting techniques. Card sorting and Q-sort as alternative and complementary approaches in visual social research. In L. Pauwels & D. Mannay (Eds.), *The Sage Handbook of Visual Research Methods*. 2nd Revised and Expanded Edition (pp. 309-321). London: Sage.
- Lorenz, E. (1999). Trust, Contract and Economic Cooperation. *Cambridge Journal of Economics*, 23(3), 301-315.
- Luger, E., & Sellen, A. (2016). « Like Having a Really Bad PA » : The Gulf between User Expectation and Experience of Conversational Agents. *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 5286–5297. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858288>
- Lugano, G. (2017). Virtual assistants and self-driving cars. *2017 15th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, 1–5.
- Luhmann, N. (2000). Familiarity, Confidence, Trust : Problems and Alternatives. *Gambetta, Diego (ed.) Trust: Making and Breaking Cooperative Relations, electronic edition, Department of Sociology, University of Oxford, chapter 6*, 94-107.
- Luo, J.T., McGoldrick, P., Beatty, S. and Keeling, K.A. (2006) *, “On-screen characters: their design and influence on consumer trust”, *Journal of Services Marketing*, Vol. 20 No. 2, pp. 112-124.
- Madhok, A. (1995). Revisiting Multinational firms' Tolerance for Joint Ventures : A Trust-Based approach. *Journal of International Business Studies*, 26(1), 117-137. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jibs.8490168>
- Majji, K. C., & Baskaran, K. (2021). Artificial Intelligence Analytics—Virtual Assistant in UAE Automotive Industry. In V. Suma, J. I.-Z. Chen, Z. Baig, & H. Wang (Eds.), *Inventive Systems and Control* (pp. 309–322). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1395-1_24

- Matthews, G., Lin, J., Panganiban, A. R., & Long, M. D. (2019). Individual Differences in Trust in Autonomous Robots: Implications for Transparency. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, PP(November), 1–11. <https://doi.org/10.1109/THMS.2019.2947592>
- Mayer, R. C., Davis, J. H., & Schoorman, F. D. (1995). An Integrative Model of Organizational Trust. *The Academy of Management Review*, 20(3), 709-734. JSTOR. <https://doi.org/10.2307/258792>
- McBreen, H.M. and Jack, M.A. (2001) *, “Evaluating humanoid synthetic agents in e-retail applications”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, Vol. 31 No. 5, pp. 394-405.
- McDonnell, R., Breidt, M., & Bülthoff, H. H. (2012). Render me real? Investigating the effect of render style on the perception of animated virtual humans. *ACM Transactions on Graphics*, 31(4), 91:1-91:11. <https://doi.org/10.1145/2185520.2185587>
- Mcknight, D., Choudhury, V., & Kacmar, C. (« Chuck »). (2002). The Impact of Initial Consumer Trust on Intentions to Transact with a Web Site: A Trust Building Model. *The Journal of Strategic Information Systems*, 11, 297-323. [https://doi.org/10.1016/S0963-8687\(02\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0963-8687(02)00020-3)
- Miller, D., Johns, M., Mok, B., Gowda, N., Sirkin, D., Lee, K., & Ju, W. (2016). Behavioral measurement of trust in automation. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 60(1), 1849–1853. doi:10.1177/1541931213601422
- Mirnig, N., Stollnberger, G., Giuliani, M. and Tscheligi, M. (2017) *, “Elements of humor”, *Proceedings of the Companion of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction - HRI '17*, ACM Press, New York, New York, USA, pp. 211-212.
- Mohd Tuah, N., Wills, G., & Ranchhod, A. (2016). *The characteristics and application of anthropomorphic interface: A design spectrum.* 398-402. http://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=achi_2016_19_20_20061
- Mok Brian, Mishel Johns, Key Jung Lee, Hillary Ive, David Miller, and Wendy Ju. 2015. Timing of unstructured transitions of control in automated driving. In *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 1167–1172.
- Mok Brian, Mishel Johns, Key Jung Lee, David Miller, David Sirkin, Hillary Ive, and Wendy Ju. 2015. Emergency, Automation Off: Unstructured Transition Timing for Distracted Drivers of Automated Vehicles. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2015 IEEE 18th International Conference on*, 2458–2464
- Mok B., Johns M., Miller D., et Ju W., « Tunneled In: Drivers with Active Secondary Tasks Need More Time to Transition from Automation », mai 2017, p. 2840-2844. doi: 10.1145/3025453.3025713.
- Mori, M., MacDorman, K., & Kageki, N. (2012). The Uncanny Valley [From the Field]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19, 98-100. <https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2192811>

- Morris, D. M., Erno, J. M., & Pilcher, J. J. (2017). Electrodermal response and automation trust during simulated self-driving car use. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 61, 1759–1762. <https://doi.org/10.1177/1541931213601921>
- Mosquet, X., Dauner, T., Lang, N., Rubmann, N., Mei-Pochtler, A., Agrawal, R., Schmiege, F., 2015. *Revolution in the Driver's Seat: The Road to Autonomous Vehicles*. Boston Consulting Group 11.
- Muir, B. M., & Moray, N. (1996). Trust in automation. Part II. Experimental studies of trust and human intervention in a process control simulation. *Ergonomics*, 39(3), 429-460. <https://doi.org/10.1080/00140139608964474>
- Muir, Bonnie M. (1987). Trust between humans and machines, and the design of decision aids. *International Journal of Man-Machine Studies*, 27(5-6), 527-539. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(87\)80013-5](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(87)80013-5)
- Muir, Bonnie M. (1994). Trust in automation : I. Theoretical issues in the study of trust and human intervention in automated systems. *Ergonomics*, 37(11), 1905-1922. <https://doi.org/10.1080/00140139408964957>
- Nass, C. and Moon, Y. (2000) Machines and mindlessness: Social responses to computers. *Journal of Social Issues*, 56 (1), 81-103.
- Niculescu, A.I. and Banchs, R.E. (2019) *, “Humor intelligence for virtual agents”, 2016 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), IEEE, pp. 285-297.
- Niu, D., Terken, J., & Eggen, B. (2017). Anthropomorphizing information to enhance trust in autonomous vehicles. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 28. <https://doi.org/10.1002/hfm.20745>
- Nomura, T., Suzuki, T., Kanda, T., Han, J., Shin, N., Burke, J., & Kato, K. (2008). What People Assume about Humanoid and Animal-Type Robots: Cross-Cultural Analysis between Japan, Korea, and the United States. *I. J. Humanoid Robotics*, 5, 25–46. <https://doi.org/10.1142/S0219843608001297>
- Nomura, Tatsuya. (2016). Robots and Gender. *Gender and the Genome*. 1. 10.1089/gg.2016.29002.nom.
- Nowak, K.L. and Rauh, C. (2005) *, “The influence of the avatar on online perceptions of anthropomorphism, androgyny, credibility, homophily, and attraction”, *Journal of ComputerMediated Communication*, Vol. 11 No. 1, pp. 153-178.
- Numan, J. H. (1998). *Knowledge-based systems as companions : Trust, human computer interaction and complex systems* [[S.n.]].
- Okamoto, S., & Sano, S. (2017). Anthropomorphic AI Agent Mediated Multimodal Interactions in Vehicles. *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications Adjunct*, 110–114. <https://doi.org/10.1145/3131726.3131736>

- Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and Automation : Use, Misuse, Disuse, Abuse: *Human Factors*.
<https://doi.org/10.1518/001872097778543886>
- Parasuraman, R., de Visser, E. J., Lin, M. K., & Greenwood, P. M. (2012). Dopamine beta hydroxylase genotype identifies individuals less susceptible to bias in computer-assisted decision making. *PLoS ONE*, 7(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0039675>
- Park D. et Namkung K., « Exploring Users' Mental Models for Anthropomorphized Voice Assistants through Psychological Approaches », *Appl. Sci.*, vol. 11, n° 23, Art. n° 23, janv. 2021, doi: 10.3390/app112311147.
- Parmar, D., Ólafsson, S., Utami, D., & Bickmore, T. (2018). *Looking the Part: The Effect of Attire and Setting on Perceptions of a Virtual Health Counselor*. 301–306.
<https://doi.org/10.1145/3267851.3267915>
- Paiva, A., Dias, J., Sobral, D., Aylett, R., Woods, S., Hall, L. and Zoll, C. (2005) *, “Learning by feeling: evoking empathy with synthetic characters”, *Applied Artificial Intelligence*, Vol. 19 Nos 3-4, pp. 235-266.
- Pejsa, T., Andrist, S., Gleicher, M. and Mutlu, B. (2015) *, “Gaze and attention management for embodied conversational agents”, *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*, Vol. 5 No. 1, pp. 1-34
- Penmetsa, P., Adanu, E. K., Wood, D., Wang, T., & Jones, S. L. (2019). Perceptions and expectations of autonomous vehicles – A snapshot of vulnerable road user opinion. *Technological Forecasting and Social Change*, 143, 9-13.
- Petermeijer, Sebastiaan & Cieler, Stephan & de Winter, Joost. (2017). Comparing spatially static and dynamic vibrotactile take-over requests in the driver seat. *Accident Analysis & Prevention*. 99. 218-227. 10.1016/j.aap.2016.12.001.
- Powers, A., Kramer, A.D.I., Lim, S., Kuo, J., Lee, S.L. and Kiesler, S. (2005) *, “Eliciting information from people with a gendered humanoid robot”, *ROMAN 2005. IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2005.*, IEEE, pp. 158-163.
- Powers, A. and Kiesler, S. (2006) The advisor robot: tracing people's mental model from a robot's physical attributes. Paper presented at Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-robot interaction, Salt Lake City, Utah, USA
- Qiu, L. and Benbasat, I. (2010) *, “A study of demographic embodiments of product recommendation agents in electronic commerce”, *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 68 No. 10, pp. 669-688.
- Rajaonah, B. (2006). *Rôle de la confiance de l'opérateur dans son interaction avec une machine autonome sur la coopération humain-machine* [Thesis, Paris 8]. <http://www.theses.fr/2006PA082588>

- Reeves, B., & Nass, C. (1996). The Media Equation: How People Treat Computers, Television, and New Media Like Real People and Pla. *Bibliovault OAI Repository, the University of Chicago Press*.
- Reimer, B., 2014. Driver assistance systems and the transition to automated vehicles: a path to increase older adult safety and mobility? *Public Policy & Aging Report* 24 (1), 27–31.
- Ring, L., Utami, D., & Bickmore, T. (2014). The Right Agent for the Job? In T. Bickmore, S. Marsella, & C. Sidner (Eds.), *Intelligent Virtual Agents* (pp. 374–384). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09767-1_49
- Robinson, S. L. (1996). Trust and Breach of the Psychological Contract. *Administrative Science Quarterly*, 41(4), 574-599. JSTOR. <https://doi.org/10.2307/2393868>
- Rosenthal-von der Pütten, A. M., Krämer, N., Gratch, J., & Kang, S.-H. (2009, janvier 1). *It doesn't matter what you are ! Comparing interacting with an autonomous virtual person with interacting with a virtually represented human*.
- Rovira, E., Pak, R., & McLaughlin, A. (2017). Effects of individual differences in working memory on performance and trust with various degrees of automation. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 18(6), 573–591. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2016.1252806>
- Ruijten, P., Terken, J., & Chandramouli, S. (2018). Enhancing Trust in Autonomous Vehicles through Intelligent User Interfaces That Mimic Human Behavior. *Multimodal Technologies and Interaction*, 2(4), 62. <https://doi.org/10.3390/mti2040062>
- Salem, M., Eyssel, F., Rohlfing, K., Kopp, S. and Joublin, F. (2011) *, “Effects of gesture on the perception of psychological anthropomorphism: a case study with a humanoid robot”, *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Vol. 7072, LNAI, pp. 31-41.
- Salem, M., Eyssel, F., Rohlfing, K., Kopp, S. and Joublin, F. (2013) *, “To err is human(-like): effects of robot gesture on perceived anthropomorphism and likability”, *International Journal of Social Robotics*, Vol. 5 No. 3, pp. 313-323.
- Schaefer, K. E., Billings, D. R., Szalma, J. L., Adams, J. K., Sanders, T. L., Chen, J. Y., & Hancock, P. A. (2014). *A Meta-Analysis of Factors Influencing the Development of Trust in Automation : Implications for Human-Robot Interaction* (ARL-TR-6984). Army research lab aberdeen proving ground md human research and engineering directorate. <https://apps.dtic.mil/docs/citations/ADA607926>
- Schmitz, M. (2011). *Concepts for life-like interactive objects*. 157-164. <https://doi.org/10.1145/1935701.1935732>
- Schoettle, B., & Sivak, M. (2014). *A survey of public opinion about connected vehicles in the U.S., the U.K., and Australia*. 687-692. <https://doi.org/10.1109/ICCVE.2014.7297637>

- Seeger, A.-M., Pfeiffer, J., & Heinzl, A. (2021). Texting with Humanlike Conversational Agents : Designing for Anthropomorphism. *Journal of the Association for Information Systems*, 22(4). <https://doi.org/10.17705/1jais.00685>
- Seyed Esfahani, M., Reynolds, N., & Ashleigh, M. (2020). Mindful and Mindless Anthropomorphism: How to Facilitate Consumer Comprehension Towards New Products. *International Journal of Innovation and Technology Management*, 17. <https://doi.org/10.1142/S0219877020500169>
- Shadan Sadeghian Borojeni, Lewis Chuang, Wilko Heuten, and Susanne Boll. 2016. Assisting Drivers with Ambient Take-Over Requests in Highly Automated Driving. In *Proceedings of the 8th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (Automotive'UI 16)*. ACM, New York, NY, USA, 237-244. DOI: <https://doi.org/10.1145/3003715.3005409>
- Shapiro, S. P. (1987). The Social Control of Impersonal Trust. *American Journal of Sociology*, 93(3), 623-658. JSTOR
- Shladover, S., Su, D., Lu, X.Y., 2012. Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2324, 63–70.
- Siegel, M., Breazeal, C. and Norton, M.I. (2009) *, “Persuasive Robotics: the influence of robot gender on human behavior”, 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, pp. 2563-2568.
- Silberg, G., R. Wallace, G. Matuszak, J. Plessers, C. Brower and D. Subramanian. Self-driving cars: the next revolution. White Paper, KPMG LLP & Center of Automotive Research, 2012. 36.
- Sjöbergh, J. and Araki, K. (2009) *, “Robots make things funnier”, Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 306-313.
- Skeete, J., 2018. Level 5 autonomy: the new face of disruption in road transport. *Technological Forecasting & Social Change* 134, 22–34 (September).
- Smith, J. K., Liss, M., Erchull, M. J., Kelly, C. M., Adragna, K., & Baines, K. (2018). The Relationship Between Sexualized Appearance and Perceptions of Women’s Competence and Electability. *Sex Roles*, 79(11), 671–682. <https://doi.org/10.1007/s11199-018-0898-4>
- Stal, S. ter, Tabak, M., Akker, H. Op den, Beinema, T., & Hermens, H. (2020). Who Do You Prefer? The Effect of Age, Gender and Role on Users’ First Impressions of Embodied Conversational Agents in eHealth. *International Journal of Human– Computer Interaction*, 36(9), 881–892. <https://doi.org/10.1080/10447318.2019.1699744>
- Stanton, C. and Stevens, C.J. (2014) *, “Robot pressure: the impact of robot eye gaze and lifelike bodily movements upon decision-making and trust”, International Conference on Social Robotics, Springer, Cham, pp. 330-339.

- Stanton, N. A., & Young, M. S. (2005). Driver behaviour with adaptive cruise control. *Ergonomics*, 48(10), 1294–1313. doi:10.1080/00140130500252990
- Stefan Brandenburg, Sandra Epple. (2018) Designing the Transition from Highly Automated Driving to Manual Driving: A Study of Drivers' Preferences. Proceedings of the 6th Humanist Conference, The Hague, Netherlands, 13-14 June 2018
- Strait, M., Canning, C. and Scheutz, M. (2014) *, "Let me tell you! investigating the effects of robot communication strategies in advice-giving situations based on robot appearance, interaction modality and distance", Proceedings of the 2014 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction - HRI '14, ACM Press, New York, New York, USA, pp. 479-486.
- Strohmann, T., Siemon, D., & Robra-Bissantz, S. (2019). Designing Virtual In-vehicle Assistants: Design Guidelines for Creating a Convincing User Experience. *AIS Transactions on Human-Computer Interaction*, 11(2), 54–78. <https://doi.org/10.17705/1thci.00113>
- Sundar, S. S. (2008). The MAIN model: A heuristic approach to understanding technology effects on credibility. In M. J. Metzger & A. J. Flanagin (Eds.), *Digital media, youth, and credibility*. Cambridge, MA: The MIT Press, The John D. and Catherine T. MacArthur Foundation Series on Digital Media and Learning.
- Tay, B.T.C., Low, S.C., Ko, K.H. and Park, T. (2016) *, "Types of Humor that Robots Can Play", *Computers in Human Behavior*, Elsevier, Vol. 60, pp. 19-28.
- Tientrakool, P., Y.C. Ho, and N.F. Maxemchuk. Highway capacity benefits from using vehicle-to-vehicle communication and sensors for collision avoidance. 2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), San Francisco, CA, 2011, pp. 1–5. doi: <https://doi.org/10.1109/VETEFCF.2011.6093130>.
- Tzeng, J.Y. (2004), "Toward a more civilized design: studying the effects of computers that apologize", *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 61 No. 3, pp. 319-345.
- Valette-Florence, R., & De Barnier, V. (2009). Les lecteurs sont-ils capables d'anthropomorphiser leur magazine?: Une réponse par la méthode de triangulation. *Management & Avenir*, 27. <https://doi.org/10.3917/mav.027.0054>
- Van den Brule, R., Dotsch, R., Bijlstra, G., Wigboldus, D.H.J. and Haselager, P. (2014) *, "Do robot performance and behavioral style affect human trust?: a multi-method approach", *International Journal of Social Robotics*, Vol. 6 No. 4, pp. 519-531.
- Van Huysduynen, H. H., Terken, J., & Eggen, B. (2018). Why Disable the Autopilot? *Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '18*, 247-257. <https://doi.org/10.1145/3239060.3239063>

- Van Pinxteren, M. M. E., Pluymaekers, M., & Lemmink, J. G. A. M. (2020). Human-like communication in conversational agents : A literature review and research agenda. *Journal of Service Management*, 31(2), 203-225. <https://doi.org/10.1108/JOSM-06-2019-0175>
- Vartanian, O., Stewart, K., Mandel, D. R., Pavlovic, N., McLellan, L., & Taylor, P. J. (2012). Personality assessment and behavioral prediction at first impression. *Personality and Individual Differences*, 52(3), 250-254. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2011.05.024>
- Verberne, F., Ham, J., & Midden, C. (2015). Trusting a Virtual Driver That Looks, Acts, and Thinks Like You. *Human Factors The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 57, 1-15. <https://doi.org/10.1177/0018720815580749>
- Vermersch, P. (1994). L'entretien d'explicitation en formation initiale et continue. Paris : ESF.
- Vollrath, M., Schleicher, S., & Gelau, C. (2011). The influence of cruise control and adaptive cruise control on driving behaviour – A driving simulator study. *Accident Analysis and Prevention*, 43(3), 1134-1139. doi:10.1016/j.aap.2010.12.023
- Wandtner, B., Schömig, N., et Schmidt, G. « Effects of Non-Driving Related Task Modalities on Takeover Performance in Highly Automated Driving », *Hum. Factors*, vol. 60, n° 6, p. 870-881, sept. 2018, doi: 10.1177/0018720818768199.
- Waytz, A., Cacioppo, J., & Epley, N. (2010). Who Sees Human? : The Stability and Importance of Individual Differences in Anthropomorphism. *Perspectives on Psychological Science - PERSPECT PSYCHOL SCI*, 5, 219-232. <https://doi.org/10.1177/1745691610369336>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2014.01.005>
- Weng, F., Angkititrakul, P., Shriberg, E. E., Heck, L., Peters, S., & Hansen, J. H. L. (2016). Conversational In-Vehicle Dialog Systems: The past, present, and future. *IEEE Signal Processing Magazine*, 33(6), 49-60. <https://doi.org/10.1109/MSP.2016.2599201>
- Wickens, C. D. (2008). Multiple resources and mental workload. *Human factors*, 50(3), 449-455.
- Wilks, Y. (2010). Is a companion a distinctive kind of relationship with a machine? *Proceedings of the 2010 Workshop on Companionable Dialogue Systems*, 13-18.
- Willis, J., & Todorov, A. (2006). First Impressions: Making Up Your Mind After a 100-Ms Exposure to a Face. *Psychological Science*, 17(7), 592-598. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01750.x>
- Wintersberger, P., Riener, A., & Frison, A.-K. (2016). Automated Driving System, Male, or Female Driver : Who'd You Prefer? Comparative Analysis of Passengers' Mental Conditions, Emotional States & Qualitative Feedback. *Proceedings of the 8th International Conference on Automotive User*

Interfaces and Interactive Vehicular Applications, 51-58.

<https://doi.org/10.1145/3003715.3005410>

Yee, N., Bailenson, J., & Rickertsen, K. (2007). *A meta-analysis of the impact of the inclusion and realism of human-like faces on user experiences in interfaces*. 1-10.

<https://doi.org/10.1145/1240624.1240626>

Yoo, Y., Yang, M., Lee, S., Baek, H., & Kim, J. (2022). The effect of the dominance of an in-vehicle agent's voice on driver situation awareness, emotion regulation, and trust : A simulated lab study of manual and automated driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 86, 33-47. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2022.01.009>

Zebrowitz, L. A., & Montepare, J. M. (2008). First impressions from facial appearance cues. In *First impressions* (pp. 171-204). Guilford Publications.

Zeeb, K., Buchner, A., et Schrauf, M. « What determines the take-over time? An integrated model approach of driver take-over after automated driving. », *Accid. Anal. Prev.*, 2015, doi: 10.1016/j.aap.2015.02.023.

Zihlsler, J., Hock, P., Walch, M., Dzuba, K., Schwager, D., Szauer, P., & Rukzio, E. (2016). Carvatar : Increasing Trust in Highly-Automated Driving Through Social Cues. *Adjunct Proceedings of the 8th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 9-14. <https://doi.org/10.1145/3004323.3004354>

Złotowski, J., Strasser, E., & Bartneck, C. (2014). *Dimensions of anthropomorphism : From humanness to humanlikeness*. 66-73. <https://doi.org/10.1145/2559636.2559679>

Zuboff, S. (1988). *In the age of the smart machine : The future of work and power*. Heinemann Professional.

WEBOGRAPHIE

AAA study on autonomous vehicles,

<https://newsroom.aaa.com/2016/03/three-quarters-of-americans-afraid-to-ride-in-a-self-driving-vehicle/>

<https://newsroom.aaa.com/2017/03/americans-feel-unsafe-sharing-road-fully-self-driving-cars/>

Nielsen N. (2004) <https://www.nngroup.com/articles/card-sorting-how-many-users-to-test/>

Plumer, B. 15 ways that self-driving cars could transform our lives. Vox

www.vox.com/2014/5/28/5756736/the-case-for-self-driving-cars

RoboLaw. (s. d.). <http://www.robolaw.eu/projectdetails.htm#Project%20Details>

ANNEXES

Annexe I : Questionnaire utilisé dans l'enquête en ligne décrit au Chapitre 3

VOTRE EXPÉRIENCE DE CONDUITE

- 1) Avez-vous le permis de conduire ?
- 2) Sélectionnez l'année d'obtention de votre permis.
- 3) Au cours de la dernière année, à quelle fréquence avez-vous conduit ?
- 4) Possédez-vous une voiture à usage personnel ?
- 5) Utilisez-vous l'un ou plusieurs des systèmes d'aide à la conduite suivants ?

*Stationnement automatique

*Limiteur de vitesse

*Régulateur de vitesse adaptatif

*Aide au maintien dans la file de circulation

*Ma voiture n'est équipée d'aucun système d'aide à la conduite

*Je ne sais pas

*Autre (s) aide (s) à la conduite

* Aucun

- 6) A quelle fréquence utilisez-vous ce (s) système (s) d'aide à la conduite ?
- 7) Utilisez-vous des systèmes de navigation (GPS) ?
- 8) Lesquels ?

*WAZE

*Google Maps

*Plan (IOS)

*Here WeGo

*Coyote

* Autre GPS

- 9) A quelle fréquence utilisez-vous ces systèmes GPS ?

VOTRE EXPÉRIENCE AVEC LES ASSISTANTS VIRTUELS

- 10) Utilisez-vous un (ou plusieurs) assistant virtuel (s) ?
- 11) Pourquoi ?

*Je ne possède pas cette technologie sur mes outils numériques.

*Je n'aime pas cette technologie.

- *Je trouve cette technologie inutile.
- *Je trouve cette technologie inefficace.
- *Je n'aime pas parler à une machine
- *Autre

12) Le(s)quels des assistant(s) virtuels suivants utilisez-vous ?

- *SIRI (Sur votre téléphone ou tablette)
- *Google Assistant (Sur votre téléphone ou tablette)
- *Alexa (Sur votre téléphone, tablette ou enceinte connectée autre que Amazon echo)
- *Amazon Echo
- *Google Home
- *Apple Homepod
- *Assistant vocal voiture
- *Autre(s)

13) A quelle fréquence interagissez-vous avec ce (s) assistants ?

14) Quels sont les points forts ou avantages de ces assistants virtuels ?

15) Quels sont les points faibles ou limites de ces assistants virtuels ?

L'ASSISTANT EN CONDUITE MANUELLE

16) C'est la fin de votre journée de travail. Vous rentrez chez vous en voiture. Pour aller jusqu'à votre voiture vous avez le choix entre marcher jusqu'au parking ou demander à votre assistant de conduite de sortir la voiture du parking et de vous attendre à l'entrée des locaux de votre entreprise. **Que préférez-vous ?**

- *Je demande à mon assistant de sortir la voiture du parking.
- *Je préfère marcher.
- *Je ne sais pas.
- *Autre

17) Une fois installé au volant de votre voiture, l'assistant planifie votre trajet et vous propose un détour vers une boutique de cadeaux pour l'anniversaire de votre partenaire que vous aviez oublié. **Que pensez-vous de cette proposition ?**

- *J'en suis satisfait.
- *Je n'en suis pas satisfait.
- *ça m'est égal.
- *Autre

- 18) Durant le trajet, l'assistant détecte que votre niveau de stress est plus élevé que d'habitude. Il décide donc de jouer une playlist spécialement conçue pour vous détendre. **Que pensez-vous de cette initiative ?**

*J'en suis satisfait.

*Je n'en suis pas satisfait.

*ça m'est égal.

L'ASSISTANT EN CONDUITE AUTONOME

- 19) Vous arrivez sur une partie de votre trajet où le mode autonome est disponible. L'assistant vous propose de prendre le relais de la conduite. Vous acceptez et activez le mode autonome. **Que faites-vous juste après l'activation du mode ?**

*Je me détends sur mon siège.

*J'en profite pour passer des appels et/ou envoyer des messages.

*J'en profite pour lire.

*Je surveille la route.

*Autre

Après quelques minutes en conduite autonome, vous entendez une ambulance venir derrière vous. Votre voiture ainsi que toutes les voitures autour décelèrent et se décalent pour laisser le passage à l'ambulance. Dans la suite du questionnaire, nous vous demandons d'évaluer cinq (5) différentes **catégories d'assistants en fonction du niveau de confiance** que vous leur faites pour gérer cette situation.

Afin de vous donner une idée claire du modèle de représentation visuelle de chaque catégorie, nous vous présentons pour chacune d'entre elles **4 exemples d'assistants illustrant la catégorie.**

Nous vous demandons de répondre à quelques questions à **propos de chaque catégorie** qui vous sera présentée. Les questions seront les mêmes pour chaque catégorie.

(Les 17 prochaines questions sont répétées pour chaque catégorie de représentations visuelles)

- 20) A quel point cette voiture vous semble intelligente ?
- 21) Selon vous, à quel point cette voiture peut-elle sentir ce qui se passe autour d'elle ?
- 22) Selon vous, à quel point cette voiture pourrait-elle anticiper ce qui est sur le point de se produire, avant même que cela ne se produise ?
- 23) Selon vous, à quel point cette voiture peut-elle planifier le meilleur trajet disponible ?
- 24) Selon vous, à quel point appréciez-vous votre expérience assis derrière le volant de cette voiture ?
- 25) Selon vous, à quel point vous sentiriez-vous à l'aise dans cette voiture ?
- 26) A quel point aimeriez-vous posséder une telle voiture ?

- 27) Selon vous, à quel point vous sentiriez-vous plus en sécurité si vous possédiez une voiture comme celle-ci ? (en comparaison à votre sentiment de sécurité dans votre expérience de conduite aujourd'hui)
- 28) Selon vous, à quel point le ou la conducteur-trice moyen-ne se sentirait plus en sécurité si il-elle possédait une voiture comme celle-ci ? (en comparaison à leur sentiment de sécurité dans leur expérience de conduite aujourd'hui)
- 29) A quel point feriez-vous confiance à cette voiture pour conduire dans un trafic dense, bouché, en heure de pointe ?
- 30) A quel point feriez-vous confiance à cette voiture pour conduire dans un trafic léger sur autoroute ?
- 31) Selon vous, à quel point vous sentiriez-vous en sécurité dans cette voiture si vous en conduisiez une ?
- 32) A quel point êtes-vous sûr que vous pouvez effectuer le prochain trajet de manière sécurisée ? (Ici nous faisons référence à la manœuvre de décalage et à la suite du trajet)
- 33) A quel point êtes-vous sûr que cette voiture peut effectuer le prochain trajet de manière sécurisée ? (Ici nous faisons référence à la manœuvre de décalage et à la suite du trajet)
- 34) A quel point faites-vous confiance au fait que cette voiture sera capable d'effectuer le prochain trajet de manière sécurisée ? (Ici nous faisons référence à la manœuvre de décalage et à la suite du trajet)
- 35) A quel point vous sentez-vous à l'aise à l'idée de laisser le contrôle à cette voiture ?
- 36) Pouvez-vous dire en quelques mots ce qui dans l'apparence des assistants de cette catégorie influence votre niveau de confiance ?

RÉCAPITULATIF

- 37) Indiquez-le (s) numéro(s) de(s) l'assistant(s) qui inspire(nt) le plus confiance pour gérer la situation précédemment énoncée.
- 38) Le verriez-vous en charge de la conduite de votre véhicule ? (pendant que vous êtes à l'intérieur seul ou avec votre famille/amis)
- 39) Indiquez-le (s) numéro(s) de(s) l'assistant(s) qui inspire(nt) le moins confiance pour gérer la situation précédemment énoncée.
- 40) Quelles sont, selon vous, les caractéristiques que doit avoir un assistant de ce type ? (un assistant qui a la responsabilité de conduire votre véhicule lorsque vous êtes à l'intérieur, seul ou avec votre famille/amis)

*Gentil

*Sympathique

*Intelligent

*Vif

*Alerte

*Soigné (apparence physique)

*Attentif

*Responsable

*Malin

*Rusé

*Compétent

*Autre

- 41) Selon vous, et indépendamment des représentations que vous avez pu voir dans ce questionnaire, à quoi devrait ressembler un assistant de ce type ? (un assistant qui a la responsabilité de conduire votre véhicule lorsque vous êtes à l'intérieur, seul ou avec votre famille/amis)

DONNÉES PERSONNELLES

- 42) Veuillez sélectionner votre pays de résidence actuel.
43) Veuillez indiquer votre genre.
44) Veuillez indiquer votre âge.
45) Quel est le diplôme ou le niveau d'études le plus élevé que vous ayez obtenu ?
46) Quelle est votre catégorie socio-professionnelle ?

Merci beaucoup d'avoir participé à cette étude !

Grâce à vous nous pourrions obtenir un maximum de réponses. N'hésitez pas à partager !

Annexe II - Questionnaire de Confiance Initiale

Items 6 à 24 issus de B. Rajaonah,2006

- 1 - Pensez-vous connaître la voiture automatisée ?
- 2 - Quelle confiance accorderiez-vous à la voiture automatisée ?
- 3 - Pensez-vous que la voiture automatisée est utile ?
- 4 - Pensez-vous que la voiture automatisée est nécessaire ?
- 5 - Pensez-vous que la voiture automatisée gênerait votre conduite habituelle ?

Tendance naturelle à la confiance

- 6 - Dans la vie de tous les jours, vous avez tendance à prendre des risques
- 7 - Vous avez tendance à faire confiance aux gens
- 8 - Vous estimez qu'avoir confiance en quelqu'un c'est pouvoir lui confier quelque chose à faire
- 9 - Vous estimez qu'il est nécessaire de bien connaître une personne pour lui faire confiance
- 10 -Vous pensez que la décision de faire confiance à quelqu'un dépend de la façon dont vous interagissez avec lui
- 11 -Vous êtes généralement méfiant envers les nouvelles technologies (téléphone mobile, ordinateur, internet, four à micro-ondes...)
- 12 -Vous pensez que les nouvelles technologies sont intéressantes
- 13 -Vous pensez que les nouvelles technologies sont dangereuses

Quels sont les risques que vous associeriez à l'utilisation d'une voiture automatisée ?

- 14 -Le risque de conduire plus dangereusement
- 15 -Le risque de ne pas savoir utiliser le système
- 16 -Le risque d'accident avec le véhicule de devant
- 17 -Le risque d'accident avec le véhicule de derrière
- 18 -Le risque d'être dépendant du système
- 19 -Le risque de perdre le plaisir de la conduite

Quels sont les bénéfices que vous retireriez de l'utilisation d'une voiture automatisée ?

- 20 -Une conduite moins stressante
- 21 -L'allègement de la tâche de conduite (la voiture automatisée me permettrait de réaliser une activité secondaire comme lire ou utiliser mon téléphone)

22 -La facilitation de la tâche de conduite

23 -Une amélioration du confort de conduite

24 -Une conduite plus sécurisée

Annexe III - Questionnaire de Confiance Situationnelle

Items 1 à 6 issus de Holthausen et al.,2020 – Item 7 rajouté pour les besoins de cette étude

1- J'ai confiance dans la voiture automatisée dans cette situation

2 - Mes performances de conduite dans cette situation auraient été meilleures que celles de la voiture automatisée

3 - Dans cette situation, les performances de la voiture automatisée sont telles que je peux réaliser une autre activité (comme utiliser mon smartphone)

4 - La situation était risquée

5 - La voiture automatisée a mal évalué cette situation

6 - La voiture automatisée a bien réagi à cette situation

7 - Dans cette situation le comportement de la voiture automatisée (ses actions, ses décisions...) m'a surpris

Annexe IV - Questionnaire Anthropomorphisme perçu - (Waytz,2014)

1- Cette voiture semble intelligente

2 - Cette voiture pourrait percevoir ce qui se passe autour d'elle

3 - Cette voiture pourrait anticiper ce qui est sur le point de se produire

4 - Cette voiture pourrait planifier le meilleur trajet disponible

Annexe V - Confiance Post-Expérimentation – (Cahour, & Forzy,2009)

De manière globale, quelle confiance accordez-vous à la voiture automatisée ?

Annexe VI – Cas d’usage et messages vocaux

Cas d’usage	Messages vocaux associés
L0 (Démarrage)	"Bienvenue à bord ! Je suis Antoine, votre chauffeur. Lorsque vous m'aurez donné le contrôle, je serai en charge de la conduite. En attendant je vous souhaite un excellent trajet."
Misuse (Essai d’activation du mode AD lorsqu’il n’est pas disponible)	<p>Cas zone non AD :</p> <p>"Attention ! "Je ne peux pas conduire sur cette partie de votre trajet ! Vous êtes en charge de la conduite, restez prudent."</p> <p>Cas AD compatible :</p> <p>"Si vous souhaitez me donner le contrôle, centrez le véhicule"</p> <p>Cas Accélération en cours :</p> <p>"Si vous souhaitez me donner le contrôle, retirez le pied de l’accélérateur"</p>
Misuse (Mains en dehors du volant en MD)	"Attention ! Vous êtes en charge de la conduite, Mettez les mains sur le volant."
AD COMPATIBLE	<p>"Je suis disponible pour conduire mais les conditions ne sont pas remplies"</p> <p>Selon le cas :</p> <p>"Si vous souhaitez me donner le contrôle, centrez le véhicule"</p> <p>"Si vous souhaitez me donner le contrôle, éteignez le clignotant"</p> <p>"Si vous souhaitez me donner le contrôle, éteignez le clignotant et centrez le véhicule »</p>
AD disponible	"Je suis disponible pour conduire. Pour me donner le contrôle, appuyez sur le bouton situé sur votre volant"
AD activé	"Bienvenue en mode Chauffeur ; Je serai en charge de la conduite pendant x min."
AD activé	Message d'Information "Sachez qu'à tout moment vous pouvez reprendre le contrôle. Ceci ne sera possible que si

	vos mains sont sur le volant et vos yeux sur la route. Je vous souhaite un excellent trajet."
Mains sur le volant en AD	"Je contrôle le véhicule. Vous pouvez enlever les mains du volant/ les pieds des pédales en toute sécurité"
Changement de mode non intentionnel AD vers MD	"Attention ! Vous avez repris le contrôle en appuyant sur la pédale. Vous êtes en charge de la conduite, restez prudent." Message vocal d'explication (sur demande de l'utilisateur) : "Vous avez repris le contrôle en appuyant sur la pédale"
Changement de mode AD vers MD qui ne fonctionne pas	"Pour reprendre le contrôle, Regardez la route/ Mettez vos mains sur le volant"
Changement de mode intentionnel AD vers MD	"Vous avez repris le contrôle ; Vous êtes en charge de la conduite"
TOR60	Entre 60 et 30s avant la fin du mode AD " Vous devez reprendre le contrôle pour prendre la prochaine sortie. Je ne pourrai plus conduire dans quelques secondes" Entre 30 et 10s avant la fin du mode AD "Mettez vos mains sur le volant, regardez la route puis reprenez le contrôle" Entre 10 et 0s avant la fin du mode AD "Reprenez le contrôle maintenant !"
TOR10	"Attention ! Défaut capteur détecté. La voiture s'arrête ; Reprenez le contrôle maintenant !"
MD après TOR 60s	"Vous avez repris le contrôle ; Vous êtes en charge de la conduite"
MD après TOR 10s	"Vous avez repris le contrôle ; Vous êtes en charge de la conduite" Message d'explication (sur demande de l'utilisateur) détaillée cause du TOR "J'ai détecté un défaut sur le capteur LIDAR qui équipe votre véhicule ce qui m'a empêché de conduire en toute sécurité. Je vous ai donc demandé de reprendre la main "
MRM après TOR60	"La voiture s'arrête, reprenez le contrôle"
L0 après MRM	"La voiture est arrêtée. Vous êtes désormais responsable de la conduite. Reprenez le contrôle."
Brouillard – Freinage de 110 à 50 km/h	"Je vais freiner à cause du brouillard, ne vous inquiétez pas, j'ai conscience du camion qui nous suit"

Annexe VII: Tableaux

Tableau A.1 : scores d'anthropomorphisme perçus

	Baseline	Assistant Vocal	Assistant Visuel
Médiane	7.75	8.50	7.75
Écart Interquartile	1.12	1.69	0.812
Moyenne	7.59	7.75	7.73
Écart type	1.07	1.86	1.00

Tableau A.2 : Confiance Globale (dans l'ordre : Moyenne, Écart Type, Médiane, EIQ)

	Initial	Post-Training	Activation	TOR 60	TOR 10	Brouillard	Post-Expérimentation
Baseline	7.33 1.07 7 1	8.08 0.515 8 0	9.17 1.27 10 1.25	9.25 0.866 9.5 1.25	6.45 2.16 7 3.5	7.42 2.71 8 2.25	8 1.21 8 2
Assistant Vocal	5.75 0.866 6 1	7.17 1.11 7 1.25	8.25 1.66 8 2.25	9.08 0.996 9 1.25	6.83 2.66 8 4.25	7.17 1.75 7 3	7.33 1.87 7.5 1.25
Assistant Visuel	5.58 0.996 6 1	7.08 1.16 7 2	8.08 0.996 8.5 2	8.67 1.15 9 1.5	6.92 1.78 7 1.5	7.58 1.51 8 2	7.25 1.29 7.5 2
Test Kruskal-Wallis	chi-squared = 16.768, df = 2, p-value = 0.0002285	chi-squared = 7.1192, df = 2, p-value = 0.02845	chi-squared = 5.6167, df = 2, p-value = 0.0603	chi-squared = 1.759, df = 2, p-value = 0.415	chi-squared = 0.47271, df = 2, p-value = 0.7895	chi-squared = 0.94125, df = 2, p-value = 0.6246	chi-squared = 1.8606, df = 2, p-value = 0.3944

Tableau A.3 : Confiance Multidimensionnelle (dans l'ordre : Moyenne, Écart-Type, Médiane, EIQ)

	Initial	Post-Training	Activation	TOR 60	TOR 10	Brouillard
Baseline	6.56 1.03 6.7 1.67	7.94 0.710 8.03 0.979	8.20 1.44 8.43 1.14	8.98 1.04 9.07 1.00	5.75 2.12 5.71 3.64	6.98 2.34 7 2.86
Assistant Vocal	6.04 0.955 6.07 1.68	6.87 1.25 6.78 1.70	8.35 1.31 8.79 1.64	8.82 1.25 9.29 1.39	5.75 2.03 6.71 2.96	6.42 1.40 6.64 1.07
Assistant Visuel	5.81 0.821 5.74 1.05	6.85 0.983 6.55 1.54	7.76 1.18 8 1.25	8.62 1.01 8.93 1.11	5.17 2.09 5.29 2.61	6.48 1.49 6.36 1.86
Test Kruskal-Wallis	chi-squared = 4.1261, df = 2, p-value = 0.1271	chi-squared = 8.8063, df = 2, p-value = 0.01224	chi-squared = 1.923, df = 2, p-value = 0.3823	chi-squared = 1.1793, df = 2, p-value = 0.5545	chi-squared = 0.71257, df = 2, p-value = 0.7003	chi-squared = 1.1534, df = 2, p-value = 0.5618

Tableau A.4 : Performances TOR 60s (dans l'ordre : Moyenne, Écart-Type, Médiane, EIQ)

Interface	Temps de réaction
Baseline	28.3 16.2 28.5 24.1
Assistant Vocal	16.5 11.6 11.5 8.32
Assistant Visuel	11.6 4.45 11.3 4.72
Test Kruskal-Wallis	Chi-squared = 7.9595, df = 2, p-value = 0.01869

Tableau A.5 : Performances TOR 10s (dans l'ordre : Moyenne, Écart-Type, Médiane, EIQ)

Interface	Temps de réaction
Baseline	7.14 1.50 8.05 2.78
Assistant Vocal	7.19 1.71 7.54 3.03
Assistant Visuel	7.70 1.67 7.82 2.22
Test Kruskal-Wallis	Chi-squared = 7.9595, df = 2, p-value = 0.01869