

Acceptation des véhicules entièrement autonomes par les piétons lors de situation de traversée de route : expérimentation en environnement simulé

Acceptance of Fully Autonomous Vehicles by Pedestrians in Road Crossing Situations: experimentation in simulated environment

Lou Schwartz*
Guillaume Gronier*
Johannes Hermen
lou.schwartz@list.lu
guillaume.gronier@list.lu
johannes.hermen@list.lu

Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST)
Esch-sur-Alzette, Luxembourg



Figure 1: Environnement de simulation pour observer des piétons lors de la traversée d'une route face à un véhicule entièrement autonome.

ABSTRACT

Pedestrians are the most vulnerable road users, especially when crossing a roadway in front of a vehicle that can inflict serious damage. Pedestrians must assess their environment and the risks involved. This will continue to be true and will raise new issues in an environment with Fully Autonomous Vehicles (FAVs). Therefore, how can the design of the external human-machine interface (eHMI) influence crossing behaviour? How receptive are pedestrians to the arrival of FAVs in the automotive landscape? To answer these questions, 39 participants were put in a pedestrian situation in front of eight simulations of autonomous cars allowing to test two different eHMIs in four situations: with or without a crosswalk on the road; the FAV stops or does not stop to let the pedestrian pass. The results show, among other things, that the responsiveness of FAVs is influenced by having dependent children under 10 years of age, nationality, and place of residence of the participants. Pedestrian profile did not appear to influence FAV receptivity. It

*Both authors contributed equally to this research.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution International 4.0 License.

IHM '22, April 5–8, 2022, Namur, Belgium
© 2022 Copyright held by the owner/author(s).
ACM ISBN 978-1-4503-9189-4/22/04.
<https://doi.org/10.1145/3500866.3516372>

was observed that the situations with a higher receptivity score also had a better user experience score towards the eHMI and were also the best perceived and had a shorter decision-making time. Thus, the most appreciated situation was the one where the FAV projected a crosswalk on the road when the vehicle was stopped. The situations with the lowest scores (responsiveness, user experience, situation perception and decision time) were those where the FAV did not stop and did not give any warning signal. In both cases (best and worst scores), the results show that the presence or absence of a crosswalk already on the road does not play a significant role. Finally, to ensure good acceptance of FAVs by pedestrians, we identified the participants' needs in terms of information and training (type of information required, format and authority in charge of dissemination).

RÉSUMÉ

Les piétons sont les usagers de la route les plus vulnérables, particulièrement au moment de traverser une route face à un véhicule qui peut leur infliger de graves dommages. Les piétons doivent alors évaluer leur environnement et les risques encourus. Ceci restera vrai et soulèvera de nouvelles problématiques dans un environnement avec des Véhicules Entièrement Autonomes (VEA). Dès lors, comment la conception de l'interface externe du VEA (appelée external Human-Machine Interface : eHMI) peut-elle influencer le comportement lors de la traversée ? Quelle est la réceptivité des piétons à l'arrivée des VEA dans le paysage automobile ? Pour répondre à ces questions, 39 participants ont été mis en situation de

piéton face à huit simulations de voitures autonomes permettant de tester deux eHMI différentes dans quatre situations : avec ou sans passage piéton matérialisé sur la chaussée ; le VEA s'arrête ou ne s'arrête pas pour laisser passer le piéton. Les résultats montrent notamment que la réceptivité des VEA est influencée par le fait d'avoir des enfants de moins de 10 ans à charge, la nationalité et le lieu de résidence des participants. Le profil de piéton ne semble pas avoir d'influence sur la réceptivité des VEA. Il a été observé que les situations ayant recueilli un meilleur score de réceptivité ont également obtenu un meilleur score d'expérience utilisateur vis-à-vis de l'eHMI et ont aussi été les mieux perçues et présentaient un temps de prise de décision plus court. Ainsi, la situation la plus appréciée est celle où le VEA projette un passage piéton sur la chaussée à l'arrêt du véhicule. Les situations ayant obtenus les moins bons scores (réceptivité, expérience utilisateur, perception de la situation et temps de prise de décision) sont celles où le VEA ne s'est pas arrêté et n'a émis aucun signal d'avertissement. Dans les deux cas (meilleur et moins bon scores), les résultats montrent que la présence ou non d'un passage piéton déjà matérialisé sur la route ne joue pas un rôle significatif. Enfin, pour assurer une bonne acceptation par les piétons des VEA nous avons identifié les besoins des participants en termes d'information et de formation (type d'information nécessaires, format et autorité en charge de la diffusion).

CCS CONCEPTS

• **Human-centered computing** → **Laboratory experiments**; • **Applied computing** → *Computers in other domains*.

KEYWORDS

Pedestrians, Fully Autonomous Vehicles (FAV), Connected Autonomous Vehicle (CAV), Simulation Environment, External Human Machine Interface (eHMI)

MOTS CLÉS

Piétons, Véhicules entièrement autonomes (VEA), Véhicules Autonomes Connectés (CAV), Environnement de simulation, External Human Machine Interface (eHMI)

ACM Reference Format:

Lou Schwartz, Guillaume Gronier, and Johannes Hermen. 2022. Acceptation des véhicules entièrement autonomes par les piétons lors de situation de traversée de route : expérimentation en environnement simulé: Acceptance of Fully Autonomous Vehicles by Pedestrians in Road Crossing Situations: experimentation in simulated environment. In *IHM '22: Proceedings of the 33rd Conference on the Interaction Human-Machine (IHM '22), April 5–8, 2022, Namur, Belgium*. ACM, New York, NY, USA, 15 pages. <https://doi.org/10.1145/3500866.3516372>

1 INTRODUCTION

Le moment où un piéton traverse une route est un moment de vulnérabilité face à un véhicule qui peut lui infliger des dommages graves. Le piéton doit évaluer son environnement et les risques encourus afin de prendre la décision de traverser, d'attendre "le bon moment" pour traverser, de chercher un endroit plus sécurisé ou d'abandonner. Dans ce processus de prise de décision, plusieurs facteurs centrés sur l'environnement et sur les caractéristiques du

piéton lui-même sont pris en compte par les piétons [38]. Cependant, le contexte devrait prochainement évoluer avec l'arrivée des véhicules entièrement autonomes (VEA). En effet les constructeurs, chercheurs et gouvernements œuvrent en ce sens, même si certains doutes, discutés en Section 1.2, commencent à s'élever. Ce qui peut mener à un changement de comportement de la part des piétons, notamment à un changement dans le processus de prise de décision lors de la traversée d'une route. Pour observer le comportement de piétons face à des VEA en approche, nous avons placé 39 piétons dans un environnement de simulation en zone urbaine. Le protocole de l'expérimentation est présenté en Section 2 et les résultats de l'expérimentation sont discutés en Section 3.

1.1 Comportements des piétons lorsqu'ils traversent une route

De nombreuses recherches ont porté sur l'observation des comportements des piétons lorsqu'ils traversent une route, et les interactions explicites et implicites qui s'engagent entre les piétons et les véhicules motorisés.

1.1.1 Facteurs pris en compte lors d'une situation de traversée de route. Tous les signaux transmis par les automobilistes sont importants dans sa prise de décision de traverser ou non d'un piéton : l'attention perçue du conducteur, les gestes de la main ou de la tête, les appels de phares ou les échanges de regard, sont autant d'indications qui permettent aux piétons de savoir s'il peut traverser en toute sécurité. Par ailleurs, la vitesse d'approche du véhicule est également un paramètre important dans la prise de décision [4, 26, 38, 46]. Selon Rasouli et Tsotos [38], lors de la traversée d'une route par un piéton, des facteurs environnementaux et inhérents au piéton influencent sa prise de décision, tels que le moment de la journée, la distance perçue du véhicule, l'âge, le genre et la culture du piéton (nationalité, pays de résidence, etc.).

1.1.2 Comportements observés des piétons lors de situations de traversée. L'étude de Sucha, Dostal et Risser [43] a permis de quantifier les comportements des piétons quand ils traversent la route à un passage piéton sans feu tricolore. Ainsi, 46% des piétons observés attendent que les véhicules s'arrêtent avant de traverser ; 18% attendent que les véhicules ralentissent ; 2% n'attendent pas de réaction des véhicules et traversent spontanément ; et dans 34% des observations, les véhicules n'ont pas cédé la priorité au passage piéton, obligeant les piétons à traverser après eux. La plupart des piétons ont également déclaré qu'ils cherchaient à signaler leur intention de traverser aux véhicules en approche à travers différents comportements : 84% des piétons interrogés cherchent ainsi le contact visuel avec les conducteurs ; 9% indiquent leur intention de traverser en s'engageant sur la route ; 4% font un geste de la main. Une autre étude, s'intéressant cette fois-ci aux conducteurs, indique que ceux-ci cherchent un échange de regard avec les piétons afin de s'assurer qu'ils ont bien repérés la voiture qui arrive [39]. Aussi, en absence d'échange de regard, les conducteurs adoptent une approche du passage piéton plus rapide et une décélération moins progressive que lorsqu'il y a un échange de regard. Le contact visuel est ainsi perçu par le conducteur comme l'expression du piéton de son intention de traverser, ce qui l'encourage alors à mieux anticiper son arrêt. Lee et al. [24] relèvent que moins de

1% des véhicules indiquent aux piétons qu'ils les laissent passer, en faisant des appels de phares ou en klaxonnant par exemple. Environ 4% des conducteurs font un geste de la main en laissant passer les piétons.

1.1.3 Prendre la décision de traverser. Selon Ezzati et al. [16], l'interaction véhicule-piéton peut être divisée en cinq phases différentes reprises dans un processus d'interactions : (1) avant toute interaction les parties en interaction évaluent rapidement les caractéristiques de la route à l'approche de la zone de contact. C'est à ce moment que les piétons choisissent leur point de passage tandis que les conducteurs surveillent continuellement la route et le trafic et adaptent leur conduite. (2) Ensuite, les piétons indiquent leur intention de traverser de manière implicite ou explicite. (3) L'interaction en tant que telle commence au moment où les parties se détectent mutuellement. Les parties (4) évaluent la situation en fonction des informations dont ils disposent et (5) choisissent une stratégie. Liu et al. [25] proposent un modèle cognitif de prise de décision et comportemental lors de la traversée comprenant trois parties : la conscience de la situation, l'évaluation du risque basée sur la perception du danger et la prise de décision basée sur l'acceptation personnelle du risque. La conscience de la situation d'un piéton inclut sa capacité à percevoir les objets dans son environnement (perception), à comprendre l'état et l'intention de ces objets (compréhension) et à prédire l'état dans le futur de ces objets (projection). Ensuite, le piéton perçoit les dangers en fonction de sa perception et évalue l'ampleur du risque subjectif. Puis, le piéton décide du comportement à adopter en comparant le risque subjectif avec son niveau de risque acceptable. Ces recherches indiquent ainsi qu'une interaction piétons-véhicules, explicite ou implicite, s'instaure lorsque le piéton cherche à traverser une route. Certains comportements du conducteur, dont le regard et l'attention visuelle qu'il porte à son environnement, permettent d'indiquer au piéton s'il peut traverser en sécurité. Dans le cas des VEA sans conducteur, de nouvelles formes d'interactions doivent être mises en place. Certains constructeurs et chercheurs proposent des solutions alternatives à l'absence de conducteur, dont nous présentons quelques illustrations dans la partie suivante.

1.2 Les véhicules entièrement autonomes (VEA)

1.2.1 Qu'est-ce qu'un véhicule entièrement autonome? Les constructeurs mènent une recherche poussée pour rendre les véhicules entièrement autonomes avec comme objectif d'une mise en circulation et un accès au grand public dès 2025 et un déploiement à plus de 90% sur le marché en 2055 [32]. Des essais sur route sont déjà organisés par les différents constructeurs automobiles [3]. De nombreux gouvernements soutiennent la recherche et le développement des VEA, non seulement du point de vue économique, mais aussi en préparant les adaptations massives des infrastructures qui seraient nécessaires pour faire cohabiter VEA et véhicules non autonomes [2].

Les véhicules entièrement autonomes sont des véhicules dont la conduite est entièrement gérée par un système automatisé, équipés de détecteurs et capables de réagir dans toutes les situations dans lesquelles ils se trouvent. L'administration nationale de la sécurité routière du ministère américain des transports (U.S. Department

of Transportation's National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)) définit les véhicules autonomes comme « ceux dans lesquels au moins certains aspects d'une fonction de contrôle critique pour la sécurité (par exemple, la direction, l'accélérateur ou le freinage) se produisent sans intervention directe du conducteur ». Les VEA constituent le niveau d'autonomie le plus élevé des véhicules autonomes établi par la Society of Automotive Engineers (SAE), qui distingue 6 niveaux, cf. Figure 2. Les trois premiers niveaux (0, 1 et 2) sont considérés comme des assistances à la conduite, mais le conducteur est le principal acteur de la conduite. Les 3 niveaux suivants (3, 4 et 5) délèguent une partie ou l'intégralité de la conduite au système automatisé. Les VEA correspondent au niveau 5.

1.2.2 Impacts sociétaux et environnementaux des VEA. Si les VEA font l'objet d'autant d'attention depuis le début des années 2000, c'est qu'ils promettent de nombreux changements sociaux et dans le domaine des transports en améliorant considérablement la sécurité sur les routes grâce à une diminution des erreurs humaines [20], en décongestionnant les routes notamment par l'adoption de nouvelles habitudes de déplacement, comme l'adoption du partage de véhicules (car-sharing) et la diminution du nombre d'accidents [3, 27, 30, 45], et en réduisant les émissions des gaz à effet de serre (avec une estimation de réduction de 87 à 94%) grâce à la combinaison de plusieurs facteurs relatifs aux VEA : diminution de la taille des véhicules, optimisation des parcours sur route, favorisation du partage de véhicule, conduite écologique optimisée et utilisation de l'énergie électrique plutôt que thermique [17, 22, 34, 41, 42]. Les principaux avantages perçus des VEA sont : la réduction du stress lié à la conduite ; la possibilité de se reposer pendant les longs trajets et s'occuper à d'autres activités de loisirs ; la diminution du nombre d'accidents et donc la préservation de la santé physiques des usagers ; la réduction des frais d'assurance ; et la possibilité de voyager quand on le souhaite [35–37, 44]. Le déploiement des VEA permettrait d'améliorer la mobilité des jeunes, personnes âgées et handicapés[35]. Cependant, plusieurs recherches soulignent également que l'arrivée des VEA entraînerait une forte demande pour ce mode de transport, qui serait ainsi disponible pour une large population qui n'a pas accès, à ce jour, au transport individuel : personnes déficientes visuelles, handicapées physiques et mentales, personnes âgées ou sans permis. Cet effet rebond augmenterait significativement le nombre de véhicules sur les routes, et contribuerait à renforcer la congestion du trafic [5, 19, 29, 30].

D'un point de vue écologique, les VEA pourraient avoir un effet néfaste par la multiplication des données générées [48]. De plus, les pénuries actuelles montrent qu'une vraie question se pose sur les ressources utilisées pour les composants électroniques nécessaires dans la construction de ce type de véhicules en termes de disponibilités des ressources mais également en termes d'impact écologique de l'exploitation de ces ressources [6]. Enfin, se pose les questions de la fiabilité du système et d'un coût plus élevé [48]. Quelles que soient les prédictions, toutes les recherches s'accordent à dire que l'introduction des VEA nécessitera une révision profonde et globale des modalités de transport. De plus, les avantages attendus ne pourraient pas être effectifs sans une nouvelle politique globale mise en place par les autorités [48].

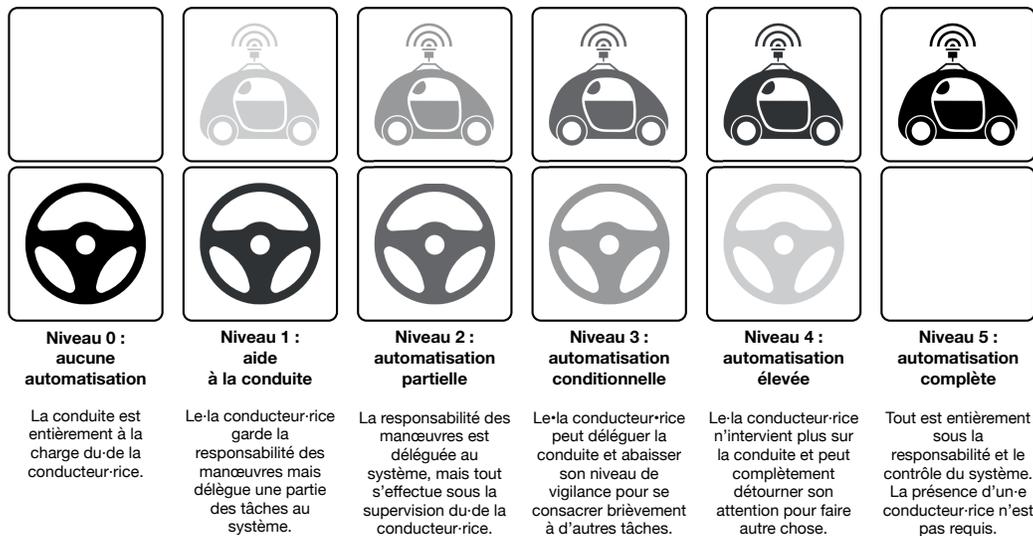


Figure 2: Niveaux d'autonomie des véhicules, selon la classification de la SAE [33]

1.2.3 Acceptation des VEA par les piétons. Les interactions entre les piétons et les VEA soulèvent de nouvelles questions de recherche. Deb et al. (2017) notent qu'un pourcentage important de piétons (environ 60%) ne fait pas confiance aux véhicules (conducteurs) pour répondre de manière appropriée à leur égard [10]. Face aux VEA, les chiffres sont plus ambigus, car d'une part les véhicules autonomes sont perçus comme des machines capables d'éviter les erreurs humaines, mais d'autre part les VEA nécessitent, en tant que machines, d'être acceptés par les piétons. Cette acceptation renvoie directement aux modèles d'acceptation technologique, tels que TAM [9], TAM2 [47] ou UTAUT [23]. Ainsi, les facteurs d'acceptation des VEA par les piétons sont multiples. Ils comprennent, par exemple, l'attitude générale envers les VEA, les normes sociales, la confiance, l'efficacité perçue, la compatibilité perçue avec l'infrastructure, l'efficacité perçue du système, l'anxiété et le stress perçus [10], [18]. Une façon de créer une nouvelle forme d'interaction entre les VEA et les piétons est d'intégrer une interface externe (eHMI) sur le véhicule qui sera visible par les usagers de la route [1]. Une autre voie consiste à adapter l'infrastructure afin d'offrir un environnement sécurisé aux usagers. On appelle eHMI l'ensemble des solutions (Interfaces sur les VEA ou certains éléments de l'infrastructure routière) qui pourraient aider les usagers de la route à se sentir en sécurité.

1.2.4 Communiquer via une External Human Machine Interface (eHMI). L'un des défis de conception centrée sur l'humain concerne l'interaction entre piétons et VEA. En effet, certaines situations nécessitent que les véhicules transmettent des informations aux piétons, en particulier lorsque les piétons souhaitent traverser. Plusieurs types d'eHMI ont été recensés par Dey et al. dans une étude de la littérature et des prototypes développés par des constructeurs comprenant des interfaces visuelles, auditives, haptiques, utilisant des artefacts de langage corporel et d'autres eHMI entrant dans aucune des catégories précédentes [12]. Cependant Dey et al.

soulignent que les interfaces visuelles représentent 97% des eHMI qu'ils ont recensées, avec 69% utilisant uniquement la modalité visuelle et 29% proposant une combinaison avec une autre modalité comme le son ou l'haptique [12].

Comme le montre la revue de la littérature, les eHMI conçues à ce jour sont très différentes tant au point de vue interactions que types d'information communiquées. Il ne semble pas y avoir de consensus actuellement, même si les eHMI visuelles sont les plus nombreuses. Il n'est pas clair non plus de savoir si le VEA doit s'arrêter dès qu'il a détecté un piéton avec l'intention de traverser. En effet, on pourrait être tenté d'avancer que c'est au véhicule de s'adapter. Cependant, les eHMI relevées dans la revue de la littérature ne cèdent pas forcément le passage. On peut donc se demander pourquoi et s'il existe des conditions dans lesquelles les piétons considèrent que le véhicule ne devrait pas s'arrêter.

D'après la revue de la littérature, les interactions entre piétons et VEA posent de nouvelles problématiques. Dès lors, il nous semble important de nous intéresser en particulier aux réactions des piétons face aux VEA, aux éléments sur lesquels ils s'appuieront pour prendre la décision de traverser, et à la manière d'aider les piétons à avoir confiance dans les VEA. C'est pour répondre à cette problématique que l'expérimentation suivante a été mise en place.

2 EXPÉRIMENTATION

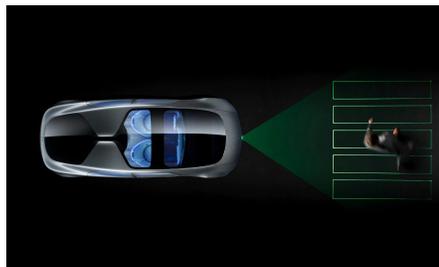
D'après la revue de la littérature, les interactions entre piétons et VEA posent de nouvelles problématiques : sur quels éléments prendre la décision de traverser ou non et quelles modalités utiliser pour donner les informations adéquates aux piétons sur l'intention du VEA de s'arrêter ou non. Dès lors, il nous semble important de nous intéresser en particulier aux réactions des piétons face aux VEA, aux éléments sur lesquels ils s'appuieront pour prendre la décision de traverser, et à la manière (modalité, type d'information, etc.) d'aider les piétons à avoir confiance dans les VEA.



(a) eHMI Anthropomorphe : Le VEA dispose de deux yeux à l'allure sympathique. Ils suivent le piéton du regard lorsqu'il traverse devant eux. Source : Jaguar (2018)[21].



(b) eHMI Textuelle : Le VEA affiche le message « Go Ahead » sur sa calandre afin de signifier au piéton qu'il peut traverser. Source : Vorsteher (2017) [8].



(c) eHMI Symbolique: Le VEA projette devant lui un passage piéton afin de signifier au piéton qu'il peut traverser. Source : Mercedes Benz (2015).



(d) eHMI Abstraite : Le VEA affiche trois états aux piétons : 1. un bandeau bleu indique que le VEA suit sa route ; 2. une lumière rouge indique aux piétons qu'ils ont été détectés mais qu'ils n'ont pas la priorité ; 3. une lumière verte indique au piéton qu'il peut traverser. Source : Dey et al. (2018) [13].

Figure 3: Exemples d'eHMI visuelles selon la catégorisation de Dey et al. [12].

L'expérimentation, présentée dans cet article, cherche à répondre à la question de recherche générale suivante : **comment réagiront les piétons face à des VEA, et comment les eHMI peuvent-elles améliorer la confiance des piétons lorsqu'ils devront traverser une route devant un véhicule autonome ?** Cette question peut être découpée en quatre questions de recherche plus opérationnelles:

- RQ1 : Quelle est la réceptivité des piétons à l'arrivée des VEA dans le paysage automobile ?
- RQ2 : Est-ce que le profil du piéton (âge, genre, nationalité, etc.) influence sa réceptivité envers les VEA ?
- RQ3 : Quelles sont les informations et formations dont ils ont besoin pour comprendre les VEA, adapter leur comportement et accepter les VEA ?
- RQ4 : Comment la conception de l'eHMI, en termes de modalités d'interaction (visuelles etc.), peut-elle influencer le comportement de traversée ?

2.1 Protocole d'expérimentation

2.1.1 *Identification de scénarios d'usage.* Au préalable de cette étude, une phase d'identification des besoins des piétons a été menée en utilisant les méthodes de veille scientifique, l'organisation de

deux ateliers avec des piétons et une enquête en ligne afin de définir les scénarios de test.

Scénarios d'usage. Deux groupes de discussion (7 participants, répliqué deux fois) et une enquête en ligne avec 224 répondants, ont permis de sélectionner les eHMI préférées des piétons participants à cette phase préliminaire. Globalement, il a été demandé lors des ateliers que le VEA s'arrête systématiquement quand il a détecté un piéton voulant traverser la route, qu'il y ait ou non présence d'un passage piéton matérialisé sur la chaussée. De plus, les VEA doivent être distingués facilement d'un véhicule avec chauffeur, par exemple par une bande de LED sur la carrosserie. Ce qui est également recommandé dans la littérature [33]. Le bleu, et particulièrement le turquoise, semblent les couleurs les plus adaptées pour ce signalement. Les couleurs déjà utilisées dans la circulation ne peuvent pas être utilisées (vert, jaune/orange, rouge). Faas et Baumann ont montré que les indications données avec des LED turquoise facilitent les facteurs de visibilité, de discrimination, de sentiment de sécurité et de confiance des piétons plus que la lumière blanche [40].

Les résultats de l'analyse des ateliers et de l'enquête en ligne ont permis de sélectionner deux types d'eHMI pour l'expérimentation et de définir leurs interactions ainsi :

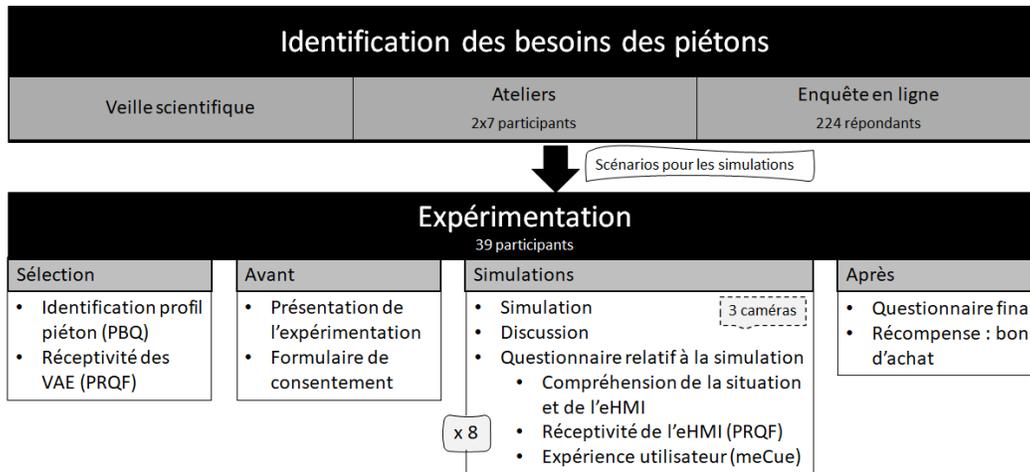


Figure 4: Vue synthétique du protocole d'expérimentation.

Klaxon + appel de phares. Un des points régulièrement soulevé lors des ateliers était que les eHMI présentées semblaient compliquées à comprendre de prime abord. Les participants ont ainsi suggéré d'utiliser les moyens d'interaction déjà présents sur les voitures classiques comme les phares ou le klaxon. De plus, même si les eHMI visuelles étaient bien appréciées, les participants aux ateliers et certains répondants à l'enquête en ligne ont souligné qu'une autre modalité, comme le son, devait être utilisée en support pour appuyer le message mais aussi pour aider les personnes plus vulnérables à comprendre les messages du VEA. Enfin, une remarque revenant souvent en atelier était qu'il fallait peut-être minimiser le nombre d'interactions possibles. Ainsi cette eHMI a été conçue pour ne donner aucune information quand le VEA a détecté le piéton et s'arrête pour le laisser passer. Le VEA émet seulement un signal s'il a détecté le piéton trop tard pour le laisser passer en klaxonnant deux fois et en effectuant un "appel de phares".

Projection sur la route d'un passage piéton. Les participants aux ateliers et les résultats d'enquête ont montré que la projection sur la route d'un passage piéton par le VEA était une solution appréciée. Sur base des remarques précédentes lors des ateliers, le VEA projette un passage piéton vert quand il s'arrête pour montrer qu'il laisse passer le piéton détecté, voir Figure 5.

Deux variations nous ont semblées importantes à évaluer au regard des discussions en atelier : (1) la présence ou l'absence d'un passage piéton, par exemple voir Figure 5, et (2) le VEA a détecté le piéton et s'arrête ou le VEA n'a pas détecté le piéton à temps et ne peut pas s'arrêter, voir Figure 1. Pour simuler que le VEA n'a pas détecté à temps le piéton, nous avons installé un paravent faisant office de palissade de chantier. Cet élément cache le piéton qui est détecté au dernier moment (et donc trop tard) par le VEA. Mais également cache la route au piéton, voir Figure 6.

2.1.2 L'expérimentation.

Sélection des participants. Une quarantaine de sujets sont sélectionnés, hommes et femmes, en fonction de leurs attitudes envers les véhicules autonomes, de leurs pratiques de transport, de leur expérience de conduite, et de leur attitude en tant que piéton.

Table 1: Description des conditions expérimentales sur simulateur.

	Le VEA s'arrête	Le VEA ne s'arrête pas
Présence d'un passage piéton	C1. Le VEA projette une eHMI (figure 5)	C5. Le VEA alerte le piéton en klaxonnant et par appels de phares
	C2. Le VEA ne projette pas d'eHMI	C6. Le VEA n'alerte pas le piéton
Absence d'un passage piéton	C3. Le VEA projette une eHMI (figure 5)	C7. Le VEA alerte le piéton en klaxonnant et par appels de phares
	C4. Le VEA ne projette pas d'eHMI	C8. Le VEA n'alerte pas le piéton

Afin de définir le profil des participants en tant que piétons, nous leur avons soumis deux questionnaires standardisés, dont la traduction en français est en cours de publication :

- **Pedestrian Behavior Questionnaire (PBQ)** [11] qui a pour objectif d'identifier les comportements transgressifs et déviants des personnes lorsqu'elles marchent sur un trottoir ou lorsqu'elles traversent une route.
- **Pedestrian Receptivity Questionnaire for FAVs (PRQF)** [10] qui permet de mesurer la réceptivité des piétons vis-à-vis des VEA.

Le questionnaire Pedestrian Behavior Questionnaire (PBQ) s'intéresse en particulier aux comportements transgressifs des piétons. Ces comportements concernent par exemple le fait de ne pas vérifier que la voie est dégagée lorsque le piéton traverse la rue, emprunter les passages interdits aux piétons pour gagner du temps, ou bien encore traverser la rue même si le feu piéton est rouge. Le PBQ est un questionnaire à 20 items dans sa version courte, sur chacun desquels les participants doivent se positionner à l'aide d'une échelle de Likert à 6 points, exprimant la fréquence du comportement décrit. Plus le score général est élevé, avec un maximum de 6 points, plus le comportement du piéton est jugé transgressif. Bien que ce questionnaire soit américain, les comportements qui y sont repris sont observables en Europe. Voici deux exemples d'items dans leur version originale : « *I cross the*

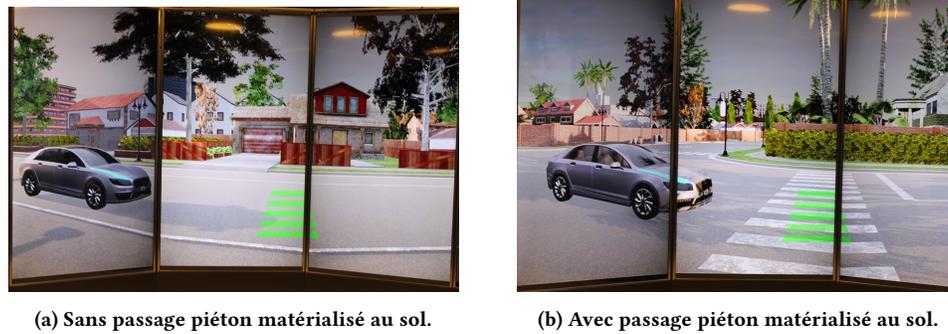


Figure 5: Projection sur la route d'un passage piéton. La bande de LED turquoise sur la carrosserie permet d'indiquer qu'il s'agit d'un VEA.

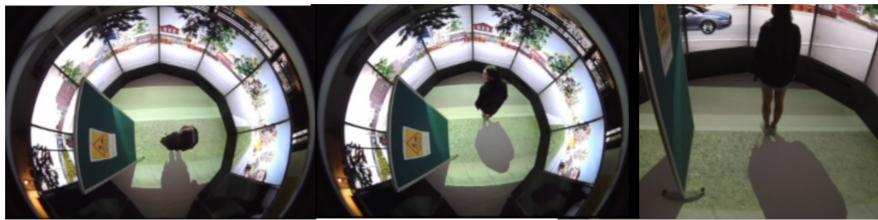


Figure 6: Le piéton est masqué par une palissade de travaux, le VEA voit le piéton au dernier moment et n'est pas capable de s'arrêter à temps.

street even though the pedestrian light is red.» - «I thank a driver who stops to let me cross. »

Pedestrian Receptivity Questionnaire for FAVs » (PRQF) permet de définir la réceptivité des piétons vis-à-vis des VEA. Cette échelle à 16 items permet d'identifier si le répondant est plutôt enclin à accepter les VEA dans son futur environnement, ou s'il se montre plutôt résistant. Les items sont présentés sous la forme de phrases affirmatives (par exemple « Les VEA vont rendre les routes plus sûres ») sur lesquelles le participant doit se positionner sur une échelle allant de 1 (Pas du tout d'accord) à 7 (Tout à fait d'accord). Plus le score total est élevé, plus le participant montre une grande réceptivité à l'égard des VEA. Voici deux exemples de question en version originale « *I would feel safe to cross roads in front of FAVs* » (FAV signifie VEA) « *FAVs will be able to effectively interact with other vehicles and pedestrians* ».

Accueil. L'expérimentation commence par une phase d'accueil qui consiste à présenter au participant le but de l'étude, les conditions de test, les éléments enregistrés et toutes les informations relatives à l'utilisation et la conservation des données. Il leur est demandé de signer un formulaire de consentement éclairé.

Simulations. Lors de l'expérimentation, pour recueillir les impressions des participants, ceux-ci sont mis situation de piéton face à huit simulations de voitures autonomes, dans le cadre d'un dispositif technique de simulation (l'Immersive Arena décrite ci-dessous) qui affiche tout autour d'eux une rue dans un contexte urbain. Pour mitiger les phénomènes d'apprentissage, les scénarios sont distribués de manière aléatoire pour les participants. Après chacune des 8 simulations, un questionnaire sur la simulation est à

remplir comprenant des questions concernant : leur compréhension de la situation et de l'eHMI présentée; leur réceptivité de l'eHMI présentée (questions issues du PRQF [10]); l'expérience utilisateur de l'eHMI présentée (questions issues du meCUE [31]); leur perception du risque (par exemple facilité de compréhension et de prédiction du comportement du véhicule, sentiment de danger ou de confiance, confiance dans la prise de décision, certaines questions sont issues de [25]). Le test dure environ 45 minutes. Les participants sont filmés par trois caméras pour enregistrer leurs réactions face aux véhicules autonomes. Les enregistrements et les réponses aux questions sont stockés et traités de manière anonyme.

Système de simulation. Plusieurs études ont montré l'intérêt d'utiliser un environnement de simulation pour observer des piétons en situation de traversée [7] ou pour former des publics vulnérables afin qu'ils apprennent à adapter leur comportement lors de la traversée d'une intersection pour gagner en sécurité [14, 28]. Pour étudier le comportement des piétons lors de la traversée d'une route face à un VEA en toute sécurité, nous avons décidé d'utiliser un système de simulation appelé Immersive Arena, voir Figure 1. L'Immersive Arena est composée de 12 écrans verticaux de 75" qui forment un mur d'affichage à 360° de 2 mètres de haut, 3,6 mètres de diamètre et d'une résolution de 13400x1920 pixels. Plusieurs sujets peuvent se tenir debout et se déplacer à l'intérieur de l'Immersive Arena. Des caméras sont installées pour enregistrer les passages. Du côté logiciel, une version adaptée de CARLA (simulateur open-source pour la recherche sur la conduite autonome) est utilisée pour générer une simulation urbaine immersive avec des voitures en mouvement [15]. La simulation permet d'adapter le lieu de

l'expérience, de contrôler les voitures, d'ajouter d'autres piétons et de modifier les conditions de lumière et de météo.

2.1.3 Variables observées.

Variables indépendantes. Les variables indépendantes de cette expérimentation sont : le genre, l'âge, le profil en tant que piéton, l'attitude générale envers les véhicules autonomes, la présence ou l'absence d'une indication au sol (passage piéton matérialisé ou non), le comportement du VEA (s'arrête ou ne s'arrête pas) et l'eHMI présentée.

Variables dépendantes. Le comportement du piéton est analysé selon plusieurs variables dépendantes décrites dans la Table 2. Nous avons observé le comportement des participants, c'est-à-dire s'ils traversent et à quel moment, ainsi que le temps de prise de décision. Leur perception du risque, de l'expérience utilisateur de l'eHMI et leur réceptivité des eHMI présentées a été mesurée grâce à un questionnaire rempli après chaque simulation. Enfin un questionnaire final permet d'évaluer leurs préférences en termes d'eHMI et leurs besoins en formation et information.

3 RÉSULTATS ET OBSERVATIONS

3.1 Profils des participants

39 personnes ont participé à l'expérimentation (15 femmes et 24 hommes). La moyenne d'âge était de 40.8 ans, SD = 11.6 (42.9 pour les femmes, SD = 13.3; et 39.5 pour les hommes, SD = 10.5). Le score total moyen au PBQ [11] pour les 39 participants est de 1,87 avec un écart-type de 0,45 et une médiane à 1,75. Pour rappel, plus le score général est élevé, avec un maximum de 6 points, plus le comportement du piéton est jugé transgressif. Le score total maximum est de 3,1 et le minimum de 1,3. Cela montre que de manière générale, les participants n'ont pas déclaré de comportements transgressifs en tant que piéton. On notera également qu'il n'y a pas de différences significatives en fonction du genre, de l'âge, de la nationalité, du pays de résidence, du fait que les participants aient au moins un enfant à charge de moins de 10 ans, ou qu'ils aient été victimes ou non d'un accident de la route.

3.2 RQ1: Quelle est la perception des VEA par des piétons ?

Les 39 participants de notre expérimentation ont obtenu au PRQF [10] un score total moyen de 3,61 avec un écart-type de 1,02 et une médiane de 3,63. Le score total maximum est de 6,06 et le minimum de 1,5. Pour rappel, plus le score total est élevé (entre 1 et 7), plus le participant montre une grande réceptivité à l'égard des VEA. Ces résultats montrent une grande disparité des réponses dans la réceptivité des VEA. Plusieurs modalités de variables expliquent ces différences. En effet, aucune différence significative de la réceptivité peut être observée en fonction du genre, de l'âge et du fait que les sujets aient été victime ou non d'un accident de la route. En revanche, une différence significative pour les caractéristiques suivantes peut être soulignée :

- les sujets n'ayant pas d'enfants de moins de 10 ans à charge ont une réceptivité plus élevée vis-à-vis des VEA ($t(37) = -2,076, p < .05$).

- les sujets de nationalité luxembourgeoise et d'autres nationalités (bulgare, algérienne et portugaise) ont une réceptivité plus élevée vis-à-vis des VEA que les français et les belges ($F(3, 35) = 3,155, p < .05$) ;
- les sujets habitant au Luxembourg ont une réceptivité plus élevée vis-à-vis des VEA que les résidents français et belges ($F(2, 36) = 3,326, p < .05$).

Observation 1 : la nationalité, le pays de résidence et le fait d'avoir des enfants de moins de 10 ans semblent avoir un impact sur la réceptivité des VEA.

3.3 RQ2 : Est-ce que le profil piéton influence sa réceptivité envers les VEA ?

A noter aucune corrélation significative n'a été relevée entre les scores aux questionnaires PBQ et PRQF ($r = 0,044$). Ainsi, l'adoption d'un comportement particulier en tant que piéton n'a aucune influence sur la réceptivité vis-à-vis des VEA.

Observation 2 : l'adoption d'un comportement particulier en tant que piéton (comportement transgressif ou au contraire respectant scrupuleusement le code de la route) n'a aucune influence sur la réceptivité vis-à-vis des VEA.

3.4 RQ3 : Quelles sont les informations et formations dont ils ont besoin pour comprendre les VEA, adapter leur comportement et accepter les VEA ?

A la fin des 8 séances de simulation, trois questions ont été posées aux participants concernant leur besoin d'information et de formation : (1) de quel type d'information ont-ils besoin, (2) comment préfèrent-ils recevoir l'information et (3) qui devrait communiquer quel type d'information. Les résultats sont présentés ci-dessous.

3.4.1 Types d'informations nécessaires. Les informations les plus importantes pour les 39 participants à cette étude sont (voir Figure 7) : l'adaptation des infrastructures et équipements pour correspondre à la mise en circulation de VEA (moyenne 4,26 min=1, max=5), cela concerne entre autres les passages piétons ; le fonctionnement des différentes eHMI (moyenne 4,10) ; et les problèmes détectés dans les zones de mise en circulation de VEA (moyenne 3,92).

D'autres informations importantes sont nécessaires : le calendrier, les zones et les étapes de mise en circulation des VEA (moyenne 3,62) ; les conditions d'assurance communiquées par les assureurs (conditions et montant de prise en charge en cas d'accidents, montant des primes d'assurance, etc.) (moyenne 3,41) ; les textes de loi et leur interprétation concernant la responsabilité en cas d'accident avec un VEA (moyenne 3,36) ; les algorithmes et comportements programmés des VEA (quelles décisions les VEA peuvent prendre en fonction d'une situation) (moyenne 3,18) ; et des statistiques sur les risques d'accidents avec les VEA (moyenne 3,10).

Les piétons semblent avoir besoin d'informations complètes sur les VEA, car aucun type d'information n'a une moyenne inférieure à 3. Les participants ont indiqué qu'ils jugent indispensable la mise en place d'une réglementation ou une normalisation des interfaces des VEA afin d'assurer l'uniformité quel que soit le fabricant, au moins

Table 2: Variables dépendantes observées et méthodes d'observation.

Catégorie	Indicateur	Valeurs possibles	Méthode d'évaluation
Comportement du piéton	Est-ce que le piéton traverse ?	Oui ou non	Observation
	Quand le piéton traverse ?	Avant l'arrivée du VEA, quand celui-ci est arrêté ou quand le VEA est passé.	Observation
Risque perçu par le piéton	Évaluation du risque		Items dans le questionnaire après chaque simulation basé sur [25]
	Temps de prise de décision / hésitation	Temps entre l'arrêt du VEA et le mouvement de traverser ou entre le moment où le VEA est passé devant le piéton et le mouvement de traversée	Observation
	Confiance en sa décision (de traverser ou non)		Items dans le questionnaire après chaque simulation basé sur [25]
Utilisabilité de l'eHMI	Compréhensibilité		Décrire l'eHMI et son comportement
	Utilisabilité		Items du questionnaire meCUE après chaque simulation [31]
Acceptation des VEA	Réceptivité des VEA		Questionnaire PRQF [10]
	Besoin en information et formation		Questionnaire

en Europe mais au mieux dans le monde, et d'en être informés (4 répondants l'ont mentionné comme autre information nécessaire).

Observation 3 : Les piétons semblent avoir besoin d'informations complètes sur les VEA, incluant : l'adaptation des infrastructures, les explications des IHM, les problèmes détectés dans les zones où les VAC ont été introduits, la planification et les zones d'introduction des VEA, les conditions d'assurance en cas d'accident, les textes de loi sur la responsabilité en cas d'accident et la manière de les interpréter, les algorithmes et les comportements des VEA et les statistiques sur les accidents impliquant des VEA.

Observation 4 : la réglementation et la normalisation des eHMI sont nécessaires pour garantir l'uniformité quel que soit le fabricant et améliorer la prédictivité, la compréhension et l'acceptation des VEA.

3.4.2 Moyens d'information et de formation. Les 39 participants à l'étude préfèrent que l'information sur les VEA soit diffusée par : une formation à l'école pour les mineurs (moyenne 4,62 min=1, max=5) ; une campagne de communication officielle dans les médias (comme pour la sécurité routière) (moyenne 4,54) ; et une formation spécifique lors de la préparation du permis de conduire (moyenne 4,41), voir Figure 8.

Les autres moyens d'information proposés ont tous une moyenne supérieure à 3 : la possibilité de tester la "conduite" d'un VEA (moyenne 4,23) ; une campagne de communication générale dans les médias (télévision, radio, journaux) (moyenne 4,18) ; une formation libre et gratuite pour les adultes (par exemple, dans une auto-école) (moyenne 3,08). L'utilisation d'une campagne de communication officielle par courrier ou par e-mail n'a reçu qu'une moyenne de 2,95.

Observation 5 : il serait préférable que les jeunes soient informés en priorité. Ensuite, pour les adultes déjà titulaires du permis de conduire, une campagne de communication massive et répétée, de préférence officielle, dans tous les médias standards est privilégiée. La possibilité de tester un VEA et des sessions de formation pour ce public sont appréciables mais ne doivent pas être obligatoires.

Seul un participant souhaiterait que tout le monde soit obligé de suivre une formation obligatoire.

Deux participants précisent que les VEA devraient pouvoir être testés en condition réelle sur un circuit ou dans une zone dédiée dans une ville en tant que piéton. Le test des VEA peut aider à connaître le système, à comprendre ses limites et à combattre les idées préconçues, comme l'a souligné un participant. Un participant insiste sur le fait que la campagne d'information devrait être répétée.

3.4.3 Autorités en charge de l'information des piétons. Les participants à l'étude préféreraient que les assurances (37 sur 39) communiquent sur les conditions d'assurance lorsque les VEA seront impliqués dans un accident. En ce qui concerne la loi, l'information devrait être fournie par l'État (35 sur 39). L'adaptation des infrastructures devrait être expliquée par les collectivités locales (30 sur 39) et l'État (24 sur 39). Les eHMI des VEA doivent être expliquées par les fabricants (24 sur 39), les médias (19 sur 39) et les scientifiques et experts (18 sur 39). Les algorithmes et les comportements programmés des VEA doivent être décrits par les scientifiques et les experts (30 sur 39) et les fabricants (20 sur 39). Les zones et les étapes de déploiement des VEA, ainsi que le calendrier de diffusion, doivent être donnés par l'État (31 sur 39), les collectivités locales (30 sur 39) et les médias (24 sur 39). Mais les problèmes rencontrés lors de la mise en service devraient être communiqués principalement par les autorités locales, par exemple la ville ou la région où la mise en circulation de VEA est planifiée ou réalisée (29 sur 39), puis par l'État et les médias (20 sur 39) et par les scientifiques et les experts (18 sur 39). Les statistiques sur les risques d'accidents avec les VEA devraient être diffusées par les scientifiques et les experts (30 sur 39), l'État (22 sur 39), les médias (20 sur 39) et les collectivités locales (18 sur 39).

3.5 RQ4 : Comment la conception de l'eHMI peut-elle influencer le comportement de traversée ?

Cette section présente les comportements observés et fait état des préférences des participants en termes d'eHMI.

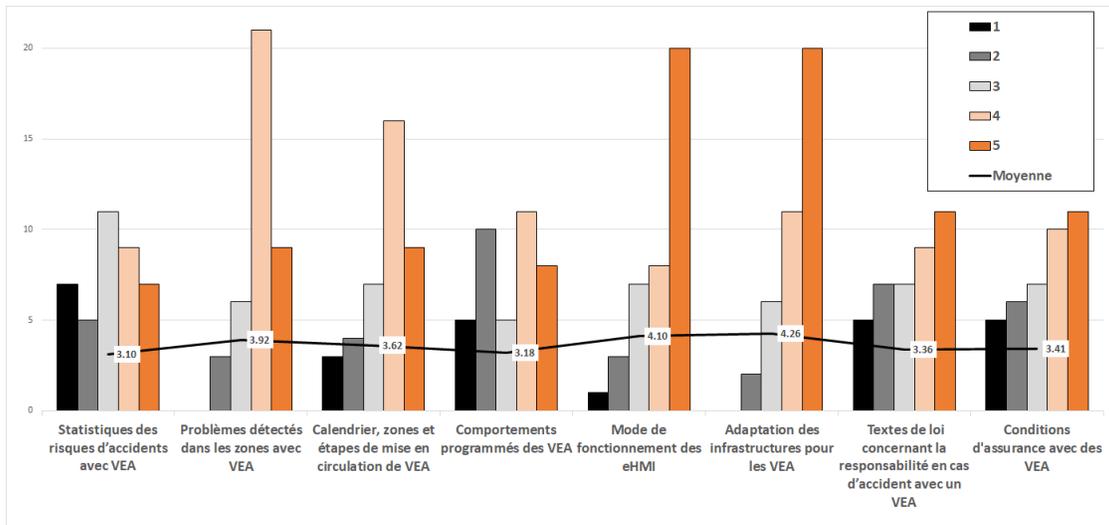


Figure 7: Informations nécessaires pour mieux comprendre le comportement des VEA. Les barres indiquent le nombre de réponses pour chaque valeur et la ligne indique la moyenne (de 1 - Pas du tout d'accord à 5 - Tout à fait d'accord).

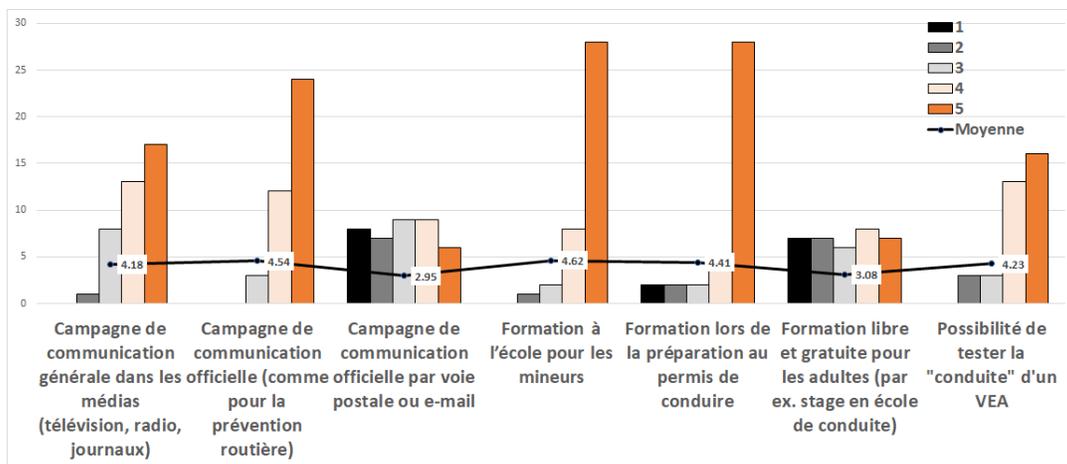


Figure 8: Moyens d'information concernant le comportement des VEA. Les barres indiquent le nombre de réponses pour chaque valeur et la ligne indique la moyenne (de 1 - Pas du tout d'accord à 5 - Tout à fait d'accord).

3.5.1 *Comportement des utilisateurs.* Le comportement des participants a été filmé lors des simulations afin d'observer s'ils traversent, à quel moment (avant l'arrivée du VEA, à son arrêt, une fois le VEA passé) et le temps nécessaire à leur prise de décision. Un questionnaire soumis après chaque simulation a permis également de recueillir leur ressenti. Les résultats sont présentés dans la Table 3 et la Figure 10.

Les résultats montrent que les situations ayant recueillies une meilleure réceptivité ont également obtenu un meilleur score d'expérience utilisateur vis-à-vis de l'eHMI. Ces situations ont aussi été les mieux perçues et présentaient un temps de prise de décision plus court. Plusieurs comportements notables ont pu être observés :

- avancer un pied pour marquer son intention de traverser et s'assurer une meilleure détection par le VEA pour le faire s'arrêter,
- reculer quand le VEA klaxonne,
- quand le VEA ne s'arrête pas:
 - le suivre du regard jusqu'à ce qu'il disparaisse de la simulation et ensuite se recentrer sur sa traverser soit en regardant des deux côtés avant de traverser, soit en abandonnant la simulation,
 - avoir un mouvement de recul et abandonner la simulation,
 - traverser après le passage du VEA sans vérifier si un autre véhicule arrive de l'autre côté.
- quand le VEA ne s'arrête pas et klaxonne avoir un geste d'insulte.

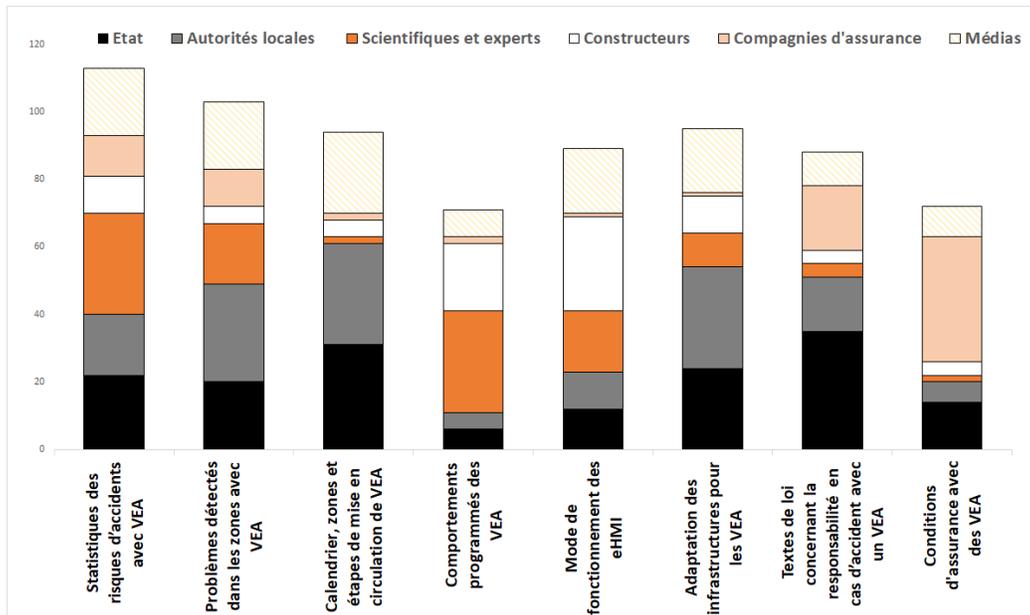


Figure 9: Qui devrait fournir ces informations sur le comportement des VEA d'après les participants à l'étude.

Observation 6 : l'expérience utilisateur d'une eHMI est importante dans la réceptivité d'un VEA.

Observation 7 : une bonne expérience utilisateur de l'eHMI permettrait un temps de prise de décision plus court lors de la traversée d'une route.

La situation la plus appréciée d'après les résultats, est celle où le VEA projette un passage piéton sur la chaussée à l'arrêt du véhicule. Les situations ayant obtenu les moins bons scores (réceptivité, expérience utilisateur, perception de la situation et temps de prise de décision) sont celles où le VEA ne s'est pas arrêté et n'a émis aucun signal d'avertissement. Dans les deux cas (meilleur et moins bon scores), les résultats montrent que la présence ou non d'un passage piéton sur la route ne joue pas un rôle significatif.

Observation 8 : la présence ou l'absence d'un passage piéton sur la route ne joue pas un rôle significatif sur l'évaluation de la situation par les piétons.

3.5.2 Préférences des participants.

Si le VEA s'arrête. S'il n'y a pas de passage piéton matérialisé sur la chaussée, lorsque le VEA s'arrête, les participants préfèrent que le VEA projette au moins un passage piéton sur la route pour indiquer qu'il va les laisser traverser (37 répondants sur 39, voir Figure 11a). Mais 3 répondants souhaiteraient que le passage piéton projeté soit complété par un retour visuel (par exemple, un message écrit, des LED sur le VEA ou un appel de phares) ou sonore. Un répondant a déclaré que le VEA ne devrait projeter que si le piéton est très proche. Deux répondants préfèrent que le VEA ne s'arrête pas pour respecter le code de la route et un autre précise qu'il préfère un signal sonore pour l'empêcher de traverser. Trois répondants préfèrent que le VEA n'émette aucun signal.

Lorsqu'un passage piéton est matérialisé sur la chaussée, et que le VEA s'arrête, 32 participants (sur 39) préféreraient que

le VEA projette au moins un signal sur la route, voir Figure 11b. 2 d'entre eux préféreraient un autre signal qu'un passage piéton (par exemple un piéton vert). 4 répondants souhaiteraient que la projection soit accompagnée d'un autre signal comme un son ou quelque chose de visuel sur le VEA, notamment pour indiquer avant l'arrêt qu'ils ont été détectés par le VEA. 5 répondants préféreraient que le VEA n'émette aucun signal. Et 2 répondants préféreraient que le VEA donne un autre signal que la projection sur la route, comme un signal sonore ou visuel sur le VEA.

Observation 9 : Lorsqu'un VEA s'arrête pour laisser passer un piéton, il est préférable d'envoyer un signal indiquant que le VEA attendra le passage du piéton. La projection sur la route est bien acceptée peu importe si un passage piéton est matérialisé ou non sur la route.

Si le VEA ne s'arrête pas. Il y a plusieurs raisons pour lesquelles un VEA ne s'arrête pas, même s'il a détecté un piéton avec l'intention de traverser la route. Cela peut être parce que le VEA détecte le piéton trop tard pour s'arrêter, par exemple si le piéton a été masqué par un élément du paysage notamment du matériel urbain, un véhicule à l'arrêt, un arbre, etc., ou la décision de ne pas s'arrêter pourrait être définie dans l'algorithme parce qu'un arrêt pourrait causer plus de dommages à plus de personnes (plus de passagers dans le VEA, possibilité de provoquer un accident impliquant plusieurs véhicules, etc.).

S'il n'y a **pas de passage piéton matérialisé sur la chaussée**, lorsque le VEA ne s'arrête pas, les participants préfèrent que le VEA n'émette pas de signal (26, N=39, voir Figure 11c). Cela peut s'expliquer par le fait que, si aucun passage piéton n'est peint sur la route, les piétons s'attendent à ce que le VEA ne s'arrête pas, conformément au code de la route. Comme ils ne s'attendent pas à ce que le VEA s'arrête, il n'est pas nécessaire d'émettre un signal.

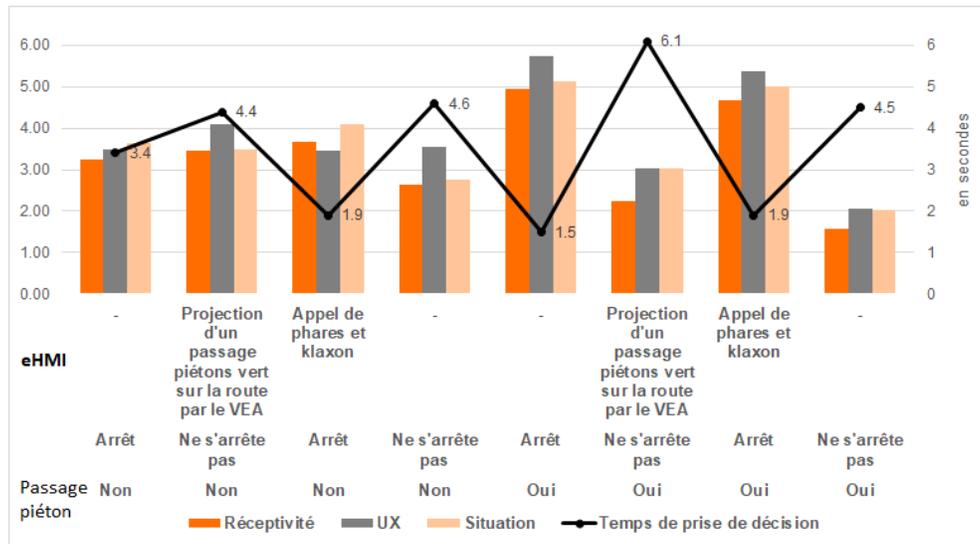


Figure 10: Vue synthétique du comportement et du ressenti des participants.

Table 3: Perception par les participants des différentes simulations et temps de prise de décision observé.

Passage piéton matérialisé sur la chaussée	Comportement du VEA	eHMI	Réceptivité (1)	Expérience utilisateur (2)	Perception de la situation (3)	Temps de prise de décision (4)
Oui	Arrêt	Projection d'un passage piéton vert sur la route par le VEA	4.67	5.36	5	1.9
Oui	Arrêt	-	3.68	3.45	4.11	1.9
Oui	Pas d'arrêt	Appel de phares et klaxon	2.65	3.55	2.75	4.6
Oui	Pas d'arrêt	-	1.58	2.07	2.03	4.5
Non	Arrêt	Projection d'un passage piéton vert sur la route par le VEA	4.95	5.73	5.14	1.5
Non	Arrêt	-	3.25	3.5	3.65	3.4
Non	Pas d'arrêt	Appel de phares et klaxon	3.47	4.11	3.5	4.4
Non	Pas d'arrêt	-	2.25	3.03	3.04	6.1

(1) Réceptivité des VEA, (2) Expérience utilisateur de l'eHMI calculée selon les réponses au questionnaire meCUE, (3) Perception de la situation et réceptivité de l'eHMI calculée selon les réponses au questionnaire PRQF, (4) Temps en seconde entre l'arrêt du VEA et le moment où le piéton commence à traverser ou bien entre le moment où le VEA franchit le milieu de la scène et le moment où le piéton commence à traverser.

14 répondants préféreraient que le VEA fasse un appel de phares et klaxonne. Mais le klaxon est jugé agressif (1) et pourrait être remplacé par un autre son (1) ou simplement supprimé (1). Certains répondants insistent sur le fait qu'un signal comme un appel de phares et surtout le klaxon ne devrait être utilisé que dans des situations critiques (2), par exemple lorsque le piéton ne voit pas le VEA ou est vraiment trop près du VEA pour qu'il puisse s'arrêter. Un répondant préférerait la projection sur la route d'un passage piéton rouge (1). Trois autres répondants souhaiteraient que le VEA soit équipé d'un signal LED rouge (3), éventuellement en plus des phares et du klaxon (1).

Si un passage piéton est matérialisé sur la route, lorsque le VEA ne s'arrête pas, 23 participants (sur 39) préfèrent que le VEA fasse un appel de phare et klaxonne, voir Figure 11d. Mais 11 répondants préfèrent que le VEA n'émette pas de signal, cette réponse est souvent une réaction au fait que le klaxon est jugé trop agressif et générateur de nuisances sonores. 1 répondant indique

que seul le klaxon devrait être utilisé, l'appel de phares pouvant être interprété comme le fait que le VEA cède le passage. Pour un autre participant, la diminution de la vitesse et les phares devraient être utilisés. 2 répondants ont mentionné qu'un signal LED rouge devrait être utilisé éventuellement en plus des phares et/ou du klaxon. Enfin, un répondant préférerait la projection d'un passage piéton rouge sur la route par le VEA.

Observation 10 : il est préférable d'indiquer que le VEA ne s'arrêtera pas quand il détecte un piéton souhaitant traverser.

Observation 11 : lorsqu'il n'y a pas de passage piéton, les piétons s'attendent généralement à ce que le VEA ne s'arrête pas. Aucun signal ne semble nécessaire dans ce cas. Ou un signal discret sans klaxon peut être utilisé comme un feu rouge sur le VEA ou projeté sur la route.

Observation 12 : s'il y a un passage piéton, les piétons s'attendent à ce que le VEA s'arrête. Ainsi, si pour une raison quelconque le VEA n'est pas en mesure de s'arrêter, un signal est

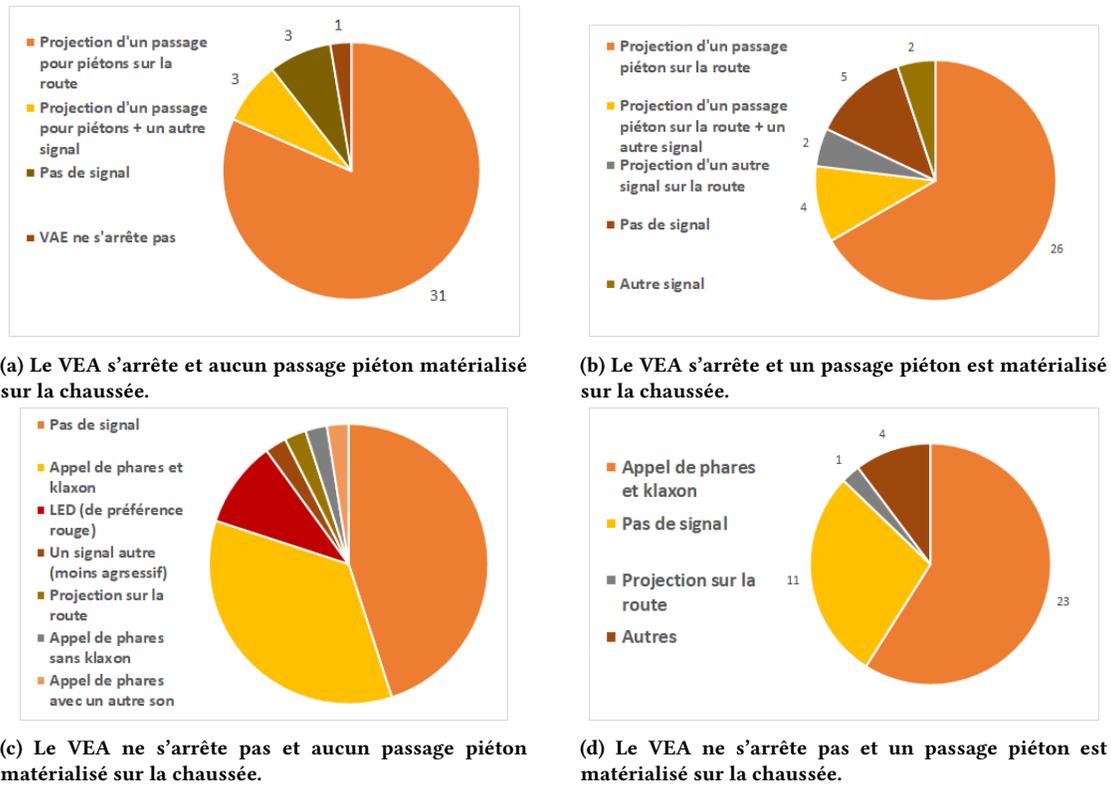


Figure 11: Signaux préférés par les participants (N=39) en fonction des différentes situations : avec ou sans passage piéton, le VEA s'arrête ou non.

attendu. Le klaxon n'est pas bien accepté car il est jugé trop agressif et lors des discussions, la majorité des participants est contre l'utilisation d'un signal sonore.

Identification des VEA. Une bande de LEDs bleu été simulée sur la voiture pour indiquer qu'il s'agit d'un VEA. Nous avons testé les couleurs bleu foncé et turquoise. Mais la majorité des participants ne l'ont pas vue ou l'ont associée au fait que la voiture est électrique ou à un « tuning » de la voiture. Mais certains participants ont demandé qu'il y ait une indication qu'une voiture est un VEA, surtout quand des voitures normales et des VEA circulent en même temps sur les routes. Certains participants demandent que le VEA ait une couleur spécifique comme pour les taxis, ou un message écrit indiquant qu'il s'agit d'un VEA ou que le mode automatique est activé, comme sur certains taxis pour indiquer qu'il est libre ou non.

Observation 13 : le VEA doit être facilement identifiable dans le trafic. Surtout dans un parc automobile mixte.

4 CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Dans cette expérimentation, nous avons dégagé un certain nombre treize observations relatives aux comportements des piétons face à un VEA. En résumé, l'interaction entre un piéton et un VEA se

décompose en plusieurs étapes, qui peuvent être résumées comme suit, voir Figure 12 :

- (1) Le VEA roule sur sa voie. Elle n'a pas détecté d'obstacle.
- (2) Le VEA détecte un piéton qui a l'intention de traverser la route.
- (3) Le VEA décélère jusqu'à la hauteur du piéton.
- (4) Le VEA s'arrête.
- (5) Le VEA laisse passer le piéton.
- (6) Le VEA redémarre après le passage du piéton (figure XX).

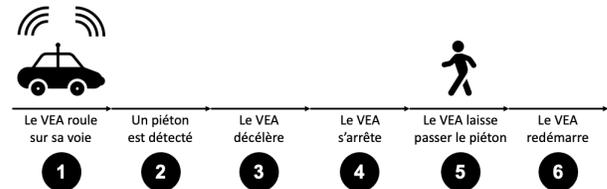


Figure 12: Principales étapes qui décomposent l'interaction entre le VEA et le piéton.

Pour certaines de ces six étapes principales, le VEA doit informer le piéton de son comportement :

- Le VEA doit émettre un signal lorsqu'un piéton est détecté (étape 2).

- Le VEA doit indiquer clairement au piéton qu'il le laisse passer et qu'il ne redémarrera pas avant qu'il ait traversé (étape 5).

En outre, le VEA devrait informer le piéton s'il n'est pas en mesure de s'arrêter, soit parce qu'il a détecté le piéton trop tard, soit pour des raisons techniques. Enfin, le piéton devrait être en mesure d'identifier clairement qu'il interagit avec un VEA de niveau 5 (sans conducteur), afin de lui permettre d'adapter son comportement. Pour ce faire, nous avons essayé l'ajout d'une bande de LED bleu foncé ou turquoise comme recommandé par Faas et Baumann [40]. Cependant les participant n'ont pas compris ce signal. Il faudra alors trouver un autre moyen de donner cette information aux usagers de la route, surtout tant que le parc automobile sera mixte, c'est-à-dire comprendra des VEA et des véhicules avec conducteur.

L'expérimentation présentée devrait être répliquée pour tester d'autres modalités, notamment des eHMI incluant des LED et du texte, d'autres environnements (péri-urbains et campagne), d'autres profils de piétons, par exemple des personnes présentant des handicaps, des enfants et des personnes plus âgées, et évaluer également si les résultats diffèrent en fonction de la présence ou non d'autres piétons et d'autres véhicules y compris des voitures non automatisées.

Comme nous l'avons souligné dans l'observation 1, il serait intéressant de discriminer les résultats selon les critères de nationalité, pays de résidence et enfants de moins de 10 ans à charge pour vérifier s'ils influencent également les comportements et les réponses aux questionnaires.

Pour pouvoir faire confiance à une machine telle qu'un VEA il faut pouvoir anticiper ses réactions, comprendre son fonctionnement et pouvoir vérifier qu'elle a détecté un piéton sur le point de traverser. Pour cela, le plus simple est de partager un cadre de référence commun. Dans le cas de l'interaction piétons/VEA le cadre de référence commun est le code de la route. Donc les piétons s'attendent à ce que le code de la route soit appliqué strictement. Ainsi la présence d'un passage piéton donne la priorité au piéton et l'absence de passage piéton donne la priorité au véhicule. Ainsi les piétons semblent privilégier la prédictivité du comportement à la praticité de pouvoir traverser à tout moment. Dans ce cas, qu'en est-il de l'internationalisation ? Est-ce que le VEA doit adapter son comportement au code de la route en vigueur à chaque fois qu'il traverse une frontière ? Cela peut être perturbant pour les passagers et pour les habitants de zones frontalières. Peut-être que l'arrivée des VEA va obliger une certaine harmonisation des codes de la route nationaux.

Enfin ce qui semble inquiéter les participants à cette étude est le fait la conception des eHMI et le choix du comportement des VEA soit soumis aux constructeurs sans régulation et homogénéisation avec le risque que l'esthétique l'emporte sur l'utilité et la compréhensibilité.

REMERCIEMENTS

Cette publication s'inscrit dans le cadre du projet européen PAsCAL (Enhance driver behaviour and Public Acceptance of Connected and Autonomous vehiCles), qui a reçu le financement de l'Union Européenne dans le cadre du programme Horizon 2020 pour la recherche et l'innovation, sous l'accord no 815098.

REFERENCES

- [1] Claudia Ackermann, Matthias Beggiato, Sarah Schubert, and Josef F Krems. 2019. An experimental study to investigate design and assessment criteria: What is important for communication between pedestrians and automated vehicles? *Applied ergonomics* 75 (2019), 272–282.
- [2] Ali Als Salman, Lateef N Assi, Shabnam Ghotbi, SeyedAli Ghahari, and Ali Shubbar. 2021. Users, planners, and governments perspectives: A public survey on autonomous vehicles future advancements. *Transportation Engineering* 3 (2021), 100044.
- [3] Saeed Asadi Bagloee, Madjid Tavana, Mohsen Asadi, and Tracey Oliver. 2016. Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies. *Journal of modern transportation* 24, 4 (2016), 284–303.
- [4] Francesco Bella and Manuel Silvestri. 2015. Effects of safety measures on driver's speed behavior at pedestrian crossings. *Accident Analysis & Prevention* 83 (2015), 111–124.
- [5] David Bissell, Thomas Birtchnell, Anthony Elliott, and Eric L Hsu. 2020. Autonomous automobiles: The social impacts of driverless vehicles. *Current Sociology* 68, 1 (2020), 116–134.
- [6] Eric Béziat. 2021 [Online]. La pénurie historique de puces électroniques devient une crise industrielle pour le secteur automobile. https://www.lemonde.fr/economie/article/2021/09/01/automobile-la-penurie-de-puces-tourne-a-la-crise-industrielle_6093003_3234.html.
- [7] Viola Cavallo, Aurélie Dommès, Nguyen-Thong Dang, and Fabrice Vienne. 2019. A street-crossing simulator for studying and training pedestrians. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour* 61 (2019), 217–228.
- [8] AG Daimler. 2017. Autonomous concept car smart vision EQ fortwo: welcome to the future of car sharing-Daimler global media site.
- [9] Fred D Davis, Richard P Bagozzi, and Paul R Warshaw. 1989. User acceptance of computer technology: A comparison of two theoretical models. *Management science* 35, 8 (1989), 982–1003.
- [10] Shuchisnigdha Deb, Lesley Strawderman, Daniel W Carruth, Janice DuBien, Brian Smith, and Teena M Garrison. 2017. Development and validation of a questionnaire to assess pedestrian receptivity toward fully autonomous vehicles. *Transportation research part C: emerging technologies* 84 (2017), 178–195.
- [11] Shuchisnigdha Deb, Lesley Strawderman, Janice DuBien, Brian Smith, Daniel W Carruth, and Teena M Garrison. 2017. Evaluating pedestrian behavior at crosswalks: Validation of a pedestrian behavior questionnaire for the US population. *Accident Analysis & Prevention* 106 (2017), 191–201.
- [12] Debargha Dey, Azra Habibovic, Andreas Löcken, Philipp Wintersberger, Bastian Pflöging, Andreas Riener, Marieke Martens, and Jacques Terken. 2020. Taming the eHMI jungle: A classification taxonomy to guide, compare, and assess the design principles of automated vehicles' external human-machine interfaces. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* 7 (2020), 100174.
- [13] Debargha Dey, Marieke Martens, Chao Wang, Felix Ros, and Jacques Terken. 2018. Interface concepts for intent communication from autonomous vehicles to vulnerable road users. In *Adjunct proceedings of the 10th international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications*. Association for Computing Machinery, New York, NY, United States, 82–86.
- [14] Dennis R Dixon, Christopher J Miyake, Karen Nohelty, Marlena N Novack, and Doreen Granpeesheh. 2020. Evaluation of an immersive virtual reality safety training used to teach pedestrian skills to children with autism spectrum disorder. *Behavior Analysis in Practice* 13, 3 (2020), 631–640.
- [15] Alexey Dosovitskiy, German Ros, Felipe Codevilla, Antonio Lopez, and Vladlen Koltun. 2017. CARLA: An Open Urban Driving Simulator. In *Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning*, Neil Lawrence (Ed.), Vol. 78. PMLR, 1–16.
- [16] Roja Ezzati Amini, Christos Katrakazas, and Constantinos Antoniou. 2019. Negotiation and decision-making for a pedestrian roadway crossing: A literature review. *Sustainability* 11, 23 (2019), 6713.
- [17] Jeffery B Greenblatt and Samveg Saxena. 2015. Autonomous taxis could greatly reduce greenhouse-gas emissions of US light-duty vehicles. *Nature climate change* 5, 9 (2015), 860–863.
- [18] Charlie Hewitt, Ioannis Politis, Theocharis Amanatidis, and Advait Sarkar. 2019. Assessing public perception of self-driving cars: The autonomous vehicle acceptance model. In *Proceedings of the 24th international conference on intelligent user interfaces*. Association for Computing Machinery, New York, NY, United States, 518–527.
- [19] Hsiao-Hui Hsu. 2012. The acceptance of Moodle: An empirical study based on UTAUT. *Creative Education* 3 (2012), 44.
- [20] Marianna Imprialou and Mohammed Quddus. 2019. Crash data quality for road safety research: current state and future directions. *Accident Analysis & Prevention* 130 (2019), 84–90.
- [21] Jaguar. 2018 [Online]. Jaguar Land Rover's virtual eyes look at trust in self-driving cars. <https://media.jaguarlandrover.com/news/2018/08/jaguar-landrovers-virtual-eyes-look-trust-self-driving-cars>.

- [22] Erick C Jones and Benjamin D Leibowicz. 2019. Contributions of shared autonomous vehicles to climate change mitigation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 72 (2019), 279–298.
- [23] JSTOR (Ed.). 2003. User acceptance of information technology: Toward a unified view. *MIS quarterly* 27, 3 (2003), 425–478 pages.
- [24] Yee Mun Lee, Ruth Madigan, Oscar Giles, Laura Garach-Morcillo, Gustav Markkula, Charles Fox, Fanta Camara, Markus Rothmueller, Signe Alexandra Vendelbo-Larsen, Pernille Holm Rasmussen, et al. 2021. Road users rarely use explicit communication when interacting in today's traffic: implications for automated vehicles. *Cognition, Technology & Work* 23 (2021), 367–380.
- [25] Hailong Liu, Takatsugu Hirayama, and Masaya Watanabe. 2021. Importance of Instruction for Pedestrian-Automated Driving Vehicle Interaction with an External Human Machine Interface—Effects on Pedestrians' Situation Awareness, Trust, Perceived Risks and Decision Making. In *The 32nd IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2021)*. IEEE, 748–754.
- [26] Yung-Ching Liu and Ying-Chan Tung. 2014. Risk analysis of pedestrians' road-crossing decisions: Effects of age, time gap, time of day, and vehicle speed. *Safety science* 63 (2014), 77–82.
- [27] Qiong Lu, Tamás Tettamanti, Dániel Hörcher, and István Varga. 2020. The impact of autonomous vehicles on urban traffic network capacity: an experimental analysis by microscopic traffic simulation. *Transportation Letters* 12, 8 (2020), 540–549.
- [28] Joan McComas, Morag MacKay, and Jayne Pivik. 2002. Effectiveness of virtual reality for teaching pedestrian safety. *CyberPsychology & Behavior* 5, 3 (2002), 185–190.
- [29] David Metz. 2018. Developing policy for urban autonomous vehicles: Impact on congestion. *Urban Science* 2, 2 (2018), 33.
- [30] Simon Minelli, Pedram Izadpanah, and Saiedeh Razavi. 2015. Evaluation of connected vehicle impact on mobility and mode choice. *Journal of traffic and transportation engineering (English edition)* 2, 5 (2015), 301–312.
- [31] Michael Minge, Manfred Thüring, and Ingmar Wagner. 2016. Developing and validating an English version of the meCUE questionnaire for measuring user experience. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, SAGE Publications (Ed.), Vol. 60. 2063–2067.
- [32] Jurgen Nieuwenhuijsen, Gonçalo Homem de Almeida Correia, Dimitris Milakis, Bart van Arem, and Els van Daalen. 2018. Towards a quantitative method to analyze the long-term innovation diffusion of automated vehicles technology using system dynamics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 86 (2018), 300–327.
- [33] Society of Automotive Engineers [SAE International]. 2019. Automated Driving System (ADS) Marker Lamp (J3134). <https://www.sae.org/standards/content/j3134>.
- [34] Marco Pavone. 2015. Autonomous mobility-on-demand systems for future urban mobility. In *Autonomes Fahren*. Springer, 399–416.
- [35] Simone Pettigrew. 2017. Why public health should embrace the autonomous car. *Australian and New Zealand journal of public health* 41 (2017), 1–3.
- [36] Simone Pettigrew and Sophie L Cronin. 2019. Stakeholder views on the social issues relating to the introduction of autonomous vehicles. *Transport policy* 81 (2019), 64–67.
- [37] Simone Pettigrew, Zenobia Talati, and Richard Norman. 2018. The health benefits of autonomous vehicles: public awareness and receptivity in Australia. *Australian and New Zealand journal of public health* 42, 5 (2018), 480–483.
- [38] Amir Rasouli and John K Tsotsos. 2019. Autonomous vehicles that interact with pedestrians: A survey of theory and practice. *IEEE transactions on intelligent transportation systems* 21, 3 (2019), 900–918.
- [39] Zeheng Ren, Xiaobei Jiang, and Wuhong Wang. 2016. Analysis of the influence of pedestrians' eye contact on drivers' comfort boundary during the crossing conflict. *Procedia engineering* 137 (2016), 399–406.
- [40] SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA 2019. *Light-based external human machine interface: Color evaluation for self-driving vehicle and pedestrian interaction*. Vol. 63. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA.
- [41] Julio A Sanguesa, Vicente Torres-Sanz, Piedad Garrido, Francisco J Martinez, and Johann M Marquez-Barja. 2021. A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities* 4, 1 (2021), 372–404.
- [42] Nirajan Shiwakoti, Peter Stasinopoulos, and Francesco Fedele. 2020. Investigating the state of connected and autonomous vehicles: a literature Review. *Transportation Research Procedia* 48 (2020), 870–882.
- [43] Matus Sucha, Daniel Dostal, and Ralf Risser. 2017. Pedestrian-driver communication and decision strategies at marked crossings. *Accident Analysis & Prevention* 102 (2017), 41–50.
- [44] Nikolas Thomopoulos and Moshe Givoni. 2015. The autonomous car—a blessing or a curse for the future of low carbon mobility? An exploration of likely vs. desirable outcomes. *European Journal of Futures Research* 3, 1 (2015), 1–14.
- [45] Ran Tu, Lama Alfaseeh, Shadi Djavadian, Bilal Farooq, and Marianne Hatzopoulou. 2019. Quantifying the impacts of dynamic control in connected and automated vehicles on greenhouse gas emissions and urban NO2 concentrations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 73 (2019), 142–151.
- [46] Andras Varhelyi. 1998. Drivers' speed behaviour at a zebra crossing: a case study. *Accident Analysis & Prevention* 30, 6 (1998), 731–743.
- [47] Viswanath Venkatesh and Fred D Davis. 2000. A theoretical extension of the technology acceptance model: Four longitudinal field studies. *Management science* 46, 2 (2000), 186–204.
- [48] Raphaël Zanellato and Benoît Gombault. 2019. *Étude de la durabilité de la voiture autonome*. Master's thesis. Ecole polytechnique de Louvain, Université catholique de Louvain.