



56^{ème} CONGRÈS SELF
6 - 8 juillet 2022

**VULNÉRABILITÉS ET
RISQUES ÉMERGENTS**

penser et agir ensemble pour
transformer durablement

EBSCOhost

*The full text of SELF congresses
proceedings in Ergonomics Abstracts is
included in Academic Search Ultimate on
EBSCOhost™*

www.ergonomie-self.org

→ Ergonomics abstract

Comment les piétons interagissent-ils avec les véhicules sans conducteur ?

Guillaume GRONIER, Lou SCHWARTZ, Johannes HERMEN

Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST)

5 av. des Hauts Fourneaux

L-4362 Esch-sur-Alzette (Luxembourg)

guillaume.gronier@list.lu

Résumé. Cette recherche s'intéresse à la façon dont les véhicules entièrement autonomes (VEA) peuvent interagir avec les piétons qui s'apprêtent à traverser la rue devant eux. Un plan méthodologique en trois étapes a permis de dégager les problématiques liées aux interactions piétons-VEA, et à tester différentes solutions d'interfaces piétons-VEA (external Human-Machine Interfaces : eHMI) dans le cadre d'une simulation. Les résultats montrent que les piétons préfèrent les eHMI qui présentent le moins d'ambiguïté, comme les informations textuelles, et qu'ils attendent un comportement cohérent de la part des VEA en milieu urbain. Ainsi, les VEA ne devraient pas laisser passer un piéton en dehors de passage marqué au sol, et devraient en revanche laisser systématiquement passer un piéton qui fait face à un passage clouté. Cette recherche vise à nourrir les réflexions pour la conception des dispositifs techniques qui habiteront les véhicules de demain. Elle propose également quelques premières recommandations pour une meilleure prise en compte de l'humain dans une démarche centrée utilisateur.

Mots-clés : Véhicules entièrement autonomes ; piétons ; interfaces humain-machine externes ; simulation.

How do pedestrians interact with driverless vehicles?

Abstract. This research focuses on how fully autonomous vehicles (FAVs) can interact with pedestrians who are about to cross the street in front of them. A three-stage methodological plan was used to identify the issues related to pedestrian-VEA interactions, and to test different pedestrian-FAV interface (external Human-Machine Interfaces: eHMI) solutions in a simulation. The results show that pedestrians prefer eHMIs with the least ambiguity, such as textual information, and that they expect consistent behaviour from FAVs in urban environments. For example, FAVs should not let a pedestrian pass outside a marked crosswalk but should systematically let a pedestrian pass when facing a crosswalk. This research aims to provide food for thought for the design of the technical devices that will inhabit the vehicles of tomorrow. It also proposes some first recommendations for a better consideration of the human element in a user-centred approach.

Keywords: Fully autonomous vehicles; pedestrians; external human-machine interfaces; simulation.

*Ce texte original a été produit dans le cadre du congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française qui s'est tenu à Genève les 6, 7 et 8 juillet 2022. Il est permis d'en faire une copie papier ou digitale pour un usage pédagogique ou universitaire, en citant la source exacte du document, qui est la suivante :

Gronier, G., Schwartz, L. & Hermen, J. (2022). Comment les piétons interagissent-ils avec les véhicules sans conducteur ? . Actes du 56ème Congrès de la SELF, Vulnérabilités et risques émergents : penser et agir ensemble pour transformer durablement. Genève, 6 au 8 juillet 2022.

Aucun usage commercial ne peut en être fait sans l'accord des éditeurs ou archiveurs électroniques. Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page.

INTRODUCTION

Les développements technologiques pour rendre les véhicules entièrement autonomes (VEA) sont en pleine expansion. 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 (Alsalman, Assi, Ghotbi, Ghahari, & Shubbar, 2021).

Les VEA soulèvent néanmoins de nombreux défis, notamment en matière d'ergonomie (Gronier et al., 2019). Parmi ceux-ci, la question des interactions piétons-VEA est au cœur des préoccupations de conception : comment fournir aux piétons une information suffisamment pertinente pour leur indiquer qu'ils peuvent traverser une rue en toute sécurité face à un véhicule sans conducteur ?

Cette communication propose un ensemble de 3 études qui ont servi à mieux comprendre les problématiques liées aux interactions piétons-VEA, et à tester différentes solutions d'interfaces piétons-VEA.

INTERACTIONS ENTRE PIÉTONS ET VÉHICULES ENTièrement AUTONOMES (VEA)

Comportement des piétons

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. Par expérience, tout piéton sait à quel point les signaux transmis par les automobilistes sont importants dans sa prise de décision de traverser ou non : 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 (Bella & Silvestri, 2015; Liu & Tung, 2014; Várhelyi, 1998).

Hancock (2019) reprend, dans un article sur les problématiques à prévoir lors de l'introduction des véhicules autonomes sur nos routes, une illustration produite par l'administration suédoise des transports (Swedish Transport Administration). Celle-ci décrit, avec un certain humour, le danger perçu par les piétons lorsqu'ils traversent une rue : les passages piétons semblent de frêles passerelles par-dessus le gouffre que représente la chaussée. Il s'agit aussi d'illustrer l'impact physique que pourrait produire un accident entre un véhicule et un piéton : le piéton subirait les mêmes séquences que s'il tombait dans un profond ravin (figure 1).

L'étude de Sucha, Dostal et Risser (2017) a permis de quantifier les comportements des piétons quand ils traversent une rue à un passage clouté sans feu tricolore dans un contexte urbain en République Tchèque. 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 clouté, 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, indiquent que ceux-ci cherchent un échange de regard avec les piétons afin de s'assurer qu'ils les aient bien repérés (Ren, Jiang, & Wang, 2016). Aussi, en absence d'échange de regard, les conducteurs adoptent-ils 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.

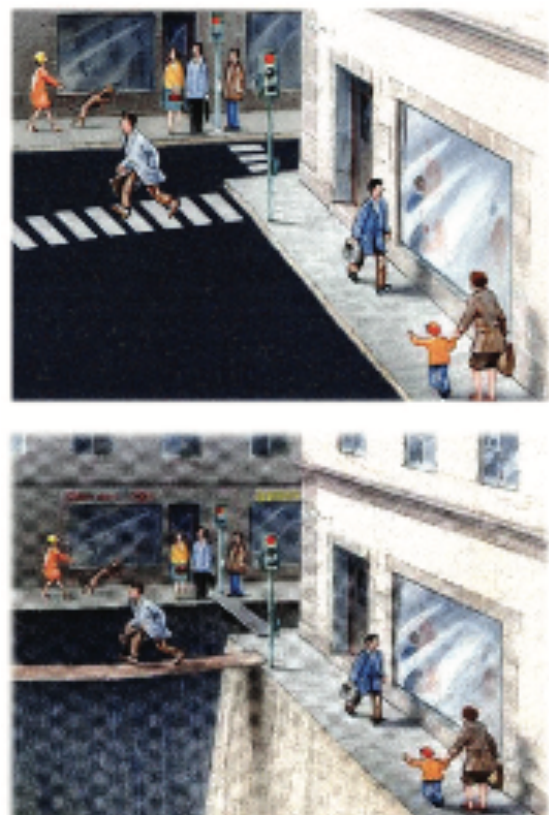


Figure 1. Illustration du danger que représente, pour le piéton, l'action simple de traverser une rue (d'après Hancock, 2019).

Il est enfin intéressant de noter que les piétons n'attendent pas de communication explicite de la part des conducteurs. Lee et al. (2021) 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.

Ces recherches indiquent notamment qu'une interaction piétons-véhicules, explicite ou implicite, s'instaure lorsque le piéton cherche à traverser une route, avec ou sans passage piéton. 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 plus loin dans cet article.

Caractéristiques des VEA

Les véhicules entièrement autonomes (VEA) sont des véhicules dont la conduite est entièrement gérée par un système automatisé, équipés de détecteurs et capables de réagir dans toutes les situations : conduite avec respect du code de la route, gestion du trafic, gestion et évitement des autres véhicules et piétons, manœuvres, etc.

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 décrits dans la 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.

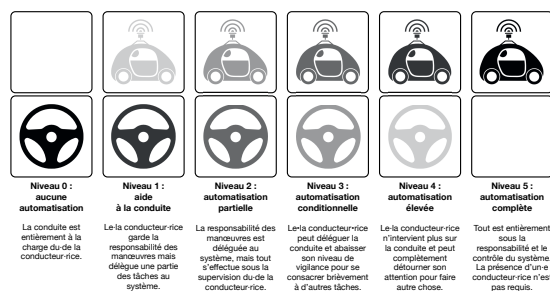


Figure 2. Niveaux d'autonomie des véhicules, selon la classification de la SAE.

Piétons et VEA

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 projettent de s'engager pour traverser une rue.

La problématique d'absence potentielle de conducteur dans les VEA, qui ne permettrait plus les interactions piétons-conducteurs, est prise en compte depuis le milieu des années 2010. Des solutions palliatives sont proposées sous forme d'interfaces humain-machine souvent intégrées sur les éléments externes du véhicule, qui valent à ces solutions l'acronyme eHMI (external Human-Machine Interface) (Bazilinskyy, Dodou, & de Winter, 2019).

28 eHMIs, développées par des constructeurs et des équipementiers automobiles, ou par des centres de recherche, ont été référencées par Bazilinskyy et al. (2019). Il en existe toutefois beaucoup d'autres, comme celles proposées par H. Liu, Hirayama et Watanabe (2021), Dey, Holländer, et al. (2020), Chang, Toda, Sakamoto et Igarashi (2017) ou bien encore de Clercq, Dietrich, Núñez Velasco, de Winter et Happee (2019).

PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE

Dans cette étude, nous avons souhaité d'une part mieux comprendre les problématiques identifiées par les piétons lorsqu'ils auront à traverser une route devant un véhicule sans conducteur, et d'autre part tester en simulation différents comportements de VEA afin d'observer l'impact de ces comportements sur l'attitude des piétons. L'attitude doit ici être comprise comme l'intention exprimée par les piétons de traverser la rue devant le véhicule.

Ainsi, nous avons mené une étude en trois étapes que nous décrivons dans les sections suivantes (figure 3).

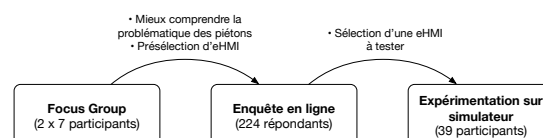


Figure 3. Résumé de notre méthodologie de recherche en 3 étapes.

Etape 1 : focus group

Deux focus groups ont été organisés auprès de deux groupes de sept personnes chacun (soit 14 participants au total, répartis dans deux groupes de taille équivalente). Lors du premier focus group, la méthode du Value Proposition Canvas (<https://www.strategyzer.com/canvas/value-proposition-canvas>) a été utilisée afin d'identifier les principales activités des piétons lorsqu'ils traversent une route, les difficultés rencontrées, et les éléments favorables à la réalisation de cette activité (figure 4).

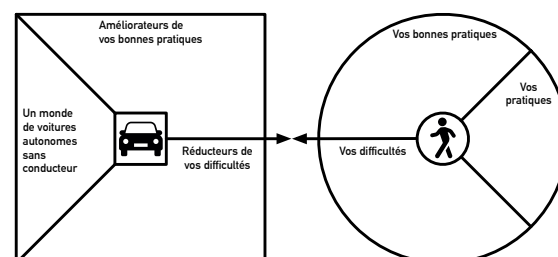


Figure 4. La méthode du Value Proposition Canvas adaptée pour recueillir l'avis des piétons lorsqu'ils traversent une rue.

Le deuxième focus group portait sur les interactions entre les VEA et les piétons. Les participants ont été invités à imaginer que, demain, des véhicules autonomes circulerait dans leur ville, et à évaluer les principaux avantages et risques auxquels ils pouvaient s'attendre.

Etape 2 : enquête par questionnaire

Une enquête par questionnaire a été élaborée afin de connaître les habitudes des piétons et leur perception vis-à-vis de 21 Interfaces Humain-Machine externes (eHMI). Les interfaces ont été classées selon 5 principales catégories :

- anthropomorphiques, qui utilisent des éléments de communication de type humain ou anthropomorphique, tels que les expressions faciales (yeux, sourire) ou les gestes ;
- textuelles, qui affichent un texte explicite comme "Stop", "Conduite", "Veuillez traverser", ou toute autre variante qui utilise du texte pour

communiquer l'état du véhicule ou des instructions aux piétons ;

- iconiques, qui utilisent des symboles de circulation reconnaissables tels que les panneaux d'arrêt, les lignes de passage pour piétons, le symbole du piéton qui marche, les flèches ou d'autres formes de symboles ;
- lumineuses, qui reprennent des formes visuelles abstraites, sujettes à l'interprétation du piéton, ou toute autre forme de dispositifs de communication basés sur la lumière (figure 5) ;
- autres, qui correspondent à tous les autres dispositifs, comme des informations transmises sur le smartphone du piéton, ou une modification de l'infrastructure à l'approche d'un VEA.

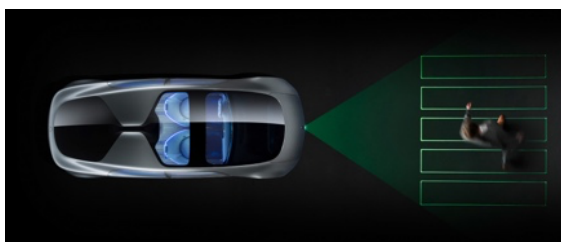


Figure 5. Exemple d'eHMI lumineuse. Ici, le VEA projette devant lui un passage piéton afin de signifier au piéton qu'il peut traverser (d'après Mercedes Benz, 2015).

Ce questionnaire comprenait plusieurs sections afin de recueillir :

- des données sociodémographiques générales (âge, sexe, nationalité, pays de résidence, enfants à charge de moins de 10 ans) ainsi que les habitudes en tant que piéton (mode privilégié de transport, fréquence et temps de marche quotidien, handicap éventuel lié à la marche) ;
- le profil transgressif du participant en tant que piéton (non-respect de la signalisation au moment de traverser une rue, agressivité envers les conducteurs de véhicules, etc.) issu du questionnaire Pedestrian Behavior Questionnaire (PBQ) (Deb, Strawderman, DuBien, et al., 2017) ;
- le profil du participant en tant que piéton vis-à-vis de l'acceptation future probable des VEA, à l'aide du questionnaire Pedestrian receptivity questionnaire for Fully autonomous vehicles (PRQF) (Deb, Strawderman, Carruth, et al., 2017).

Pour chaque eHMI, les participants devaient indiquer :

- leur degré d'acceptation du VEA qui serait équipé de cet eHMI, à l'aide de plusieurs items issus du questionnaire de réceptivité PRQF (Deb, Strawderman, Carruth, et al., 2017) ;
- la qualité de leur expérience en tant que piéton, à l'aide de plusieurs items issus du questionnaire de mesure de l'expérience utilisateur meCUE (Minge, Thüring, & Wagner, 2016). Cela nous a ainsi permis d'évaluer l'utilité perçue, l'attractivité et la facilité de compréhension perçue de chaque eHMI.

Etape 3 : tests sur simulateur

A l'issue de l'enquête sur les eHMI, nous avons sélectionné une interface parmi les plus appréciées par les utilisateurs, afin de la tester en condition de

simulation au sein d'un dispositif immersif. Nous avons ainsi retenu la solution lumineuse proposée par Mercedes Benz, présentée dans la figure 5, qui projette un passage piéton de couleur verte sur la chaussée afin d'indiquer au piéton qu'il peut traverser. D'autres comportements du VEA, et deux infrastructures différentes, ont également été simulés afin d'observer leur impact sur la réaction des piétons :

- le VEA s'arrêtait à l'approche du piéton, ou ne s'arrêtait pas. Dans ce dernier cas, le piéton était placé derrière une palissade de travaux, sur le trottoir, afin d'expliquer que le véhicule autonome n'était pas en mesure de le détecter à temps ;
- lorsque le VEA ne s'arrêtait pas, il pouvait en alerter le piéton en klaxonnant deux fois et en faisant deux appels de phares, ou ne pouvait adopter aucun comportement particulier en passant sans s'arrêter devant le piéton ;
- le piéton était placé dans une rue face à un passage piéton, ou sans passage piéton.

Ainsi, huit conditions expérimentales ont été testées sur simulateur (tableau 1). Chaque condition est codée (C1, C2, etc.) dans le tableau suivant, afin de faciliter la compréhension des résultats présentés plus loin dans cet article.

	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 des 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 des appels de phares
	C4. Le VEA ne projette pas d'eHMI	C8. Le VEA n'alerte pas le piéton

Tableau 1 : description des conditions expérimentales sur simulateur.

39 sujets ont été confrontés à ces 8 conditions, au sein d'une arène de 3,6 mètres de diamètres, entourée de 12 écrans à ultra très haute résolution d'une hauteur de 2,20 mètres. Ce dispositif, appelé Immersive Arena et développé par le Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST), a l'avantage de pouvoir placer un ou plusieurs individus en interaction avec un environnement simulé et contrôlé. Dans notre cas, les écrans projetaient un environnement urbain, dans lequel les sujets étaient placés sur un trottoir, face à une rue sur laquelle circulait un véhicule autonome. Les sujets étaient alors invités à s'exprimer sur leur intention de traverser ou non la rue affichée devant eux, au cours d'un entretien semi-dirigé et d'un questionnaire post-scénario (figure 6). L'entretien était structuré autour de plusieurs questions, comme par exemple « Dans la vraie vie, traverseriez-vous devant un véhicule autonome qui adopterait ce comportement ? » ou « Les informations transmises par le véhicule autonome vous ont-elles permis d'anticiper son comportement ? ». Le questionnaire post-scénario

portait notamment sur la compréhension de l'eHMI, son attractivité et son utilité perçue.



Figure 6. Illustration de l'Immersive Arena où le sujet est face à un passage piéton, devant lequel un VEA s'est arrêté.

PRINCIPAUX RÉSULTATS

De nombreux résultats sont issus de ces trois études complémentaires. Nous proposons d'exposer dans cette partie les résultats les plus saillants.

Préférences des piétons vis-à-vis des eHMI

Les focus groups et l'enquête par questionnaire sur les eHMI nous ont permis de dégager les interfaces externes préférées par les piétons. Notons que l'enquête a reçu 224 réponses.

Les résultats des scores de réceptivité et d'expérience utilisateur (UX) par catégorie d'interface montrent que les interfaces textuelles obtiennent en moyenne les meilleurs résultats pour ces deux critères. En général, les utilisateurs indiquent que les informations textuelles sont claires et sans ambiguïté. Certains problèmes ont toutefois été soulevés, comme la langue utilisée pour le texte, ou la lisibilité des informations en fonction de leur emplacement sur le véhicule. Un affichage sur le pare-brise est considéré comme difficile à voir pour les personnes en fauteuil roulant, les enfants ou les personnes de petite taille. À l'inverse, une information sur la calandre du véhicule est considérée comme trop basse pour la plupart des piétons. Malgré ces contre-indications, le texte reste le moyen jugé le plus clair et sans ambiguïté pour informer les piétons de l'intention et du comportement du VEA.

La catégorie dont le score de réceptivité est le plus faible est celle des interfaces iconiques. Les VEA équipés de ces eHMI sont en effet considérés comme moins fiables que les VEA équipés d'autres eHMI, les icônes étant perçues comme trop soumises à interprétation. Les interfaces lumineuses obtiennent les scores les plus faibles en termes d'expérience utilisateur. La plupart des interfaces de cette catégorie sont en effet considérées comme peu intuitives et doivent être expliquées aux utilisateurs. Cela va donc à l'encontre de ce que l'on attend des eHMI, qui devraient être immédiatement comprises et sans aucune ambiguïté pour les piétons (figure 7).

Il est également intéressant de noter qu'il existe une très forte corrélation entre les scores de réceptivité et d'expérience utilisateur. Le coefficient de corrélation calculé est égal à 0,84. Cela montre que plus l'eHMI est perçue comme étant facile à comprendre et attrayante (qui sont deux des principaux critères d'expérience utilisateur utilisés), plus les VEA qui en sont équipés sont bien acceptés. Ces résultats sont en accord avec les principaux modèles d'acceptation des technologies, tels que le Technology Acceptance

Model (TAM) (Davis, 1989), qui incluent la facilité d'utilisation et l'utilité de la technologie dans leurs facteurs explicatifs.

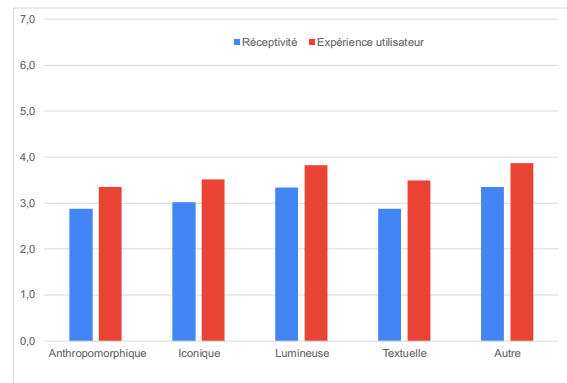


Figure 7. Degrés de réceptivité et d'expérience utilisateur perçus pour chacune des catégories d'eHMI.

Comportements des piétons face à un VEA

Parmi les situations testées dans l'Immersive Arena, la plus appréciée est celle où le VEA projette un passage piéton sur la chaussée lorsque le véhicule s'arrête (C1 et C3). Les deux conditions associées à cette projection sont jugées très sécuritaires par les participants, qui se sentiraient en confiance s'ils devaient traverser devant un VEA équipé de ce type d'eHMI.

Plus précisément, quand il n'y a pas de passage piéton matérialisé sur la chaussée (conditions C3 et C4), 37 participants sur 39 apprécient que le VEA projette un passage piéton plutôt qu'il ne projette rien, même si certains participants ont été surpris et gênés que le VEA s'arrête pour les laisser traverser, alors que selon le code de la route ils n'avaient pas la priorité.

En revanche, lorsqu'un passage piéton est matérialisé sur la chaussée et que le VEA s'arrête (conditions C1 et C2), 32 participants sur 39 trouvent la projection utile. Les autres participants considèrent en effet qu'il est attendu qu'un véhicule autonome s'arrête systématiquement, et sans condition, devant un piéton prêt à s'engager pour traverser. Ainsi, une information sur l'état du véhicule (ici à l'arrêt) est jugée superflue.

Les situations testées lorsque le VEA ne s'arrête pas (conditions C5, C6, C7 et C8) sont sans surprise les plus stressantes pour les piétons. Néanmoins, l'absence de passage piéton (conditions C7 et C8) modère l'avis de certains participants, qui estiment que le véhicule n'a pas à s'arrêter si le piéton n'a pas la priorité, comme nous l'avons relevé ci-avant. En revanche, dans ces conditions, 26 utilisateurs sur 39 préfèrent que le VEA n'émette aucun signal (klaxon et appels de phares), qu'ils jugent pour la plupart trop agressif.

Lorsqu'un passage piéton est matérialisé sur la route et que le véhicule ne s'arrête pas (conditions C5 et C6), la majorité des participants préfèrent à l'inverse que le VEA les avertisse en klaxonnant (23 participants sur 39). Ces deux conditions sont les moins appréciées puisqu'elles mettent les participants face à un véhicule autonome dont le comportement est jugé dangereux, alors que le piéton devrait avoir la priorité. Dès lors, l'avertissement du véhicule par un signal sonore et visuel est considéré comme indispensable.

DISCUSSION ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Cet article vise à présenter les principaux résultats issus d'une étude portant sur l'observation et l'analyse des comportements de piétons face à un véhicule entièrement autonome (VEA). À partir d'une méthodologie en trois étapes, nous avons pu d'une part recueillir l'avis de participants sur le type d'information (interfaces humain-machine externes – eHMI) qu'ils souhaiteraient recevoir de la part d'un véhicule autonome, lorsqu'ils seraient amenés à traverser une rue ; et d'autre part observer la réaction de piétons face à différents comportements d'un VEA dans le cadre d'une simulation. Les résultats ont montré que les piétons préféraient les eHMI qui présentent le moins d'ambiguïté, comme les informations textuelles, et qu'ils attendaient un comportement cohérent de la part des VEA : ceux-ci ne devraient pas laisser passer un piéton en dehors de passage marqué au sol, et devraient en revanche laisser systématiquement passer un piéton qui fait face à un passage clouté.

Ces études nous semblent importantes pour la conception des dispositifs techniques qui habiteront les véhicules de demain. Elles doivent ainsi servir, selon nous, de recommandations pour une meilleure prise en compte de l'humain dans une démarche centrée utilisateur.

Si nous n'avons testé qu'une seule eHMI dans le cadre d'une simulation (la projection d'un passage piéton lorsque le véhicule autonome s'arrête), il serait intéressant de poursuivre ces simulations avec d'autres interfaces, en particulier l'affichage de messages textuels comme « Vous pouvez passer », « Après-vous » ou « En attente que vous traversiez ».

De plus, il semble que plusieurs niveaux d'information soient attendus de la part des piétons, selon les différentes étapes qui marquent l'approche d'un véhicule face à un piéton qui souhaite traverser. En effet, nous pouvons relever 6 étapes :

- Le véhicule roule sur sa voie. Elle n'a pas détecté d'obstacles. Elle est en conduite autonome
- Le véhicule détecte un piéton qui a l'intention de traverser la rue.
- Le véhicule décélère jusqu'à hauteur du piéton.
- Le véhicule s'arrête.
- Le véhicule laisse passer le piéton.
- Le véhicule redémarre après le passage du piéton (figure 8).

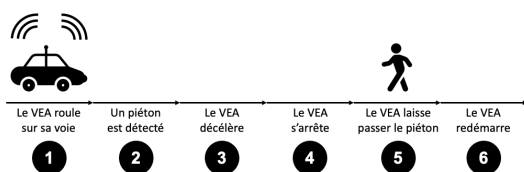


Figure 8. Principales étapes qui décomposent l'interaction entre un VEA et un piéton.

Pour certaines de ces étapes, le VEA devrait informer le piéton de son comportement :

- le VEA devrait émettre un signal lorsqu'un piéton est détecté (étape 2) ;

- le VEA devrait indiquer clairement au piéton qu'il le laisse passer et qu'il ne redémarrera pas tant qu'il n'aura pas 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.

REMERCIEMENTS

Cette communication 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.

BIBLIOGRAPHIE

- Alsaman, A., Assi, L. N., Ghotbi, S., Ghahari, S., & Shubbar, A. (2021). Users, planners, and governments perspectives: A public survey on autonomous vehicles future advancements. *Transportation Engineering*, 3(October 2020), 100044. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100044>
- Bagloee, S. A., Tavana, M., Asadi, M., & Oliver, T. (2016). Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies. *Journal of Modern Transportation*, 24(4), 284–303. <https://doi.org/10.1007/s40534-016-0117-3>
- Bazilinskyy, P., Dodou, D., & de Winter, J. (2019). Survey on eHMI concepts: The effect of text, color, and perspective. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 67, 175–194. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.10.013>
- Bella, F., & Silvestri, M. (2015). Effects of safety measures on driver's speed behavior at pedestrian crossings. *Accident Analysis and Prevention*, 83, 111–124. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.07.016>
- Chang, C.-M., Toda, K., Sakamoto, D., & Igarashi, T. (2017). Eyes on a Car: an Interface Design for Communication between an Autonomous Car and a Pedestrian. In *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '17*. <https://doi.org/10.1145/3122986.3122989>
- Davis, F. D. (1989). Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319. <https://doi.org/10.2307/249008>
- de Clercq, K., Dietrich, A., Núñez Velasco, J. P., de Winter, J., & Happee, R. (2019). External Human-Machine Interfaces on Automated Vehicles: Effects on Pedestrian Crossing Decisions. *Human Factors*, 61(8), 1353–1370. <https://doi.org/10.1177/0018720819836343>
- Deb, S., Strawderman, L., Carruth, D. W., DuBien, J., Smith, B., & Garrison, T. M. (2017). Development and validation of a questionnaire to assess pedestrian receptivity toward fully autonomous vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 84, 178–195.

- <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.08.029>
- Deb, S., Strawderman, L., DuBien, J., Smith, B., Carruth, D. W., & Garrison, T. M. (2017). Evaluating pedestrian behavior at crosswalks: Validation of a pedestrian behavior questionnaire for the U.S. population. *Accident Analysis and Prevention*, 106(January), 191–201. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.05.020>
- Dey, D., Habibovic, A., Löcken, A., Wintersberger, P., Pfleging, B., Riemer, A., ... Terken, J. (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. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100174>
- Dey, D., Holländer, K., Berger, M., Eggen, B., Martens, M., Pfleging, B., & Terken, J. (2020). Distance-Dependent eHMIs for the Interaction between Automated Vehicles and Pedestrians. *Proceedings - 12th International ACM Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, AutomotiveUI 2020*, 192–204. <https://doi.org/10.1145/3409120.3410642>
- Dey, D., & Terken, J. (2017). Pedestrian interaction with vehicles: Roles of explicit and implicit communication. In *AutomotiveUI 2017 - 9th International ACM Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Proceedings* (pp. 109–113). <https://doi.org/10.1145/3122986.3123009>
- Gronier, G., Ferrero, F., Faye, S., Vandenabeele, L., Van Egmond, P., Sagot, J.-C., ... Bert, N. (2019). Véhicules autonomes et connectés: quels nouveaux défis pour l'ergonomie ? In *Actes du 54ème Congrès de la SELF, Université de l'Ergonomie: Comment contribuer à un autre monde ?* Retrieved from http://www.guillaumegronier.com/cv/resource/s/2019_Self_Gronier.pdf
- Hancock, P. A. (2019). Some pitfalls in the promises of automated and autonomous vehicles. *Ergonomics*, 62(4), 479–495. <https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1498136>
- Lee, Y. M., Madigan, R., Giles, O., Garach-Morcillo, L., Markkula, G., Fox, C., ... Merat, N. (2021). Road users rarely use explicit communication when interacting in today's traffic: implications for automated vehicles. *Cognition, Technology and Work*, 23(2), 367–380. <https://doi.org/10.1007/s10111-020-00635-y>
- Liu, H., Hirayama, T., & Watanabe, M. (2021). Importance of Instruction for Pedestrian-Automated Driving Car Interaction with an External Human Machine Interface. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/2102.07958>
- Liu, Y. C., & Tung, Y. C. (2014). Risk analysis of pedestrians' road-crossing decisions: Effects of age, time gap, time of day, and vehicle speed. *Safety Science*, 63, 77–82. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.11.002>
- Mercedes Benz. (2015). The F 015 Luxury in motion. Retrieved August 15, 2021, from <https://www.mercedes-benz.com/en/innovation/autonomous/research-vehicle-f-015-luxury-in-motion/>
- Minge, M., Thüring, M., & Wagner, I. (2016). Developing and validating an English version of the meCUE questionnaire for measuring user experience. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, 60(1), 2063–2067. <https://doi.org/10.1177/1541931213601468>
- Nieuwenhuijsen, J., Correia, G. H. de A., Milakis, D., van Arem, B., & van Daalen, E. (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(May 2017), 300–327. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.11.016>
- Ren, Z., Jiang, X., & Wang, W. (2016). Analysis of the Influence of Pedestrians' eye Contact on Drivers' Comfort Boundary during the Crossing Conflict. *Procedia Engineering*, 137, 399–406. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.274>
- Sucha, M., Dostal, D., & Risser, R. (2017). Pedestrian-driver communication and decision strategies at marked crossings. *Accident Analysis and Prevention*, 102, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.02.018>
- Várhelyi, A. (1998). Drivers' speed behaviour at a zebra crossing: A case study. *Accident Analysis and Prevention*, 30(6), 731–743. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(98\)00026-8](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(98)00026-8)