

Projet AUTOMA-PIED :

Quelles interactions véhicules AUTOMAtisés - PIEtons pour Demain ?

Projet soutenu par la Délégation à la Sécurité Routière

Durée : 22 mois (8 août 2018 – 8 mai 2020)

Rapport final de convention

Date : février 2020

Rédacteurs : Aurélie Dommes (IFSTTAR – LEPSIS), Anne-Hélène Olivier (Université Rennes 2 - M2S), Gaëtan Merlhiot (IFSTTAR – LEPSIS) et Régis Lobjois (IFSTTAR – LEPSIS)

Relectures croisées

Partenaires du projet :

Aurélie Dommes, Viola Cavallo, Régis Lobjois, Nguyen-Thong Dang, Fabrice Vienne, et Gaëtan Merlhiot, IFSTTAR - LEPSIS

Anne-Hélène Olivier, Armel Crétual, et Joris Boulo, Université Rennes 2 - M2S

Rapport 1 : Etat de l'art, objectifs du projet et protocole de recherche, février 2019

Rapport 2 : Premiers résultats de l'étude, octobre 2019

Rapport 3 : rapport final, février 2020

Résumé long

L'objectif principal du projet AUTOMA-PIED est d'étudier les comportements de traversée de rue des piétons face à des véhicules automatisés, en comparaison avec des véhicules traditionnels. Un deuxième objectif est de mettre en lumière des marqueurs posturaux prédictifs de l'intention de traverser la rue. Un troisième objectif est d'effectuer des comparaisons inter-âges entre des piétons jeunes et des piétons plus âgés (>75 ans).

Pour cela, 30 adultes jeunes (M=29.43 ans, 21-39 ans) et 30 personnes âgées (M=75.40 ans, 68-81 ans) ont réalisé une tâche de traversée de rue simulée sur un dispositif autorisant le déplacement réel d'un piéton sur une distance d'environ 8 mètres en interaction avec des véhicules virtuels. En faisant varier le type de véhicule à l'approche et sa présence sur la voie de circulation, les décisions et comportements de traversée sont comparés entre quatre conditions de trafic bidirectionnel : (i) un Véhicule Traditionnel dans chaque voie (condition VT-VT), (ii) un Véhicule Automatisé dans la première voie et un Véhicule Traditionnel dans la seconde voie (condition VA-VT), (iii) un Véhicule Traditionnel dans la première voie et un Véhicule Automatisé dans la seconde voie (condition VT-VA) et (iv) un Véhicule Automatisé dans chaque voie (condition VA-VA). La vitesse d'approche des véhicules était de 30 ou 50 km/h. Le véhicule automatisé était très reconnaissable dans le trafic (de couleur blanche, signalisé par un lidar sur le toit et des autocollants indiquant la qualité automatisée du véhicule). Il était programmé pour toujours s'arrêter et laisser le passage au piéton en attente de traverser sur le trottoir, au contraire des véhicules traditionnels qui approchaient à vitesse constante et ne freinaient pas pour le piéton. Enfin, le gap ou temps inter-véhiculaire (temps disponible pour le piéton pour effectuer sa traversée entre deux véhicules) était également manipulé et variait entre 1 et 5 secondes (par pas de 1 sec) entre (a) des véhicules traditionnels approchant à vitesse constante et (b) entre le piéton et un véhicule automatisé avant que ce dernier enclenche une action de freinage. Au total, les participants étaient exposés à 40 situations différentes, répétées 3 fois chacune (120 essais au total). Des données comportementales, verbales, physiologiques et biomécaniques ont été recueillies.

Les **données comportementales** révèlent cinq constats majeurs :

- Le premier concerne la **survenue de risques dans la condition de trafic où un véhicule automatisé laisse le passage en première voie alors que des véhicules traditionnels approchent en deuxième voie**. Ici, les participants saisissent l'opportunité offerte par le véhicule automatisé en voie proche mais sans suffisamment considérer la voie éloignée. Comparativement aux autres conditions de trafic, on note dans cette condition plus de traversées acceptées, à des intervalles de temps plus courts, menant souvent à des collisions avec les véhicules traditionnels à l'approche en voie éloignée. Ce constat s'observe chez les participants jeunes comme âgés, mais en plus forte proportion chez les âgés, et à vitesse élevée aussi plus particulièrement.
- Le deuxième constat est celui de **méfiance dans le cas d'une traversée face à un véhicule automatisé dans chaque voie**. Cette méfiance se manifeste par des initiations plus tardives et des temps de traversée plus longs, surtout dans le cas où ils approchent à faible distance (i.e., pour des temps courts avant freinage de l'ordre de 1 et 2 secondes), alors même que la sécurité est totalement garantie puisque les véhicules automatisés virtuels sont programmés pour systématiquement s'arrêter devant le piéton en attente de traverser dans le simulateur. Ces initiations tardives suggèrent que le piéton enclenche sa traversée seulement après avoir perçu le freinage et l'arrêt imminent du véhicule automatisé à l'approche dans chaque voie. Une fois perçu ce freinage et arrêt des véhicules automatisés, le piéton s'engagerait ensuite dans sa traversée avec méfiance encore, avec des vitesses de marche plus lentes dans cette condition que dans les autres.

- Le troisième constat tient à l'**effet général de l'âge avec notamment plus de collisions observées chez les participants âgés que chez les plus jeunes**. Ce constat est dans la lignée des données nationales d'accidentalité piétonne révélant, par exemple, pour 2018, que 36% des piétons tués avaient plus de 75 ans, alors qu'ils ne représentaient que 9% de la population française (ONISR). Nos travaux menés à l'IFSTTAR sur cette question (voir Dommes, 2019, pour le plus récent), dans la lignée de ceux menés à l'international, montrent que le plus grand nombre de collisions associé à l'avancée en âge serait lié à plusieurs phénomènes caractéristiques du vieillissement normal : des processus décisionnels inadéquats, une compensation insuffisante par l'accélération de la vitesse de marche et par la faible observation conjointe du trafic approchant, une surcharge cognitive, et une métacognition peut-être aussi affaiblie avec le vieillissement.
- On retient également que la **vitesse d'approche des véhicules est un facteur de risque pour les jeunes comme les plus âgés**. On observe que les participants, jeunes comme âgés (avec une tendance plus forte chez les âgés) traversent plus souvent, et à des gaps plus courts, à 50 qu'à 30 km/h, occasionnant plus de collisions à 50 km/h. On observe aussi qu'ils initient plus tardivement et marchent plus lentement lorsque le véhicule approche à 50 km/h. Ces résultats témoignent de la difficulté à prendre en compte la vitesse d'approche du véhicule dans la prise de décision, notamment dans la présente étude où le trafic est complexe.
- Enfin, dernier constat important, **l'introduction de véhicules automatisés dans le trafic routier semble complexifier la tâche de traversée de rue même face à des véhicules traditionnels**. Dans la condition classique de trafic traditionnel (véhicules approchant à vitesse constante sans freiner pour laisser passer le piéton), on observe des difficultés dans le groupe des adultes jeunes dès la voie proche de circulation du trafic, ainsi que des difficultés à considérer la vitesse d'approche des véhicules dans la prise de décision de traverser la rue, de manière incohérente avec les recherches antérieures qui observent ces effets chez les piétons âgés seulement (voir par exemple Dommes et al., 2014 ; Dommes, 2019).

Si les effets de l'âge ont déjà été pointés du doigt dans la littérature, les autres constats sont plus nouveaux. De **futurs travaux** doivent donc être menés pour les confirmer et les approfondir. Le rôle des connaissances antérieures, de la pratique répétée et de la confiance des individus envers les véhicules automatisés dans le temps doit être étudié. Le design de ces véhicules doit également être abordé (signalisation, standardisation de l'apparence du véhicule). L'introduction des véhicules automatisés dans le trafic actuel pose aussi question, car elle semble complexifier la tâche et bouleverser les stratégies de traverser de rue des piétons avec des véhicules pourtant traditionnels.

Le traitement des **données verbales** révèlent des **perceptions positives envers les véhicules automatisés chez la majeure partie des participants, alors même qu'ils ont émis des comportements parfois hésitants et méfiants pendant l'expérimentation**. Même si les questionnaires ont été proposés après l'expérience, les attitudes générales envers les véhicules automatisés, mais également les perceptions des participants envers les véhicules virtuels simulés, sont positives en termes de confiance et de sécurité perçues par exemple, ou encore de faible niveau de stress perçu. Ces données déclaratives entrent en contradiction avec certaines des données comportementales relevées pendant la tâche de traversée de rue, les participants montrant des comportements hésitants et méfiants en particulier dans la condition où un véhicule automatisé est présent dans chaque voie. L'influence de la confiance envers les véhicules automatisés sur les comportements des piétons, ainsi que la façon de la mesurer, est en fait une question très délicate à traiter. Comme dans la littérature antérieure, les perceptions et déclarations subjectives peuvent être positives, mais les comportements différents, méfiants, hésitants voire dangereux.

Les **mesures physiologiques** recueillies dans l'étude avaient pour objectif d'étayer les conclusions émergeant des analyses des données comportementales et verbales. Le traitement des données de fréquence cardiaque et des réponses électrodermales s'est cependant avéré complexe, avec beaucoup de données perdues ou peu exploitables. Les analyses montrent des activations physiologiques associées au simple mouvement de marche. Malgré nos attentes, les analyses ne permettent pas de mettre en évidence un stress particulier en fonction des conditions de trafic, ni même de révéler des sentiments de confiance/méfiance envers les véhicules automatisés. La raison principale pourrait être liée au fait que les mesures ne sont pas assez précises ou sensibles pour montrer une différence au plan physiologique entre les différentes conditions de trafic. L'activité de traversée de rue est en effet très courte (entre 3 et 4 secondes au total, voire quelques millisecondes pour ce qui concerne un événement inattendu comme un freinage d'urgence). Il se peut que la réaction physiologique ne soit pas aussi rapide ou assez forte pour être décelable par les capteurs utilisés. D'autres travaux doivent être menés pour mieux mesurer les activations physiologiques des piétons lorsqu'ils traversent la rue face à des véhicules automatisés et/ou traditionnels.

Les **analyses biomécaniques** révèlent enfin des données très novatrices et intéressantes pour les algorithmes de détection du piéton. On retient de nos analyses que les **mouvements d'orientation de la tête de piéton** (à gauche et à droite, vers les voies proches et éloignées d'une rue à double sens où approchent le trafic bidirectionnel) **ne sont pas des marqueurs pertinents pour prédire l'intention de traverser la rue**. Beaucoup de différences interindividuelles sont observées et plusieurs stratégies émergent. Un indicateur plus pertinent pourrait être de considérer **le mouvement de la tête sur l'axe antéro-postérieur** (vers l'avant) pour prédire la décision de traverser la rue, puisqu'il précède, dans toutes les conditions de trafic, le mouvement du pied qui engage la traversée, chez les participants jeunes et âgés. D'autres travaux sont à mener sur cette question de la prédiction de l'intention de traverser la rue car nos données révèlent des différences interindividuelles importantes. La question des différences intra-individuelles se pose également, à savoir si le comportement et les mouvements du piéton ne varient pas dans le temps, avec l'expérience et la pratique.

À l'issue de ce projet, trois **recommandations** principales peuvent être formulées (informer, pratiquer et échanger). Quelques recommandations à la conception des véhicules automatisés sont également proposées.

INFORMER. La première recommandation est d'accroître les connaissances générales de la population sur les véhicules automatisés, grâce à de vastes campagnes d'informations. L'objectif sera d'informer les individus sur le fonctionnement de ces véhicules, les comportements que l'on peut en attendre, les limites techniques actuelles, les possibilités, etc., pour les utilisateurs de ces véhicules (conducteurs – passagers), mais aussi et surtout, pour notre propos, pour les autres usagers de la route (piétons, cyclistes, etc.). De meilleures connaissances permettraient des attentes plus justes envers ces nouveaux véhicules.

PRATIQUER. La deuxième recommandation est de permettre aux individus de se confronter en situation réelle à ces nouveaux véhicules. L'idée est de favoriser les expérimentations en conditions naturelles, pour permettre des expériences réelles avec des voitures automatisées dans le trafic routier actuel, dans les villes et les campagnes. Accroître les expériences par la pratique répétée pourrait permettre aux individus de se familiariser avec de telles voitures, d'apprendre à se comporter face à elles, augmentant ainsi la confiance et les attitudes positives. Cependant, une attention particulière doit être accordée à un niveau de confiance trop élevé, car les usagers de la route pourraient aussi l'utiliser à leur propre avantage et adopter alors des comportements à risque (par exemple, violations de priorité).

ECHANGER. La dernière recommandation principale est de faire dialoguer toutes les parties prenantes de cette question à enjeux majeurs. Décideurs publics, industriels, équipementiers, ingénieurs et chercheurs doivent communiquer. Le partage des connaissances pourra être la réponse à certains leviers. De nombreux efforts de recherche doivent également être poursuivis pour accroître les connaissances à des questions encore épineuses (design du véhicule, algorithme de détection de l'intention de traverser la rue, réglementation des interactions, etc.).

Conception du véhicule automatisé : Quelques dernières recommandations plus spécifiques à la conception du véhicule automatisé peuvent être formulées. A partir des résultats de notre projet et de la revue de la littérature, il semble que le véhicule automatisé devra (i) être facilement identifiable dans le trafic (facilement perceptible parmi les autres véhicules) mais dont l'apparence ne devra pas être trop « futuriste » (Dey et al., 2019), (ii) faire l'objet de standardisations quant à son design (pour éviter les confusions et voir circuler des véhicules aux apparences multiples) et (iii) adopter une conduite fluide et souple (ex. anticipation, freinage progressif en cas d'arrêt devant un piéton).

Sommaire

Résumé long	2
Sommaire	6
1. Etat de l’art et objectifs du projet	8
2. Méthode employée	12
2.1 Le simulateur de traversée de rue	13
2.2. La tâche de traversée de rue	14
2.3. Questionnaires	15
2.4. Mesures collectées	16
2.4.1. Analyse des comportements et décisions de traversée de rue	16
2.4.2 Analyse des données issues des questionnaires	16
2.4.3. Analyse des émotions	16
2.4.4. Analyse du mouvement et de la posture du piéton	18
2.5. Analyses statistiques	18
3. Population	19
4. Analyse des résultats comportementaux	20
4.1. Pourcentage de traversées acceptées	20
4.2. Etude des gaps acceptés	23
4.3. Collisions	27
4.4. Moment d’initiation	30
4.5. Temps de traversée	34
5. Analyses des données verbales déclaratives	36
5.1. Réponses au questionnaire mesurant l’acceptabilité générale des participants envers les véhicules automatisés (PRQF, Deb et al., 2017)	36
5.2. Réponses des participants aux questions portant sur la perception des véhicules automatisés virtuels créés pour l’expérimentation	37
6. Analyses des données physiologiques	39
6.1. Prétraitement des données	39
6.2. Modèles statistiques utilisées pour l’analyse des données physiologiques	39
6.3. Résultats et analyses	39
7. Analyse des données biomécaniques	41
7.1. Rappel des objectifs de ces analyses	41
7.2. Reconstruction des mouvements corporels	42

7.3.	Identification de l'instant de traversée.....	43
7.4.	Orientations segmentaires.....	45
7.5.	Résultats des analyses.....	46
7.5.1.	Initiations segmentaires du mouvement de traversée	46
7.5.2.	Variabilité des profils de mouvement de rotation droite/gauche de la tête	48
8.	Discussion générale des résultats et conclusions	49
9.	Recommandations.....	54
	Références bibliographiques	55

1. Etat de l'art et objectifs du projet

L'objectif principal du projet est d'étudier les comportements de traversée de rue des piétons face à des véhicules automatisés, en comparaison avec des véhicules traditionnels. Un deuxième objectif est de mettre en lumière des marqueurs posturaux prédictifs de l'intention de traverser la rue, dans diverses conditions de trafic. Un objectif complémentaire est d'effectuer des comparaisons inter-âges entre des piétons jeunes et plus âgés (>75 ans).

Les résultats attendus consistent en (i) une analyse des risques et besoins en matière d'interaction piétons-véhicules automatisés et (ii) l'identification de marqueurs posturaux prédictifs de l'intention de traverser la rue. Ces connaissances, associées à celles issues d'une veille active de l'état de l'art, permettront de (iii) dresser une liste de recommandations à destination de la DSR et des industriels-équipementiers en matière d'interactions piétons-véhicules automatisés.

1.1. Etat de l'art sur la question des interactions piétons-véhicules automatisés

Sur la base des connaissances actuelles, déterminer si les interactions piétons-véhicules seront mises à mal avec l'introduction des véhicules automatisés sur nos routes ne trouve pas de réponses claires, en particulier pour la sécurité des traversées de rue. La revue de littérature réalisée sur ce sujet montre des résultats contradictoires. Selon les études, les piétons manifestent des sentiments, perceptions ou comportements face à des véhicules automatisés parfois positifs et sûrs, mais parfois aussi hésitants, ou encore, dans certaines études, non différents comparativement à ceux adoptés face à des voitures traditionnelles. Certaines études montrent par contre des comportements problématiques et potentiellement dangereux.

Les grandes enquêtes menées sur les perceptions et sentiments des piétons à l'égard des véhicules automatisés n'ont reçu que peu d'attention à ce jour par rapport aux enquêtes axées sur les utilisateurs passagers de ces véhicules automatisés. On retient une enquête britannique de Hulse, Xie et Galea (2018) qui a révélé des perceptions positives chez les piétons. Les véhicules automatisés étaient perçus comme un moyen de transport « à risque relativement faible » et, en tant que piétons, les voitures automatisées étaient même perçues comme étant beaucoup moins risquées que les véhicules à conduite humaine. Par des entretiens avec des experts du monde universitaire, des secteurs public et privé aux États-Unis, Botello, Buehler, Hankey, Mondschein et Jiang (2019) précisent que les véhicules automatisés sont perçus comme plus sûrs en raison de leur grande fiabilité, les piétons pouvant plus facilement prédire leur comportement que celui de conducteurs humains. Cependant, les perceptions des personnes âgées semblent plus nuancées. Le récent sondage en ligne de Rahman, Deb, Strawderman, Burch et Smith (2019) a révélé que les personnes âgées perçoivent les véhicules automatisés avec des sentiments plus neutres voire négatifs en tant que piétons. La première raison pourrait être liée au manque d'informations sur les interactions à attendre entre les piétons et les véhicules automatisés, la plupart des informations disponibles se dirigeant vers le point de vue du conducteur futur passager de ces véhicules (tâches à bord, reprise en main, services à la personne, etc.). Une autre raison renvoie à la méfiance plus générale des âgés envers les nouvelles technologies (voir par exemple Czaja et al., 2006).

Les études sur les interactions réelles des piétons avec les véhicules automatisés sont un peu plus nombreuses que les grandes enquêtes générales de perceptions, en particulier ces dernières années. Bien que de plus en plus nombreuses, ces études publiées restent encore assez rares, comparativement à l'automatisation de la tâche de conduite et à ses conséquences pour le futur conducteur par exemple. Mais surtout, elles ne permettent pas de conclure de manière sûre à la question de savoir comment les piétons pourront se comporter en traversant

la rue face à des véhicules automatisés. Elles ont utilisé différentes méthodologies pour mettre en œuvre et tester des véhicules automatisés (par exemple, par l'usage de véhicules automatisés réels, par la technique du Magicien d'Oz, ou encore par la réalité virtuelle), mais aussi pour collecter des données (par exemple, par des groupes de discussion, des questionnaires, des entretiens, des mesures comportementales). Elles différaient également par le type de véhicules testés (navettes ou voitures automatisées) et leurs apparences (signalisées ou non). Ces différences rendent les comparaisons difficiles. De plus, la question de savoir comment concevoir un dispositif permettant aux véhicules automatisés de communiquer avec les piétons est parfois entrelacée et étudiée conjointement avec l'objectif plus fondamental d'étudier les sentiments, les perceptions ou les comportements des piétons lorsqu'ils traversent la rue devant des véhicules automatisés (par exemple, Merat, Louw, Madigan, Wilbrink et Schieben, 2018; Lagström et Lundgren, 2015).

Les études qui révèlent des comportements sécuritaires de traversée sont les plus rares. Elles ont collecté des données à partir de questionnaires ou d'entretiens après que les participants aient été exposés à des navettes automatisées fonctionnant à basse vitesse dans des zones restreintes. Rodriguez, Nuñez Velasco, Farah et Hagenzieker (2017) ont examiné comment les piétons perçoivent leur sécurité lorsqu'ils interagissent avec la navette WEpod, une navette automatisée de première génération opérant aux Pays-Bas sur un campus universitaire et ses environs. Dans des entretiens, groupes de discussion et questionnaires, les participants ont déclaré se sentir plus en sécurité face à la WEpod que face à des voitures traditionnelles. Cependant, la différence de vitesse entre la WEpod (15 km/h) et les véhicules traditionnels (30 km/h) pourrait expliquer ce surcroît de sécurité perçue avec la WEpod. Dans une autre étude (Merat, Louw, Madigan, Wilbrink & Schieben, 2018), les participants ont répondu à un questionnaire après des démonstrations d'une navette automatisée fonctionnant à basse vitesse (10 km/h) dans différentes zones dédiées (La Rochelle en France, Lausanne en Suisse et Trikala en Grèce). Les résultats ont montré que les piétons ne se sentent pas à l'aise ou en sécurité lorsqu'ils se déplacent dans un espace partagé avec des véhicules automatisés, mais qu'ils peuvent se sentir en sécurité lorsque la navette fonctionne dans des voies dédiées.

En fait, la plupart des études publiées sur cette question montre des comportements hésitants face à des véhicules automatisés, par la mesure de traversées réelles ou d'intentions de traverser la rue face à des véhicules automatisés, contrairement aux travaux précédemment cités qui recueillaient des perceptions et des ressentis après des démonstrations. L'une des études pionnières sur la question est celle de Rothenbucher, Li, Sirkin, Mok et Ju (2016), menée sur le campus de l'Université de Stanford (États-Unis), où des participants rencontraient un véhicule sans conducteur, en réalité conduit par un expérimentateur caché à l'intérieur d'un déguisement siège (technique du Magicien d'Oz), le long de deux itinéraires bien établis, les piétons traversant la rue à l'entrée d'un parking. Au moyen d'enregistrements vidéo et de questionnaires, les chercheurs ont montré que la plupart des piétons a traversé la rue avec méfiance. Dans la lignée de ce travail, avec la technique du Magicien d'Oz également, on trouve les travaux de Habibovic et al. (2016) et de Lagström et Lundgren (2015) menés sur le campus de l'Université de Technologie de Chalmers (Suède), les participants imaginant qu'ils étaient sur le point de traverser une route face à une voiture automatisée approchant à 7 km/h dans une voie sans issue (les participants devaient indiquer le dernier moment possible pour traverser en se tournant vers l'expérimentateur, sans réellement traverser cependant). Les résultats indiquaient que les participants avaient moins confiance pour traverser lorsque le conducteur était inattentif (par exemple au téléphone, en train de lire un journal). Enfin, dans des expériences menées en réalité virtuelle, Creech et al. (2017) et Jayaraman et al. (2018) ont proposé à des participants équipés d'un casque de réalité virtuelle de marcher sur un tapis roulant omnidirectionnel et de traverser une rue à sens unique face à des véhicules automatisés, tandis que le comportement des véhicules

automatisés pouvait varier (prudent ou agressif) et qu'un passage piéton était ou non présent. Les résultats ont montré que les participants étaient moins confiants dans le cas des véhicules automatisés à conduite agressive, mais plus confiants par la présence de passages piétons. Nunes Velasco, Farah, van Arem et Hagenzieker (2019), dans une expérience de réalité virtuelle utilisant des vidéos à 360°, ont enfin montré que les participants qui reconnaissaient la voiture comme étant automatisée manifestaient moins d'intentions de traverser la rue.

D'autres études montrent des comportements problématiques potentiellement dangereux. Currano et al. (2018), examinant le comportement de piétons traversant devant une voiture automatisée sans conducteur visible (méthode du Magicien d'Oz) à l'entrée / sortie d'un parking dans deux campus mexicains, ont révélé, à partir d'analyses vidéo, que certains piétons ont agi de manière ludique en testant eux-mêmes la capacité de freinage du véhicule automatisé ou en poussant des amis vers la voiture. Dans la lignée de ce constat, Madigan, Nordhoff, Fox, Amini, Louw, Wilbrink, Schieben et Merat (2019), au cours de l'observation vidéo de piétons en interaction avec une navette automatisée dans des environnements de circulation mixte en zone urbaine grecque et française, ont observé la survenue d'incidents critiques sur passages piétons, pour lesquels les piétons, pensant avoir la priorité, se sont engagés dans des comportements dangereux en supposant que la navette s'arrêterait. Ces incidents étaient assez rares mais notables. Enfin, Woodman, Lu, Higgins, Brewerton, Jennings et Birrell (2019) ont étudié les choix des participants pour traverser au sein d'un peloton de navettes en environnement virtuel (avec un casque de réalité virtuelle, les intentions de traverser et les sentiments de sécurité étaient mesurés, pas de traversées réelles). Les résultats ont montré que les participants acceptaient plus souvent de traverser, et à des intervalles plus courts, dans un peloton de navettes proches les unes des autres se déplaçant dans un espace partagé (pas de séparation entre les véhicules et les piétons), par rapport à un environnement routier séparé par des élévations de trottoirs et des marquages routiers. Ces comportements pourraient être très problématiques car ils augmentent la probabilité que les véhicules s'arrêtent soudainement avec manœuvres d'urgence. La très récente étude de Razmi Rad, Homem de Almeida Correia, et Hagenzieker (2020) observe également cette plus forte propension des piétons à traverser face à un véhicule automatisé plutôt que traditionnel, mais elle suggère surtout que les caractéristiques personnelles des piétons (âge, genre et familiarité avec ce type de véhicule) pourrait jouer un rôle important.

Dans toutes ces données quelque peu contradictoires, deux études n'ont montré aucune différence significative selon que les comportements de traversées se fassent devant des véhicules automatisés ou traditionnels. L'étude de Rodríguez Palmeiro et al. (2018), utilisant également la technique du Magicien d'Oz, a mesuré les gaps critiques choisis par les piétons (c'est-à-dire la distance ou le temps maximal au-dessous duquel le participant pense ne plus pouvoir traverser la rue, en termes d'intention déclarée, sans traversée réelle) face à une voiture automatisée dans une zone réservée sur le campus de l'Université de Technologie de Delf (Pays-Bas). Dans l'ensemble, les résultats n'ont montré aucun effet significatif des diverses apparences du véhicule (par exemple un véhicule traditionnel conduit manuellement par un conducteur attentif, un véhicule automatisé non signalisé avec conducteur inattentif, ou une voiture automatisée signalisée par affichage avec conducteur inattentif) sur les variables d'intérêt (ex. gaps critiques choisis par les participants, stress auto-déclaré). Une autre étude, de Dey, Martens, Eggen et Terken (2019), a enfin révélé que le mode de conduite (manuelle ou automatisée) n'influait pas la volonté des piétons de traverser la rue au cours d'une étude en conditions réelles dans un campus universitaire au Pays-Bas et d'analyses vidéos des comportements observés.

Si de plus en plus d'études sont menées sur le sujet des interactions entre piétons et véhicules automatisés, elles présentent un nombre important de limites qui en réduisent la portée. Dans l'ensemble, les véhicules automatisés réels ou simulés fonctionnent à des vitesses

très faibles (de 7 km/h à 30 km/h), dans des zones restreintes à faible trafic (voire pas de trafic du tout) qui ne sont donc pas représentatives de situations urbaines réelles, où la plupart des accidents ont effectivement lieu. De plus, dans la plupart des études, les participants n'ont pas traversé réellement la rue pour des raisons de sécurité évidentes, de sorte que des métriques objectives (par exemple, des intervalles de temps choisis pour traverser) n'ont pas pu être collectées. Enfin, le design des véhicules automatisés différait souvent d'une étude à l'autre, de telle sorte que les véhicules automatisés pouvaient être ou non signalisés et donc plus ou moins facilement identifiables, conduisant dès lors à un large éventail d'interactions possibles.

1.2. Objectifs de l'étude

Dans ce contexte, le premier objectif du projet Automa-Pied est d'étudier les **comportements de piétons traversant la rue face à des voitures traditionnelles et/ou automatisées**. L'utilisation d'un environnement virtuel est nécessaire à l'avancée de telles connaissances (Deb et al., 2018). Il permet de simuler des technologies encore immatures aujourd'hui, en toute sécurité. Le simulateur de traversée de rue de l'IFSTTAR a également l'avantage d'être immersif et réaliste, permettant à la personne de se déplacer réellement sur une distance de 8 mètres environ face à un trafic virtuel projeté sur écrans géants autour de lui. Le simulateur est équipé d'un système de capture du mouvement (système Vicon®), qui, grâce à des marqueurs réfléchissants positionnés sur le corps du piéton, permet d'asservir la scène visuelle virtuelle au déplacement réel du sujet (simulateur interactif) mais également de mesurer de façon très précise les mouvements du corps de la personne en action. Ces dernières informations seront très utiles pour répondre au deuxième objectif du projet.

Le deuxième objectif du projet est d'identifier les **marqueurs posturaux prédictifs de l'intention de traverser la rue**. Si les algorithmes de détection des piétons ont fait l'objet de nombreuses recherches (pour une revue, voir Ohn-Bar & Trivedi, 2016), les algorithmes dédiés à la détection de l'intention de traverser la rue des piétons ont fait l'objet de travaux beaucoup moins nombreux (Rasouli, Kotseruba, & Tsotsos, 2018). Ces dernières années, les algorithmes de détection de piétons ont considérablement progressé, le recours à la topographie 3D de l'environnement par lidars (e.g. Wang, Wang, Liu, Meng, & Yang, 2017) ou aux analyses multi-spectrales permettant d'augmenter sensiblement la capacité d'identification correcte de la présence de piétons (ex. Cao et al., 2019). Malheureusement, ces avancées n'ont pas bénéficié à la détection de l'intention de traverser la rue des piétons, et les faux négatifs subsistent encore (par exemple détecter à tort une absence d'intention). Les algorithmes de détection d'intention actuels reposent principalement sur une analyse de la scène visuelle dans la lignée de celle effectuée par un œil humain. Elle comprend deux sources d'informations : les indices de positions (ex. position du piéton, trajectoire) et l'environnement (ex. passage piéton, voie en double sens, flot de voitures) (voir par exemples Hariyono & Jo, 2017; Raza, Chen, Rehman, Wang, & Bao, 2018). A ces sources d'information, les indices posturaux ne sont pas encore systématiquement utilisés dans les algorithmes alors que ces indices sont les seuls à ne pouvoir être compensés par un humain lorsqu'il détermine l'intention d'un piéton (Schmidt & Färber, 2009), ces mouvements précoces du piéton pouvant par contre être potentiellement décelés par des capteurs performants. Pour pouvoir prédire l'intention, il appartient aux futurs algorithmes d'utiliser des indices posturaux afin d'optimiser leur pourcentage d'identification correcte. Mais des connaissances manquent à l'appel, notamment celles relatives aux indicateurs posturaux prédictifs de l'intention de traverser la rue, dans le but d'améliorer la prise de décision de ces systèmes. A notre connaissance, seule une très récente publication israélienne a abordé cette question selon une approche expérimentale et contrôlée, en montrant que certains mouvements précoces de la tête et des épaules prédisent l'intention de traverser (Kalantarov,

Riemer, & Oron-Gilad, 2018). Néanmoins, ce travail présente de nombreuses limites (ex. conditions peu immersives, faible échantillon, sens unique) et davantage de travaux sont nécessaires afin d'obtenir des mesures précises et représentatives de l'intention de traverser la rue.

Le troisième et dernier objectif du projet Automa-Pied est d'établir des **comparaisons inter-âges**. Les piétons âgés peuvent être particulièrement méfiants à l'égard des technologies nouvelles non éprouvées (Rahman et al., 2019), ce qui aurait pour conséquence d'engendrer des comportements de traversée de rue hésitants. L'introduction de voitures automatisées dans le trafic routier traditionnel peut également augmenter la complexité de la tâche. Cela pourrait être préjudiciable aux personnes âgées en particulier. L'avancée en âge a, en effet, clairement été identifiée dans la littérature comme étant susceptible d'entraîner des choix dangereux et biaisés (voir par exemple, Dommes et al., 2014, 2015). Traverser une rue à double sens est une tâche physiquement et cognitivement exigeante, en particulier avec le vieillissement, de telle manière qu'elle pourrait être considérée comme une double tâche impliquant marche et perception concomitante de l'environnement (Dommes, 2019). La situation qui émergera dans les années à venir d'un trafic mixte avec à la fois des véhicules traditionnels et automatisés sur la route, conduira à de l'incertitude, et compliquera ainsi encore plus la tâche, pour les piétons jeunes comme âgés.

2. Méthode employée

Pour répondre à ces objectifs, des participants ont réalisé une tâche de traversée de rue sur le simulateur de l'IFSTTAR à Versailles Satory autorisant le déplacement réel d'un piéton sur une distance d'environ 8 mètres en interaction avec des véhicules virtuels.

Quatre conditions de trafic bidirectionnel sont comparées, en faisant varier le type de véhicule et sa présence sur la voie :

- (i) condition VT-VT : un Véhicule Traditionnel dans chaque voie,
- (ii) condition VA-VT : un Véhicule Automatisé dans la première voie et un Véhicule Traditionnel dans la seconde voie,
- (iii) condition VT-VA : un Véhicule Traditionnel dans la première voie et un Véhicule Automatisé dans la seconde voie,
- (iv) condition VA-VA : un Véhicule Automatisé dans chaque voie.

La vitesse d'approche des véhicules sur les deux voies était identique et pouvaient prendre deux valeurs selon les essais, à savoir 30 ou 50 km/h.

Le véhicule automatisé était très reconnaissable dans le trafic (de couleur blanche, signalisé par un lidar sur le toit et des autocollants indiquant la qualité automatisée du véhicule, voir Figure 1 ci-après). Il était programmé pour systématiquement s'arrêter et laisser le passage au piéton en attente de traverser sur le trottoir, au contraire des véhicules traditionnels qui approchaient à vitesse constante et ne freinaient pas pour laisser le piéton traverser. La situation étudiée était celle d'une traversée de rue en dehors d'un passage pour piéton (zébra), non équipé de feux pour piéton (bonhomme vert/rouge), i.e. une situation dans laquelle le piéton décide de lui-même s'il souhaite ou non traverser la rue au sein du trafic.

Dernier facteur manipulé, le gap ou temps inter-véhiculaire disponible au piéton pour traverser d'une durée de 1, 2, 3, 4 ou 5 secondes entre (a) des véhicules traditionnels approchant à vitesse constante et (b) entre le piéton et un véhicule automatisé avant que ce dernier enclenche une action de freinage.

Au total, 120 essais étaient proposés à chaque participant.

Le présent protocole de recherche a été soumis au comité d'éthique de l'IFSTTAR qui l'a approuvé. Le consentement de chaque participant est exprimé par écrit le jour de l'expérimentation, avant les tâches proposées, et après que l'expérimentateur ait répondu à toutes les questions et requêtes du participant.

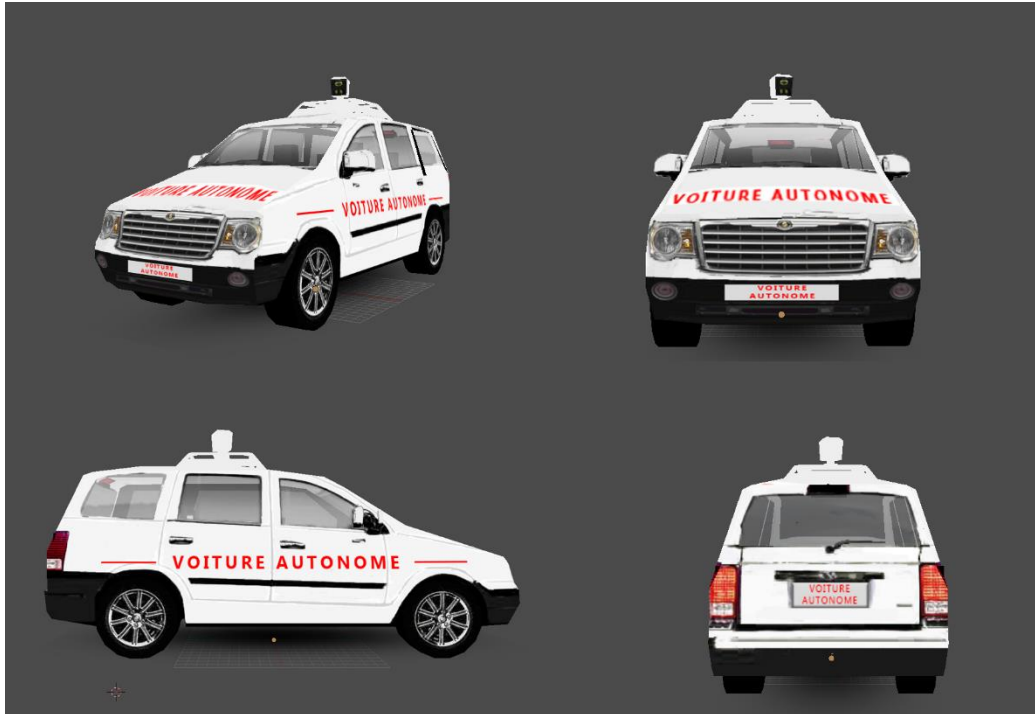


Figure 1. Le véhicule virtuel automatisé utilisé dans la présente étude

2.1 Le simulateur de traversée de rue

Le simulateur permet aux personnes participant à la recherche d'effectuer une réelle traversée de rue en toute sécurité et dans des situations où toutes les caractéristiques du trafic sont contrôlées (cf. Figure 2 ci-dessous).

Le simulateur est constitué d'une portion de route sur laquelle la personne se déplace réellement, de systèmes de génération et de projection d'images virtuelles, d'un dispositif sonore, et d'un système d'enregistrement des traversées. La route est matérialisée sur le sol de la salle d'expérimentation par des scotchs gris délimitant la chaussée, et la personne traverse réellement une distance d'environ 8 mètres, dont 5.7 mètres de chaussée sur laquelle circulent des véhicules, pour les besoins de la présente étude. Elle interagit avec des scènes virtuelles, représentant des flots de véhicules approchants sur une route bidirectionnelle, projetée sur 10 écrans géants. Le point de vue est subjectif, c'est-à-dire qu'il correspond à celui de la personne immergée dans le simulateur et s'adapte en temps réel à la position du sujet dans le simulateur, position mesurée à l'aide d'un système de capture du mouvement et de marqueurs placés sur la tête du sujet (système Vicon®).

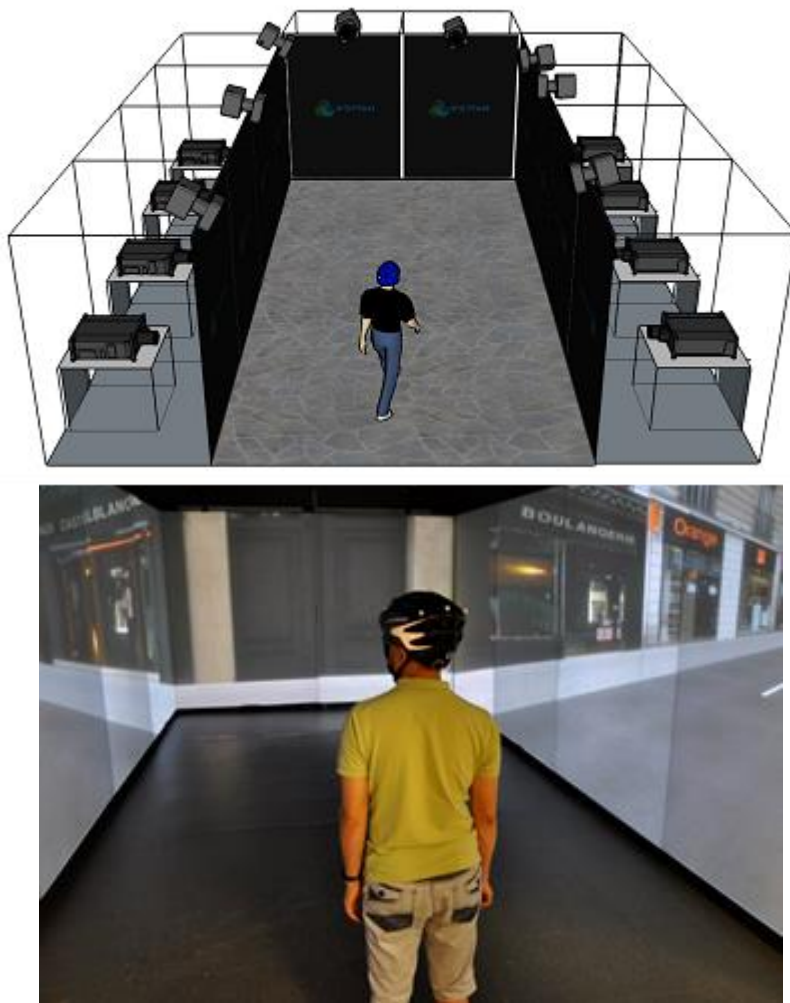


Figure 2. Le simulateur de traversée de rue de l'IFSTTAR, à Versailles-Satory

2.2. La tâche de traversée de rue

Tout d'abord, l'expérimentateur commençait par déterminer la vitesse de marche du participant, sur 10 essais, avec chronomètre, dans le paysage virtuel et sans véhicule à l'approche. Cette donnée était essentielle à la synchronisation des gaps sur les deux voies lors de la tâche de traversée de rue, le temps manipulé en voie éloignée devant comprendre le temps nécessaire à chaque individu pour franchir la première voie. Ensuite, une phase d'entraînement à la tâche de traversée de rue était proposée au participant (12 essais). Seules les conditions VT-VT (Véhicules Traditionnels dans les deux voies) et VA-VA (Véhicules Automatisés cédant le passage dans les deux voies) étaient exposés au participant qui découvrait alors le fonctionnement de la tâche, le visuel et le fonctionnement du véhicule automatisé en particulier (4 essais). Les premiers essais se faisaient avec l'expérimentateur puis le participant effectuait les traversées seul. Durant cette phase d'entraînement, le participant était encouragé à poser toute question relative à la tâche. L'expérimentateur s'assurait également de la bonne compréhension des consignes en observant le comportement du participant.

La tâche expérimentale était ensuite constituée de 120 essais repartis en trois blocs de 40 essais, séparés d'une pause de plusieurs minutes entre chaque bloc. Le plan expérimental

utilisé permet de réunir l'ensemble des conditions expérimentales manipulées dans chaque bloc (1 essai par condition expérimentale dans chaque bloc, chaque condition expérimentale étant répétée trois fois sur l'ensemble de la passation).

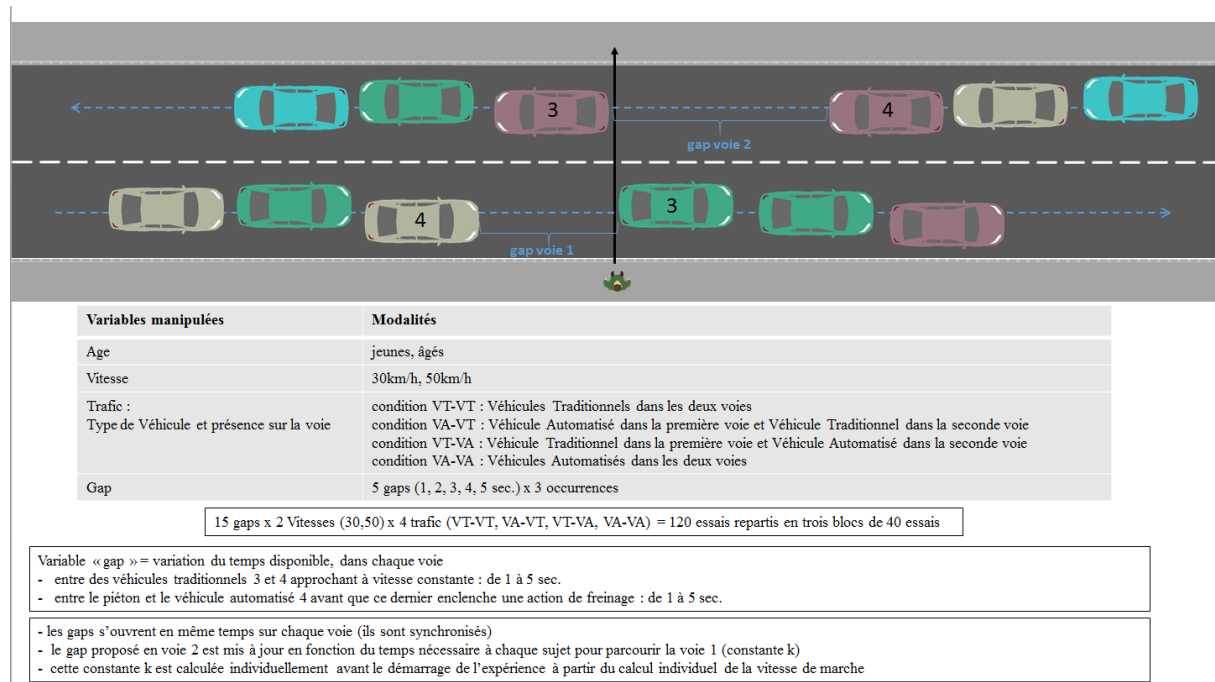


Figure 3. Synthèse du protocole expérimental.

2.3. Questionnaires

Des questionnaires étaient délivrés à la personne en version papier et complétés par le participant après la tâche de traversée de rue.

Questionnaire d'informations générales : Ce questionnaire vise à recueillir des données permettant de mieux connaître les personnes participants à l'étude et former des groupes d'analyses en fonction notamment de l'âge, du sexe, et du statut (étudiant/actif ou retraité). Pour aussi recueillir des données utiles à l'analyse des résultats observés dans la tâche de traversée de rue, et notamment celles liées aux émotions qui reposent sur la collecte de mesures physiologiques (rythme cardiaque et réponse électrodermale), il est nécessaire de connaître la présence de certaines pathologies (e.g., neuropathie périphérique) et/ou médicaments pouvant altérer le fonctionnement du système nerveux autonome et/ou du système cardiovasculaire (e.g., bêtabloquants). Ces informations seront également utiles à l'analyse de la marche (e.g., fatigue, mouvements involontaires). Ces informations (pathologies-médications) seront recueillies par l'intermédiaire d'une question où le participant déclare, de lui-même, s'il le souhaite, la présence de pathologie(s) particulière(s) et la prise de médicament(s).

Questionnaire évaluant l'acceptabilité des participants envers les véhicules automatisés : Le questionnaire d'acceptabilité des piétons envers les véhicules automatisés (PRQF, Deb et al., 2017) a été proposé à chaque participant à la fin de l'expérience. Ce questionnaire se compose de 16 déclarations regroupées en cinq facteurs: (i) cinq items sont basés sur les attitudes, (ii) trois sur les normes sociales, (iii) trois sur la confiance, (iv) deux sur la

Questionnaire de fin d'expérimentation : Ce questionnaire permet d'évaluer que l'étude a été effectuée dans de bonnes conditions par le participant en vérifiant sa compréhension a posteriori de la tâche, la validité perçue de l'étude (ex. amusement, ennui), et l'aspect intuitif de la tâche. La perception du participant envers les véhicules automatisés que nous avons spécifiquement simulés dans la présente étude (confiance, sécurité perçue, prédictibilité du comportement) est par ailleurs évaluée grâce des échelles visuelles analogiques, comme illustré ci-après :

Pas du tout Enormément

2.4.1. Analyse des comportements et décisions de traversée de rue

2.4.2 Analyse des données issues des questionnaires

2.4.3. Analyse des émotions

16

participant pourrait ressentir lors d'une traversée de rue face à un véhicule traditionnel ou automatisé. Pour ce faire, nous avons collecté des mesures physiologiques (fréquence cardiaque, ECG, et réponse électrodermale, RED) couramment utilisées dans la littérature pour mesurer la réponse de stress (Dutheil et al., 2012; Vrijkotte, van Doornen, & de Geus, 2000), d'anxiété (Licht, de Geus, van Dyck, & Penninx, 2009), ou d'émotions plus généralement (Quintana, Guastella, Outhred, Hickie, & Kemp, 2012; Shiota, Neufeld, Yeung, Moser, & Perea, 2011; Thayer, Åhs, Fredrikson, Sollers, & Wager, 2012).

Plus précisément, nous avons utilisé la variabilité du rythme cardiaque (ECG, pour une récente revue de littérature, voir Shaffer & Ginsberg, 2017) qui consiste en un traitement fréquentiel du rythme cardiaque. Les hautes fréquences reflètent l'activité du système nerveux autonome parasympathique, correspondant aux émotions associées à de la certitude telles que la confiance. Généralement, une baisse des hautes fréquences associées à une augmentation des basses fréquences correspond aux émotions associées à de l'incertitude et/ou du stress. Toutefois, les basses fréquences ne renvoient pas uniquement à l'activité du système nerveux autonome sympathique mais également à l'activité du système nerveux autonome parasympathique (Billman, 2013). C'est pourquoi, il est important d'associer l'analyse de la fréquence cardiaque à la réponse électrodermale (RED), qui est une mesure plus sensible de l'activité du système nerveux autonome sympathique (Bach, 2014; Bach, Daunizeau, Friston, & Dolan, 2010) et donc, en termes d'émotions, de l'incertitude ou du danger.

La fréquence cardiaque (ECG) a été mesurée grâce à l'utilisation d'une ceinture thoracique modèle « T31 » de la marque « Polar » (cf. Figure 4 ci-après). La réactivité électrodermale (RED) a été mesurée grâce à des électrodes en acier inoxydable équipées d'un ruban Velcro et placées autour de l'index et du majeur de la main non dominante (cf. Figure 4). La ceinture thoracique modèle « T31 » de la marque « Polar » a été initialement créée pour un usage sportif et n'implique pas de contraintes d'utilisation et/ou de mobilité particulières. Le participant a simplement à placer la ceinture autour de son torse. Pour limiter les artefacts associés à la respiration, la fréquence respiratoire a également enregistrée grâce à un capteur Captiv placé par le participant sous la ceinture thoracique. Les électrodes utilisées pour mesurer la réactivité électrodermale sont également très faciles à utiliser par le participant. L'expérimentateur place les électrodes et s'assure qu'elles ne provoquent aucune gêne chez le participant : les électrodes se fixent à l'aide d'un ruban Velcro sur les doigts (index et majeur) de la main non dominante afin de ne pas gêner le participant. L'ensemble de ces mesures a été géré par le système d'acquisition Captiv L7000 (Figure 4). Toutes ces mesures ont été synchronisées à chaque essai tout au long de la tâche de traversée de rue.



Figure 4. Ceinture thoracique modèle « T31 » de la marque « POLAR », électrodes en acier inoxydable équipées d'un ruban Velcro, et système d'acquisition Captiv L7000.

2.4.4. Analyse du mouvement et de la posture du piéton

Au début de chaque séance expérimentale, les participants ont été équipés de 21 marqueurs passifs. Ces marqueurs sont des petites sphères de 15mm de diamètre, recouvertes de scotch réfléchissant. Ils sont placés sur des endroits anatomiques standardisés, illustrés sur la Figure 5 suivante. Ils sont collés sur les vêtements des participants par le biais de scotch double face hypoallergénique.

La position des marqueurs réfléchissants placés sur les participants était enregistrée grâce aux caméras Vicon® qui équipent le simulateur. Cette technique de mesure est non invasive et non irradiante. Elle fait partie des techniques classiques de mesure de mouvement.

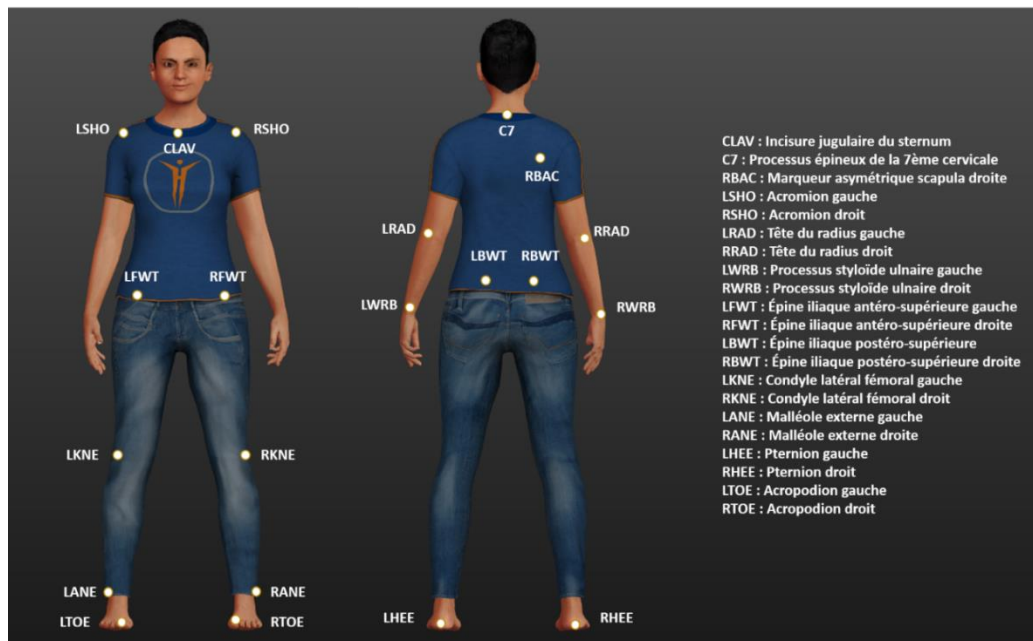


Figure 5. Placement des 21 marqueurs réfléchissants positionnés sur les vêtements des participants.

A partir de la position de ces marqueurs, nous calculons la posture des participants à chaque instant, en s'intéressant particulièrement aux orientations de la tête, des épaules, des hanches et des pieds avant la traversée afin d'identifier des paramètres prédictifs de l'intention de traversée de rue.

2.5. Analyses statistiques

Les données sont principalement analysées par le biais d'Analyses de la Variance (ANOVAs), avec une valeur de significativité fixée à $p=.05$. Des tests de comparaisons post-hoc (Fisher LSD) affinent ces analyses pour examiner certains effets en particulier.

Les données quantitatives sont décrites sous forme de moyenne (M) en spécifiant leur écart type (ET) et distribution. Des représentations graphiques des résultats sont effectuées.

3. Population

Un échantillon de 60 personnes a participé à l'étude, dont :

- 30 adultes d'âge moyen, entre 21 et 39 ans ($M=29.43$, $ET=5.7$; 16 femmes, 14 hommes)
- et 30 personnes âgées entre 68 et 81 ans ($M=75.40$, $ET=3.94$; 15 femmes, 15 hommes)

Les personnes âgées ont été recrutées dans les environs de l'IFSTTAR Versailles, dans des clubs ou associations seniors. Les participants âgés sont tous autonomes et indépendants, vivent à leur domicile et se déplacent quotidiennement sans canne ni béquille. Les participants jeunes ont été recrutés dans les universités environnantes ou par annonces diffusées dans des réseaux d'informations (ex. RISC). Pour les rembourser des frais générés par le déplacement pour se rendre dans les locaux de l'IFSTTAR à Versailles, chaque participant a reçu une indemnisation de 30 euros. Au début de chaque rencontre, l'expérimentateur expliquait le déroulement de l'étude. Si le participant acceptait de participer à l'étude, il signait alors le formulaire de consentement libre et éclairé (cf. Figure 6 ci-dessous).

Pour les besoins du scénario de traversée de rue, nous avons, pour rappel, calculé la vitesse de marche des participants (10 marches à allure soutenue). On retient une vitesse de marche significativement plus lente ($F(1,58)=14,20$, $p<.001$, $\eta^2=.20$) chez les participants âgés ($M=1.29$ m/s, $ET= 0.21$ m/s) que les participants jeunes ($M=1.48$ m/s, $ET=0.17$ m/s).

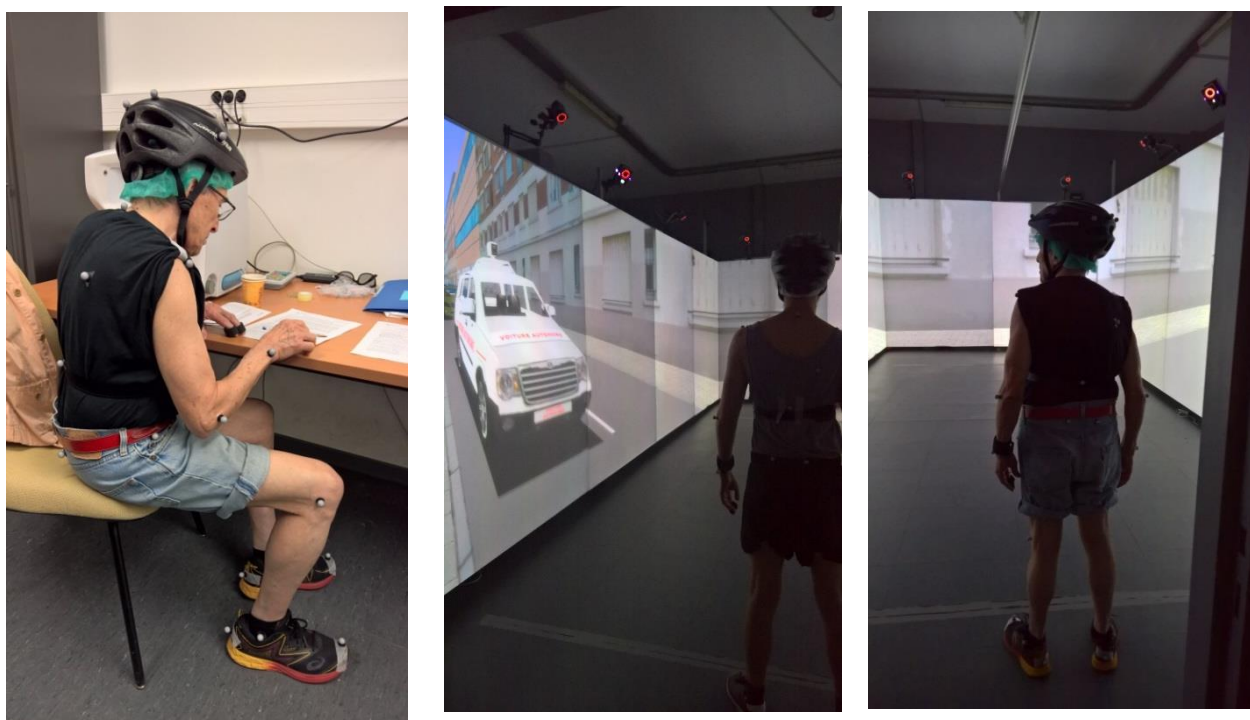


Figure 6 : Participants de l'étude. Après avoir lu la notice d'informations et signé la fiche de consentement libre et éclairé, les participants sont invités à se rendre dans le simulateur piéton afin de répondre à la tâche de traversée de rue.

4. Analyse des résultats comportementaux

4.1. Pourcentage de traversées acceptées

L'Anova Age (2) x Trafic (4) x Vitesse (2) révèle un effet non significatif du groupe d'âge ($F(1,58)=0.1$, $p=.99$) sur le pourcentage moyen de traversées acceptées. Ce résultat n'est pas signe de prudence chez les âgés qui marchent moins vite et ne sont pas susceptibles de réagir aussi rapidement que les plus jeunes.

L'effet de la condition de Trafic est significatif, $F(3,174)=491.07$, $p<.001$, $\eta^2=.89$. On retient que les participants acceptent quasiment toujours de traverser lorsqu'un véhicule automatisé leur laisse le passage dans chaque voie, alors qu'ils ne le font que dans la moitié des cas lorsqu'il s'agit de véhicules traditionnels dans chaque voie. La condition où un véhicule automatisé laisse le passage en première voie alors qu'un véhicule traditionnel arrive en deuxième voie est particulièrement intéressante : on observe une augmentation significative du pourcentage de traversées acceptées dans cette condition comparativement aux conditions 1 et 3 contenant toutes deux aussi des véhicules traditionnels ($p<.001$, Fisher LSD post-hoc tests).

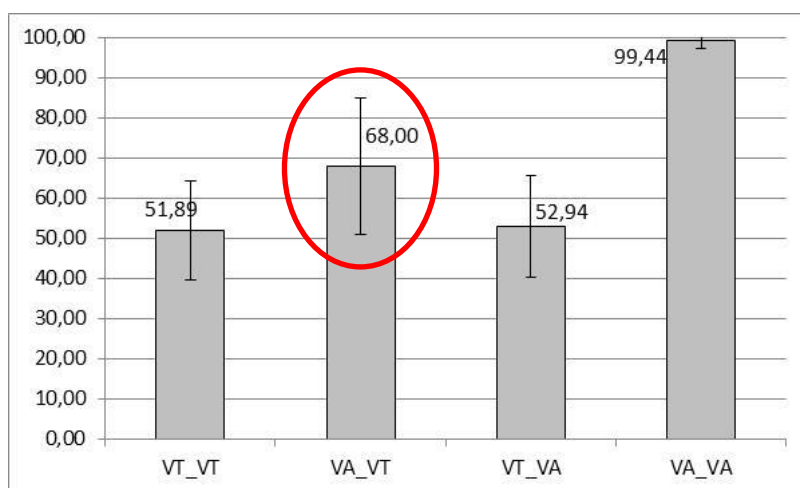


Figure 7. Pourcentage moyen de traversées acceptées en fonction de la condition de trafic (Condition VT-VT : Véhicules Traditionnels dans les deux voies ; Condition VA-VT : Véhicule Automatisé dans la première voie et Véhicule Traditionnel dans la seconde voie ; Condition VT-VA : Véhicule Traditionnel dans la première voie et Véhicule Automatisé dans la seconde voie ; Condition VA-VA : Véhicules Automatisés dans les deux voies).

L'effet de la Vitesse des véhicules est également significatif, $F(1,58)=117.95$, $p<.001$, $\eta^2=.67$, avec plus de traversées acceptées à 50 km/h ($M=71.69\%$, $ET=20.36$) qu'à 30km/h ($M=64.44\%$, $ET=24.63$). Ce résultat témoigne de difficultés à prendre en compte la vitesse d'approche du véhicule dans la prise de décision. En effet, pour un intervalle de temps donné (de 1 à 5 secondes, par pas de 1 seconde dans la présente étude), la distance du véhicule à l'approche est nécessairement plus grande à 50 km/h qu'à 30 km/h. Cette grande distance associée à la vitesse élevée mène les participants à penser qu'ils ont le temps de traverser. Mais le temps d'arrivée du véhicule à leur hauteur est alors surestimé, et la décision de traverser potentiellement dangereuse.

L'interaction Age x Trafic est significative, $F(3,174)=2.6930$, $p=.0477$, $\eta^2=.04$. La différence inter-âge n'est visible que dans la condition 2 où un véhicule automatisé laisse le

passage en première voie alors qu'un véhicule traditionnel approche dans la deuxième voie, avec les participants âgés qui acceptent plus souvent de traverser dans cette condition que les jeunes ($p=.08$).

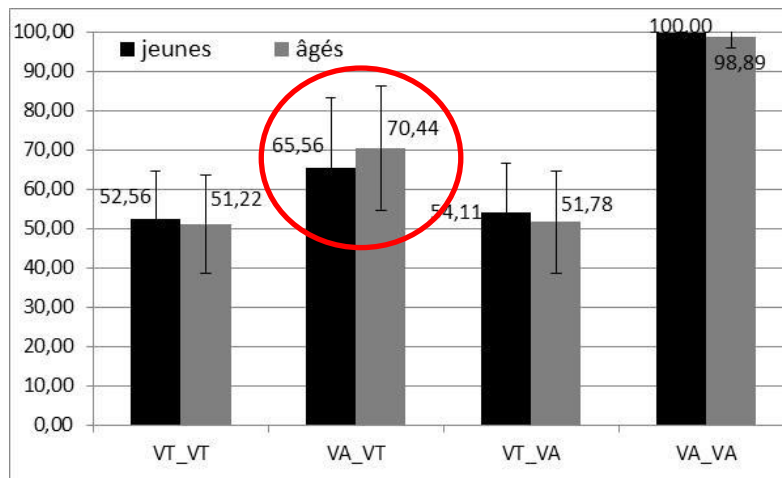


Figure 8. Pourcentage moyen de traversées acceptées en fonction de la condition de trafic et le groupe d'âge des participants

Par contre, l'interaction Age x Vitesse n'est pas significative ($F(1,58)=0.14$, $p=.71$), les jeunes comme les âgés montrant des décisions influencées par la vitesse.

L'interaction Trafic x Vitesse est significative, $F(3,174)=23.11$, $p<.001$, $\eta^2=.28$. L'effet vitesse s'observe dans toutes les conditions de trafic, sauf celle où un véhicule automatisé laisse le passage sur chaque voie (condition 4).

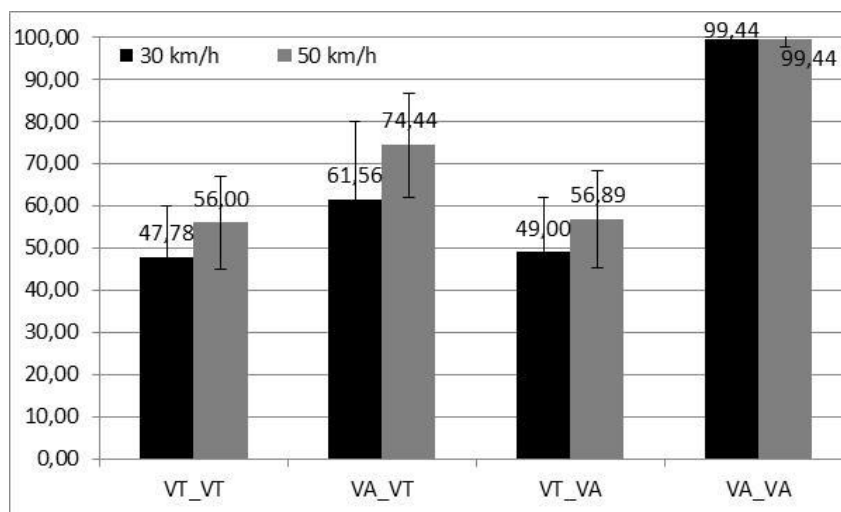


Figure 9. Pourcentage moyen de traversées acceptées en fonction de la condition de trafic et de la vitesse d'approche des véhicules

L'interaction Age x Trafic x Vitesse n'est pas significative $F(3,174)=1.03$, $p=.38$.

Conclusions : L'étude du pourcentage moyen de traversées acceptées révèle des différences notables entre les conditions de trafic. La condition VA-VA où un véhicule automatisé cède le passage au piéton dans chacune des deux voies ne révèle pas de prise de décision « volontaire » mais la saisie quasi systématique (proche de 100%) d'une opportunité offerte par le trafic. L'étude des autres conditions de trafic révèle une augmentation des traversées acceptées dans la condition VA-VT en particulier où un véhicule automatisé laisse le passage en première voie alors qu'un véhicule traditionnel arrive en deuxième voie. Ici, les participants saisiraient l'opportunité offerte par le véhicule automatisé en voie proche sans parfois considérer la voie éloignée. Si plus de traversées sont acceptées (environ 68% des essais), c'est que des gaps plus courts ont été acceptés, les autres conditions VT-VT et VT-VA menant toutes deux à des pourcentages de traversées acceptés autour de 50% environ. Les données ne révèlent pas de différence significative sur le pourcentage moyen de traversées acceptées entre les participants jeunes et âgés. Ce résultat n'est pas signe de prudence chez les âgés qui marchent et réagissent moins vite que les plus jeunes. On voit même que les âgés ont tendance à encore plus souvent traverser que les jeunes en condition VA-VT où un véhicule automatisé laisse passer le piéton en voie proche alors qu'un véhicule traditionnel approche en voie éloignée. Ce constat laisse présager des comportements dangereux.

La vitesse enfin se révèle être un facteur de risque car elle est associée à une augmentation des traversées acceptées. Si les jeunes comme les âgés acceptent plus souvent de traverser à vitesse élevée, c'est surtout que les distances qui les séparent des véhicules approchant le sont également. Ainsi, pour un intervalle de temps donné, la distance du véhicule à l'approche est nécessairement plus grande à vitesse élevée qu'à vitesse lente. Les grandes distances associées aux vitesses élevées mènent les piétons à penser qu'ils ont le temps de traverser. Mais le temps d'arrivée du véhicule à leur hauteur est alors surestimé, et la décision de traverser potentiellement dangereuse.

4.2. Etude des gaps acceptés

Une analyse de régression logistique menée sur les décisions individuelles de traverser la rue (7200 décisions au total, 120*60 participants, réponses codées 0/1) en fonction du groupe d'âge auquel appartient le participant (jeunes, âgés), la condition de trafic (VT-VT ; VA-VT ; VT-VA ; VA-VA), la vitesse d'approche des véhicules (30, 50 km/h), et le gap disponible (1, 2, 3, 4, 5) se révèle significative ($\text{Chi}^2(9)=5567.17$, $p<.0001$).

On retient que le facteur groupe d'âge n'est pas significatif sur la décision de traverser, mais que les facteurs condition de trafic, vitesse et gap le sont ($p<.001$).

L'étude de la répartition des réponses en fonction du gap disponible (voir les quatre graphiques à la page suivante) révèle des patterns de prise de décisions différents selon la condition de trafic. Dans la condition trafic conventionnel, on voit que le critère de décision, i.e. le gap médian accepté (à 50% de la courbe), se situe autour de 3 secondes (plus ou moins selon la vitesse). On observe des courbes semblables dans la condition VT-VA où un véhicule traditionnel approche sur la première voie alors qu'un véhicule automatisé laisse le passage en voie éloignée. La décision est ici prise en fonction de la première voie principalement, avec un gap médian autour de 3 secondes comme dans la condition VT-VT de trafic conventionnel. L'ajout d'un véhicule automatisé en voie éloignée ne semble pas modifier la prise de décision principalement basée sur la voie proche. En revanche, le pattern change en condition VA-VT où le véhicule automatisé laisse le passage en voie proche alors qu'un véhicule traditionnel approche en voie éloignée. On voit ici un très net raccourcissement du gap médian accepté, qui se situe maintenant autour de 2 secondes (plus ou moins selon la vitesse), révélant des comportements potentiellement dangereux car traverser en 2 secondes entre des véhicules s'avère potentiellement court si le participant initie tardivement la traversée ou marche lentement. L'étude des choix en condition VA-VA où un véhicule automatisé cède le passage au piéton dans chacune des deux voies ne révèle pas de prise de décision volontaire mais la saisie quasi systématique (proche de 100%) d'une opportunité offerte par le trafic.

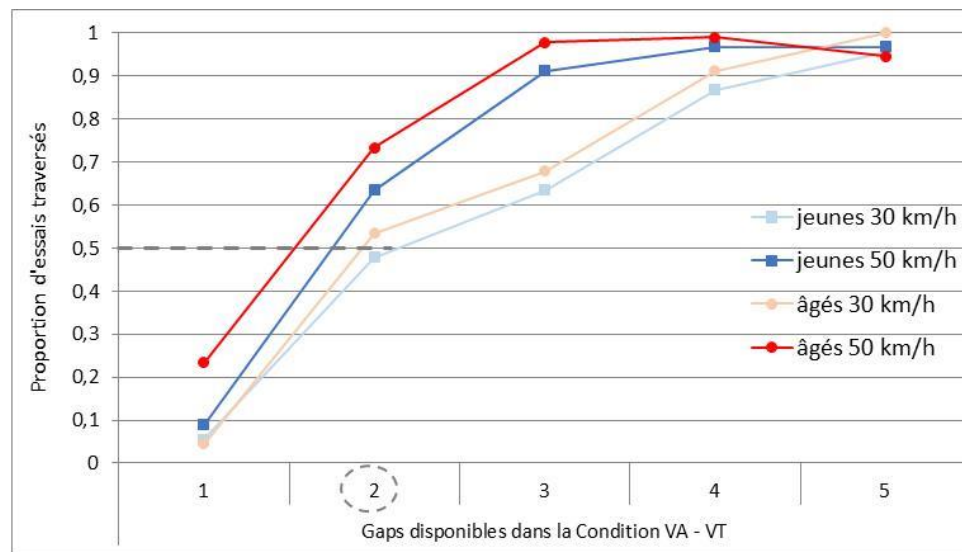
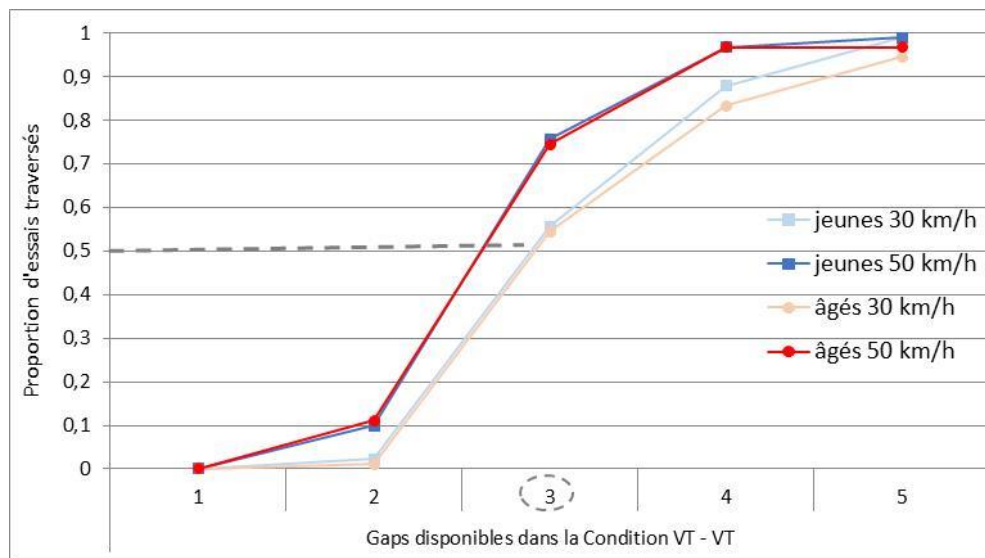
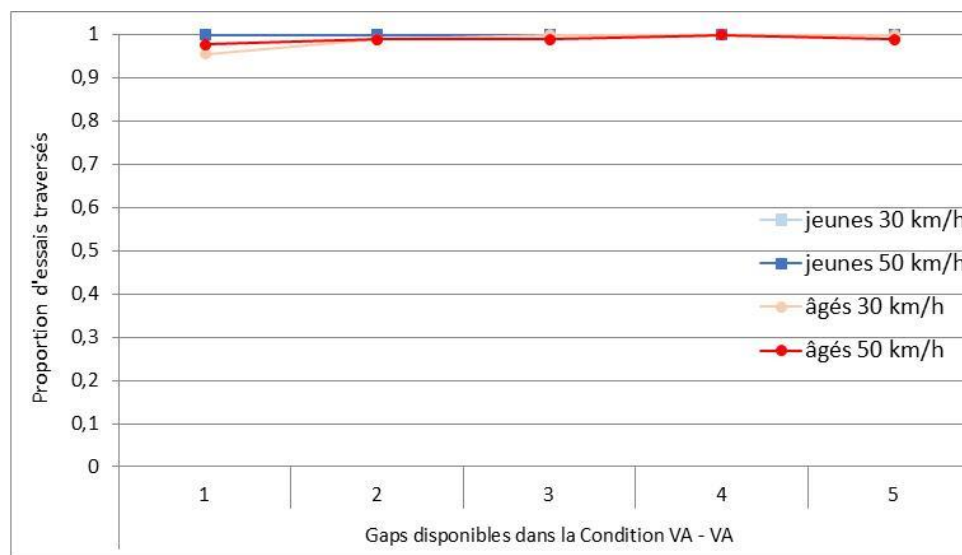
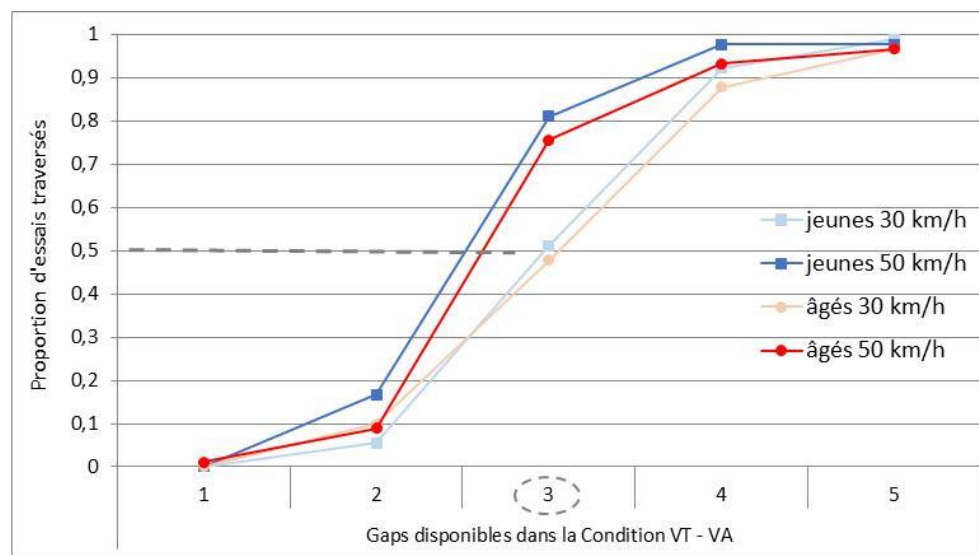


Figure 10. Distribution des choix de traversées de rue (proportion de gaps acceptés) en fonction du groupe d'âge, de la condition de trafic, de la vitesse d'approche des véhicules et du gap disponible



Pour étayer ces propos, le calcul du gap médian accepté par participant dans les conditions VT-VT, VA-VT, et VT-VA s'avère informatif. Pour ce faire, une fonction logistique est appliquée sur les données brutes, c'est-à-dire sur les décisions prises par chaque participant, pour chaque gap et chaque vitesse manipulés. Elle permet de déterminer le point de transition entre « ne pas traverser » et « traverser ».

L'Anova Age (2) x Trafic (3) x Vitesse (2) révèle un effet non significatif de l'Age sur le gap médian accepté ($F(1,58)=0.7$, $p=.80$). Ce résultat n'est pas signe de prudence chez les âgés qui marchent moins vite et sont donc supposés choisir des gaps plus longs pour traverser.

L'effet de la condition de Trafic est significatif, $F(2,116)=138.55$, $p<.001$, $\eta^2=.70$. On retient un gap médian accepté significativement plus court dans la condition VA-VT où un véhicule automatisé laisse le passage en première voie alors qu'un véhicule traditionnel arrive en deuxième voie ($p<.001$). Les participants acceptent ici de traverser la voie éloignée pour un gap moyen de l'ordre de 2 secondes seulement, contre 3 dans les autres conditions.

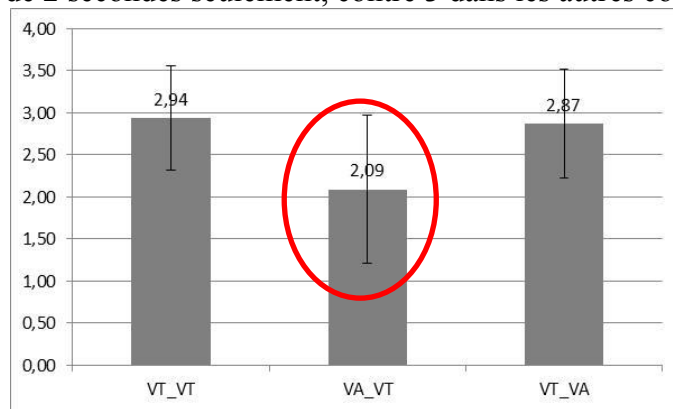


Figure 11. Moyenne des gaps médians acceptés en fonction du trafic

L'effet de la Vitesse est significatif, $F(1,58)=109.20$, $p<.001$, $\eta^2=.65$, avec un gap médian accepté plus court à 50 km/h ($M=2.39s$, $ET=0.75$) qu'à 30km/h ($M=2.88s$, $ET=0.82$).

L'interaction Age x Trafic est significative, $F(2,116)=8.45$, $p<.001$, $\eta^2=.13$. La différence inter-âge n'est visible que dans la condition VA-VT où un véhicule automatisé laisse le passage en première voie alors qu'un véhicule traditionnel approche dans la deuxième voie, avec les participants âgés qui optent pour des gaps significativement plus courts dans cette condition que les jeunes ($p=.06$). La diminution du gap accepté en condition VA-VT est significative chez les jeunes comme chez les âgés ($p<.01$) mais elle est plus forte chez les âgés du fait de choix particulièrement courts pour traverser dans cette condition.

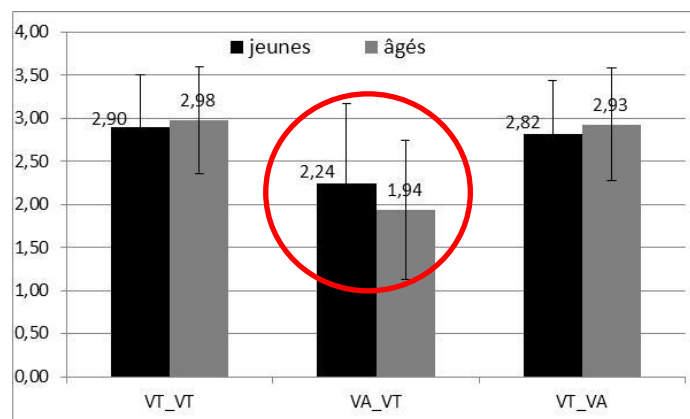


Figure 12. Moyenne des gaps médians acceptés en fonction du trafic et du groupe d'âge

Par contre, l'interaction Age x Vitesse n'est pas significative $F(1,58)=0.18$, $p=.67$, les jeunes comme les âgés montrant des décisions influencées par la vitesse.

L'interaction Trafic x Vitesse est significative, $F(2,116)=9.05$, $p<.001$, $\eta^2=.13$. L'effet vitesse s'observe dans toutes les trois conditions de trafic, mais il est plus fort dans la deuxième, avec un gap médian accepté significativement plus court que dans toutes les autres conditions ($p<.01$).

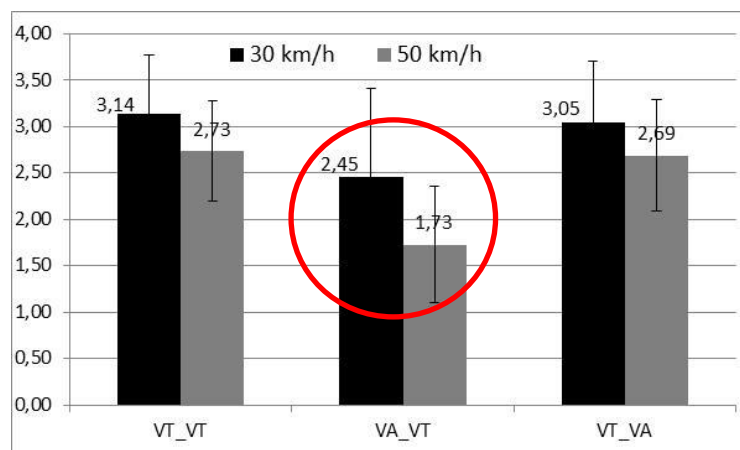


Figure 13. Moyenne des gaps médians acceptés en fonction du trafic et de la vitesse d'approche des véhicules

L'interaction Age x Trafic x Vitesse n'est pas significative $F(2,116)=1.53$, $p=.22$.

Conclusions : L'analyse des gaps acceptés révèle aussi des différences notables entre les conditions de trafic VT-VT, VA-VT, VT-VA (la condition VA-VA qui implique deux véhicules autonomes est exclue de cette analyse car la quasi-totalité des essais a été acceptée). On retient un très net raccourcissement du gap accepté (environ 2 secondes) en condition VA-VT où un véhicule automatisé laisse le passage en première voie alors qu'un véhicule traditionnel arrive en deuxième voie, comparativement aux deux autres conditions VT-VT et VT-VA où on observe un gap médian moyen autour de 3 secondes.

Les analyses ne révèlent pas de différence significative entre les participants jeunes et âgés. Ce résultat n'est pas signe de prudence chez les âgés qui marchent et réagissent moins vite que les plus jeunes. On voit même que les âgés ont tendance à opter pour un gap médian encore plus court que les jeunes en condition VA-VT, les âgés encourant alors un risque important d'entrer en collision avec le véhicule traditionnel à l'approche en voie éloignée.

Le facteur vitesse se révèle à nouveau significatif, avec un net raccourcissement du gap médian accepté à mesure que la vitesse augmente, et encore plus dans la condition VA-VT.

4.3. Collisions

Dans cette analyse, la condition VA-VA où un véhicule automatisé approche et laisse le passage au piéton dans chaque voie n'est pas considérée, aucune décision ne pouvait mener à une collision puisque les véhicules virtuels étaient programmés pour toujours freiner et s'arrêter, aucune défaillance n'était possible. Par contre, le facteur Voie a été ajouté à l'analyse afin de connaître le risque encouru sur chacune des deux voies.

L'Anova Age (2) x Trafic (3) x Vitesse (2) x Voie (2) révèle un effet significatif du groupe d'Age ($F(1,58)=9.22$, $p<.01$, $\eta^2=.14$) sur le pourcentage moyen de collisions, les participants âgés prenant plus de décisions menant à des collisions ($M=1.93\%$, $ET=5.43$) que les participants jeunes ($M=0.71\%$, $ET=3.34$).

L'effet de la condition de Trafic est significatif, $F(2,116)=9.32$, $p<.001$, $\eta^2=.14$. On retient un pourcentage moyen de collisions significativement plus élevé dans la condition VA-VT où un véhicule automatisé laisse le passage en première voie alors qu'un véhicule traditionnel arrive en deuxième voie ($M=2.21\%$, $ET=5.85$, $p<.001$) comparativement aux autres conditions considérées (Condition VT-VT $M=0.98\%$, $ET=3.74$; Condition VT-VA $M=0.77\%$, $ET=3.56$).

L'effet de la Vitesse est significatif, $F(1,58)=7.41$, $p<.01$, $\eta^2=.33$, avec plus de collisions observées à 50 km/h ($M=2.14\%$, $ET=5.69$) qu'à 30km/h ($M=0.5\%$, $ET=2.77$).

L'effet de la Voie est tendanciel, $F(1,58)=2.99$, $p=.089$, avec plus de collisions observées en voie éloignée ($M=1.6\%$, $ET=5$) qu'en voie proche ($M=1.04\%$, $ET=4$).

L'interaction Age x Trafic n'est pas significative ($F(2,116)=0.38$, $p=.68$).

L'interaction Age x Vitesse est significative, $F(1,58)=7.41$, $p<.01$, $\eta^2=.11$, avec un effet de la vitesse plus marqué chez les participants âgés que chez les participants jeunes. Alors que les collisions observées chez les participants jeunes ne varient pas significativement en fonction de la vitesse, celles des âgés mènent significativement à plus de collisions à 50km/h qu'à 30 km/h.

L'interaction Age x Voie n'est pas significative, $F(1,58)=0.38$, $p=.40$.

L'interaction Trafic x Vitesse est significative, $F(2,116)=6$, $p<.01$, $\eta^2=.09$, avec un effet de la vitesse plus marqué dans la condition VA-VT que dans les autres conditions.

L'interaction Trafic x Voie est significative, $F(2,116)=37.7$, $p<.001$, $\eta^2=.39$, avec un effet de la voie plus marqué dans la condition VA-VT que dans les autres conditions.

L'interaction Age (2) x Trafic (3) x Vitesse (2) x Voie (2) est proche de la significativité $F(2,116)=3.05$, $p=.051$, $\eta^2=.05$. Les collisions sont majoritairement observées en condition VA-VT, et en voie 2 où approche un véhicule traditionnel à 50 km/h, chez les jeunes et encore plus chez les âgés. On observe moins de collisions dans les autres conditions, et des patterns semblables entre la condition VT-VT et VT-VA, avec des collisions principalement en voie 1 à 50 km/h et chez les âgés en particulier. Par contre, la condition VT-VA qui présente un véhicule automatisé en voie 2 ne mène pas à plus de collisions en voie 1 avec le véhicule traditionnel, comparativement à la condition contrôle VT-VT de trafic conventionnel dans les deux voies, chez les jeunes comme les âgés. La présence d'un véhicule automatisé en voie éloignée n'engendre donc pas de prise de risque supplémentaire en voie proche avec des véhicules traditionnels. Au contraire, la présence d'un véhicule automatisé en voie proche engendre des prises de risque supplémentaires en voie éloignée avec des véhicules traditionnels, chez les âgés en particulier, et à 50 km/h surtout.

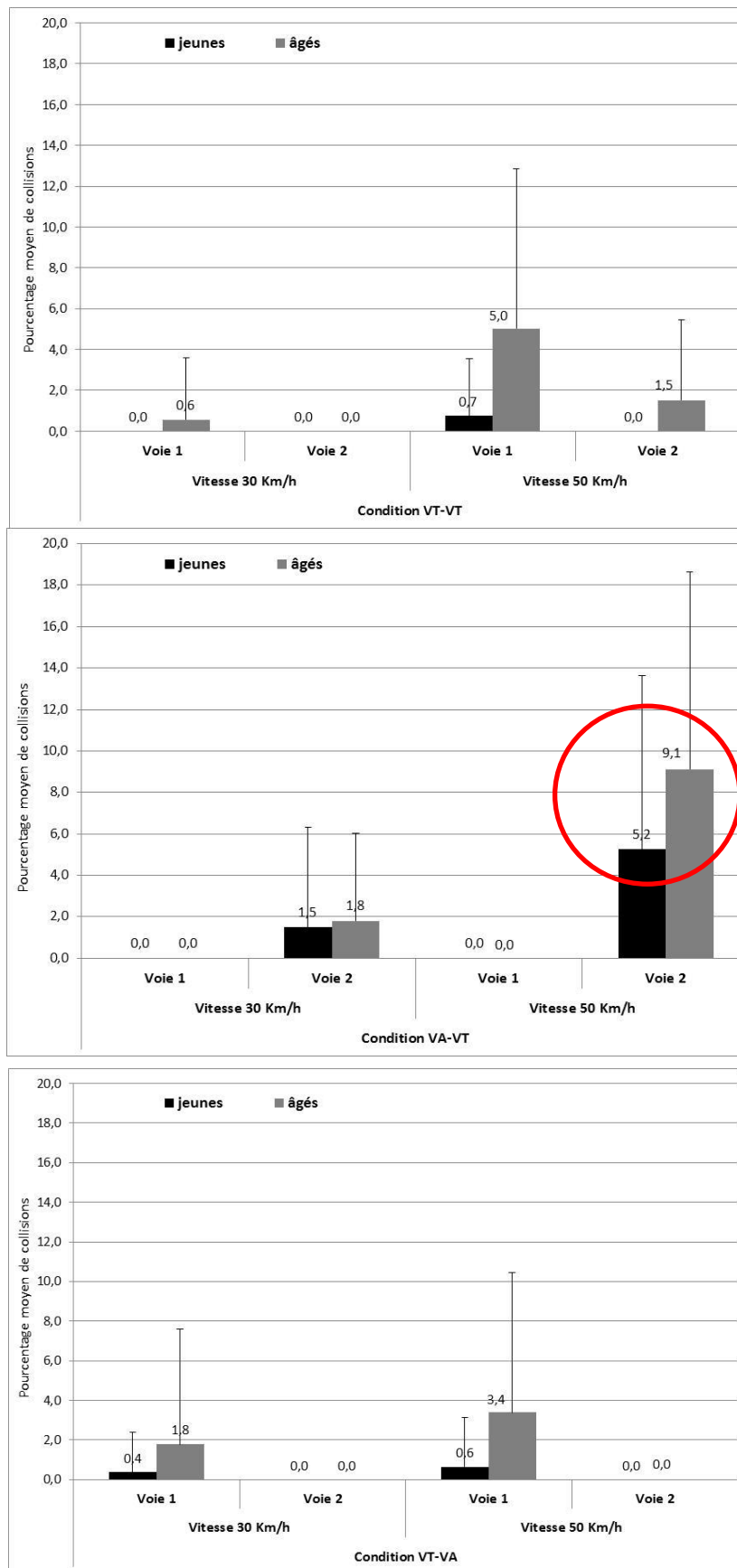


Figure 14. Moyenne des collisions en fonction du trafic, de la vitesse, du groupe d'âge et de la voie.

Sur les 7200 décisions prises au total par les 60 participants, 103 décisions, soit 1.43% des décisions, ont donné lieu à une collision (virtuelle). Si fort heureusement seulement 1.43% des décisions prises par les 60 participants mènent à des collisions, l'analyse détaillée de ces décisions peut nous renseigner sur les effets des variables que nous avons manipulées, à savoir la composition du trafic à l'approche et l'âge des participants.

En analysant plus en détail ces 103 décisions, on observe que la plupart (53 décisions, soit 51.46% des décisions) concerne spécifiquement la condition VA-VT où approche un véhicule automatisé en voie 1 qui laisse le passage au piéton qui, lui, décide de traverser toute la rue alors qu'en voie 2 approche un véhicule traditionnel à 50 km/h. Sur ces 53 décisions, quasiment toutes correspondent à une traversée alors que le temps inter-véhiculaire est de 1 (24 décisions) ou 2 secondes (28 décisions) dans la voie éloignée. Sur ces 53 décisions très dangereuses, 18 émanent de participants jeunes (33.96%) et 35 de participants âgés (66.04%). L'examen de la position du piéton au moment de la collision révèle que presque tous les participants se trouvaient en sortie de zone critique au moment où l'impact s'est produit (la zone critique correspond à la zone d'impact potentiel, soit la largeur du véhicule à l'approche), autant les jeunes (16/18=88.89%) que les âgés (30/35=85.7%).

Pour ce qui concerne les collisions observées en voie 1, elles sont moins nombreuses. Elle représente 33% (34/103) des décisions totales menant à une collision. Elles ont toutes lieu dans les conditions VT-VT et VA-VA, principalement lorsque le véhicule approche à 50 km/h (27/34=79.4%). Elles impliquent majoritairement les participants âgés (29/34=85.3%), comparativement aux plus jeunes (5/34=14.7%). Elles concernent toutes le choix de franchir un gap trop court de seulement 1 secondes (1 décisions), 2 secondes (18 décisions) ou 3 secondes (15 décisions). L'examen de la position du piéton au moment de la collision révèle que presque tous les participants se trouvaient en sortie de zone critique au moment où l'impact s'est produit, autant les jeunes (5/5=100%) que les âgés (23/29=79.3%).

Ces analyses plus détaillées des collisions révèlent à nouveau le caractère très dangereux de certaines décisions prises par les participants dans la condition VA-VT où le véhicule automatisé laisse le passage en voie proche alors que des véhicules traditionnels approchent en voie éloignée. Tout se passe ici comme si les participants saisissaient l'opportunité offerte par le véhicule automatisé en voie proche sans suffisamment considérer les véhicules traditionnels qui approchaient rapidement en voie éloignée, à des intervalles inter-véhiculaire très courts. Pour ce qui concerne les conditions VT-VT et VT-VA où approchaient en voie proche des véhicules traditionnels, on retient ici des prises de décisions défaillantes chez les âgés principalement, qui se laissent piéger par la vitesse élevée associée à de grandes distances alors que le temps offert pour traverser est trop court pour eux.

Conclusions : L'analyse des collisions révèle des différences notables entre les conditions de trafic. On observe la plupart des collisions en condition VA-VT, sur la deuxième voie où approche un véhicule traditionnel à vitesse élevée, alors qu'un véhicule automatisé a laissé le passage au piéton en première voie, comparativement aux autres conditions de trafic.

Les données révèlent significativement plus de collisions chez les participants âgés. Les collisions des âgés ont le plus souvent lieu en condition VA-VT, dans la voie éloignée où approche un véhicule traditionnel à vitesse élevée alors qu'un véhicule automatisé leur a laissé le passage en voie 1. Les jeunes aussi tendent à émettre des décisions dangereuses dans cette condition VA-VT, sur la voie éloignée, à vitesse élevée, mais moins que les âgés.

Dans le cas du trafic traditionnel (condition VT-VT et condition VT-VA en voie 1), on observe un nombre élevé de collisions en voie 1, et à 50 km/h notamment. Si l'effet de la vitesse est classique, celui de la voie l'est moins (on observe d'habitude plus de risque en voie éloignée, avec des décisions principalement basées sur la voie proche, négligeant le trafic éloigné, cf. Dommes et al., 2014, 2015). La présence de véhicules automatisés dans tout le protocole de l'étude a semblé influencer la prise de décision même en trafic traditionnel, la rendant plus complexe.

4.4. Moment d'initiation

Cet indicateur rend compte du moment où le piéton initie sa marche en référence au véhicule qui précède la voiture devant laquelle il traverse. Une valeur négative témoigne d'une anticipation. Prenons l'exemple d'une valeur de -0.8sec. Dans ce cas, le piéton a initié sa traversée 0.8 seconde avant que le véhicule qui ouvre le gap ne parvienne à sa hauteur. Une valeur positive signifie que le piéton a attendu que la voiture qui ouvre le gap le dépasse. Dans l'exemple d'une valeur de +0.5 sec, le piéton a initié sa traversée 0.5 seconde après que le véhicule qui ouvre le gap parvienne à sa hauteur.

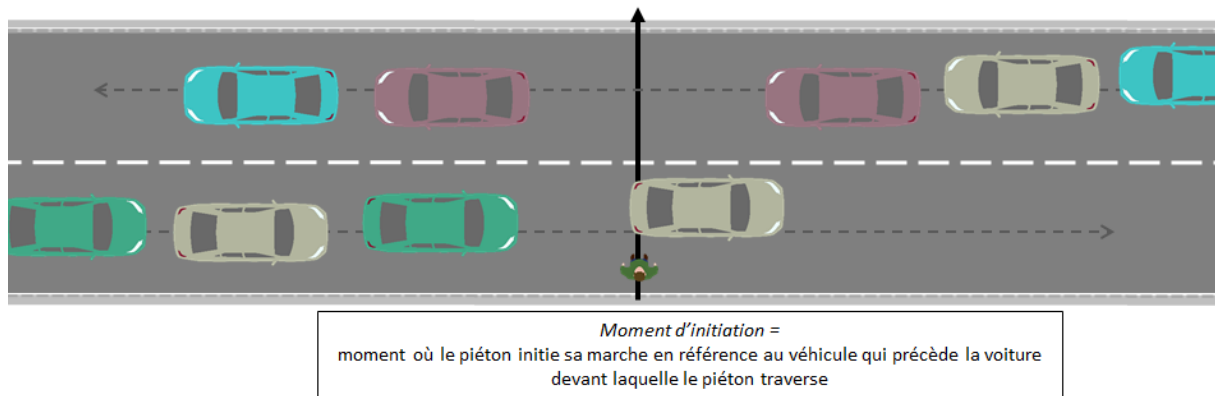


Figure 15. Calcul du moment d'initiation

L'Anova Age (2) x Trafic (4) x Vitesse (2) ne révèle pas d'effet significatif du Groupe d'âge ($F(1,58)=0.15$, $p=.69$).

L'effet de la condition de Trafic est significatif, $F(3,174)=35.81$, $p<.001$, $\eta^2=.38$. On retient un allongement significatif ($p<.01$) du moment d'initiation dans la condition VA-VA où un véhicule automatisé laisse le passage au piéton dans les deux voies ($M=-0.04$ sec., $ET=0.56$) comparativement aux autres conditions considérées (Condition VT-VT $M=-0.43$ sec., $ET=0.22$; Condition VA-VT $M=-0.44$ sec., $ET=0.25$, Condition VT-VA $M=-0.43$ sec., $ET=0.19$).

L'effet de la Vitesse est significatif, $F(1,58)=29.49$, $p<.01$, $\eta^2=.34$, avec un ralentissement significatif du moment d'initiation à 50 km/h ($M=-0.30$ sec, $ET=0.35$) comparativement à 30km/h ($M=-0.38$ sec, $ET=0.40$).

L'interaction Age x Trafic est significative, $F(3,174)=8.48$, $p<.001$, $\eta^2=.13$. Alors que les différences inter-âges ne sont pas significatives dans les conditions VT-VT, VA-VT, et VT-VA, dans la condition VA-VA, les participants jeunes initient significativement plus tardivement que les âgés ($p<.01$).

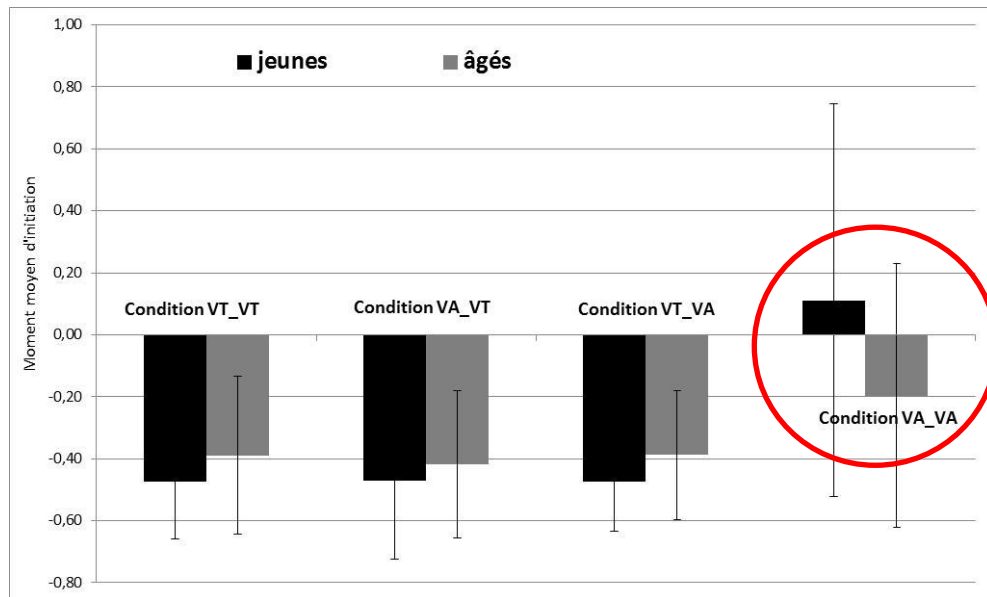


Figure 16. Moment d'initiation moyen en fonction du trafic et du groupe d'âge

L'interaction Age x Vitesse est non significative, $F(1,58)=0.08$, $p=.94$.

L'interaction Trafic x Vitesse est significative, $F(3,174)=3.6$, $p<.05$, $\eta^2=.06$. L'effet de la vitesse n'est pas significatif en condition 4, alors qu'il l'est dans les trois autres conditions ($p<.01$).

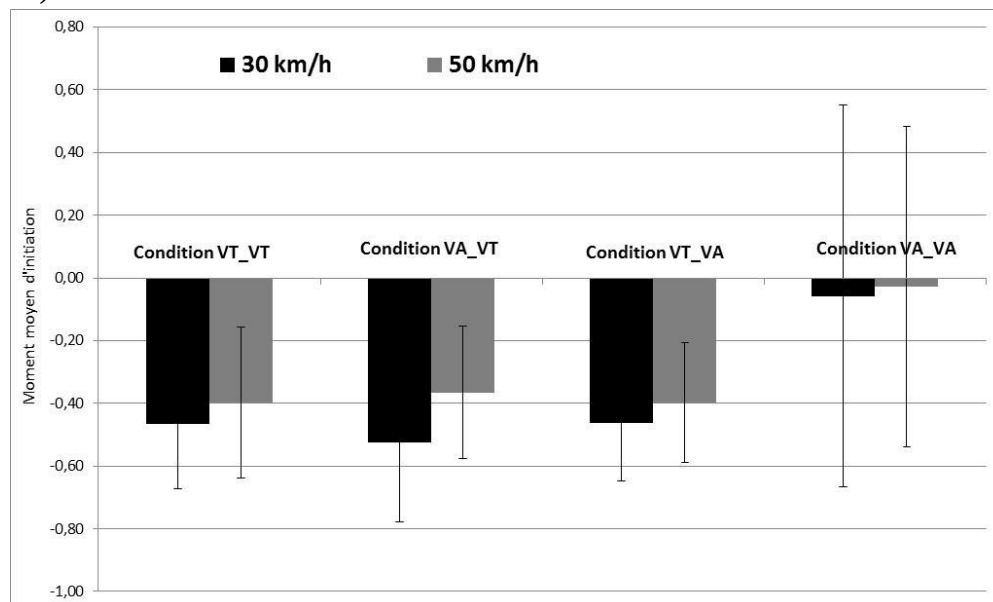


Figure 17. Moment d'initiation moyen en fonction du trafic et de la vitesse

L'interaction Age x Trafic x Vitesse est non significative, $F(3,174)=1.59$, $p=.19$.

L'étude des moments d'initiation en fonction du gap disponible (voir les quatre graphiques à la page suivante) révèle des patterns d'initiation différents selon la condition de trafic. Dans les conditions de trafic VT-VT, VA-VT et VT-VA, où un véhicule traditionnel est présent sur l'une des deux voies, ou sur les deux, les initiations sont anticipatoires : le piéton démarre sa traversée avant que le véhicule qui ouvre le gap passe à sa hauteur. Au contraire, dans la condition VA-VA où un véhicule automatisé cède le passage au piéton dans chaque voie, on observe des moments d'initiation très tardifs pour les gaps 1, 2 et 3 secondes (c'est-à-dire en dessous du gap médian), chez les participants jeunes particulièrement. Il semblerait que les piétons attendent de percevoir l'arrêt du véhicule automatisé pour traverser si celui-ci freine brutalement à une courte distance d'approche (gaps courts).

Conclusions : L'analyse des moments d'initiation révèle aussi des différences notables entre les conditions de trafic. Dans les conditions de trafic VT-VT, VA-VT, et VT-VA, où un véhicule traditionnel est présent sur l'une des deux voies, ou sur les deux, les initiations sont anticipatoires, le piéton démarre sa traversée avant que le véhicule qui ouvre le gap ne passe à sa hauteur. Au contraire, dans la condition VA-VA où un véhicule automatisé cède le passage au piéton dans chaque voie, on observe des moments d'initiation plus tardifs, et cela surtout dans le cas des gaps courts (1, 2 et 3 secondes), et chez les participants jeunes encore plus particulièrement. Il semblerait que les piétons soient méfiants, et attendent de percevoir l'arrêt du véhicule automatisé pour traverser dans le cas où celui-ci approche à une courte distance et freine brutalement (gaps courts).

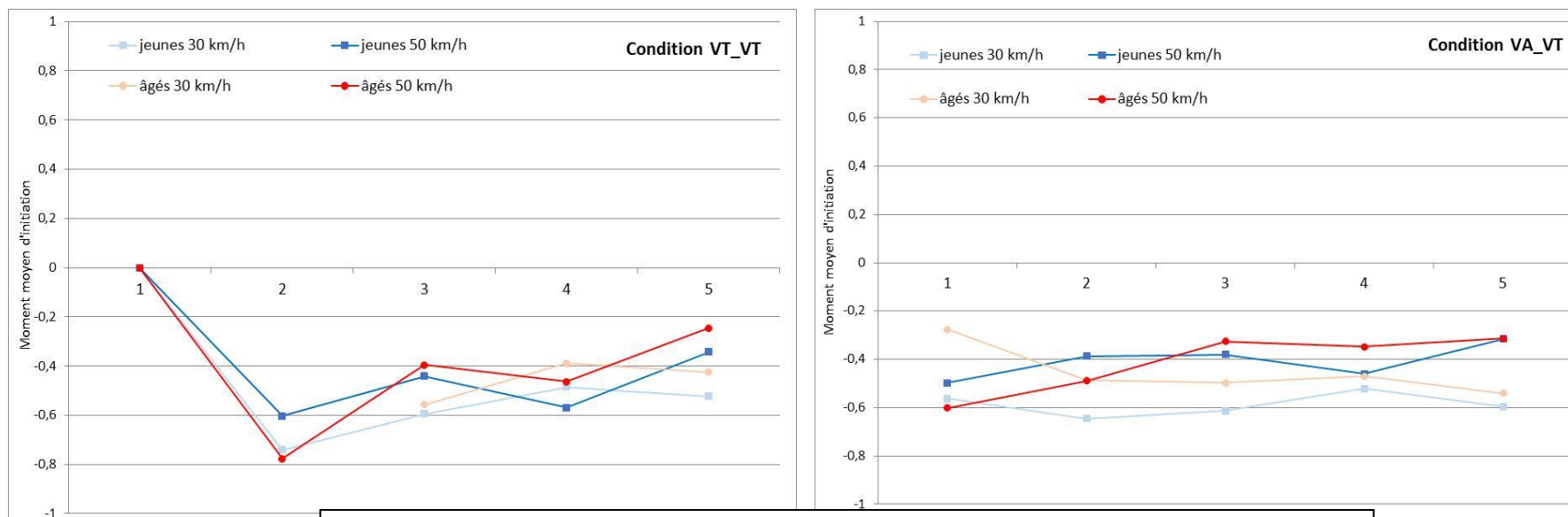
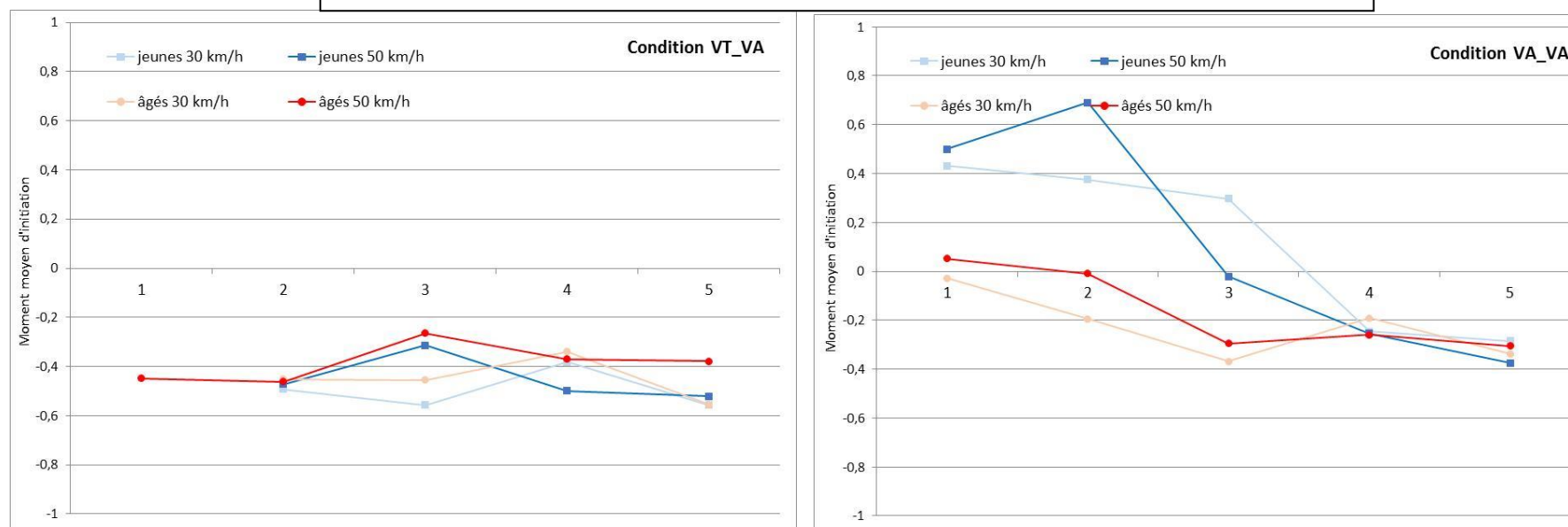


Figure 18. Distribution des moments moyens d'initiation en fonction du groupe d'âge, de la condition de trafic et de la vitesse d'approche des véhicules



4.5. Temps de traversée

L'Anova Age (2) x Trafic (3) x Vitesse (2) x Voie (2) révèle un effet significatif du groupe d'Age $F(1,58)=4.48$, $p<.05$, $\eta^2=.07$. On observe que les participants jeunes traversent la rue plus rapidement ($M=2.12$ sec., $ET=0.34$) que les participants âgés ($M=2.27$ sec., $ET=0.31$). A noter que la différence est légère, mais notable. Dommes (2019) a récemment montré que les piétons âgés privilégient la marche rapide lorsqu'ils traversent la rue, pour éviter de passer du temps sur la chaussée, au détriment de l'observation conjointe de la circulation approchante qui impose des contraintes attentionnelles fortes et réduirait alors la vitesse de marche.

L'effet de la condition de Trafic est significatif, $F(3,174)=127.63$, $p<.001$, $\eta^2=.69$. On retient un allongement significatif ($ps<.01$) du temps de traversée dans la condition VA-VA où un véhicule automatisé laisse le passage au piéton dans les deux voies comparativement aux autres conditions considérées.

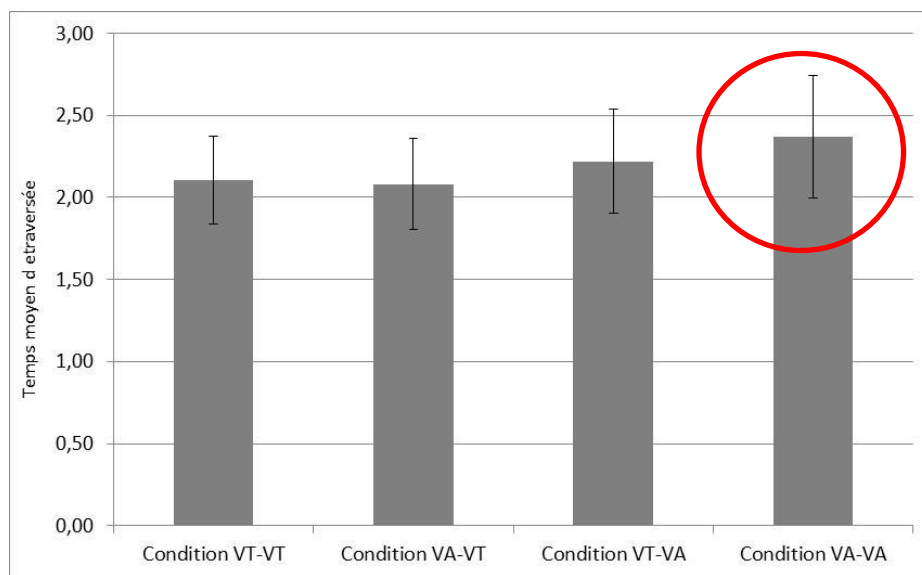


Figure 19. Temps de traversée moyen en fonction de la condition de trafic

L'effet de la Vitesse est significatif, $F(1,58)=19.58$, $p<.001$, $\eta^2=.25$, avec un léger allongement du temps de traversée à 50 km/h ($M=2.21$ sec., $ET=0.32$) comparativement à 30km/h ($M=2.18$ sec., $ET=0.34$).

L'effet de la Voie est significatif, $F(1,58)=132.48$, $p<.001$, $\eta^2=.70$, avec un léger raccourcissement du temps de traversée en voie 2 ($M=2.13$ sec., $ET=0.32$) comparativement à la voie 1 ($M=2.26$ sec., $ET=0.33$).

L'interaction Age x Trafic n'est pas significative, $F(3,174)=0.82$, $p=.48$.

Au contraire, l'interaction Age x Vitesse est significative, $F(1,58)=8.17$, $p<.01$, $\eta^2=.12$. Alors que le temps de traversée ne varie pas en fonction de la vitesse chez les participants jeunes, les participants âgés marchent significativement plus lentement dans le cas où les véhicules approchent à 50 km/h plutôt qu'à 30 km/h.

L'interaction Age x Voie est significative, $F(1,58)=3.88$, $p=.05376$, $\eta^2=.06$. Cependant le raccourcissement significatif du temps de traversée en voie 2 comparativement à celui relevé en voie 1 est significatif chez les jeunes comme les âgés.

L'interaction Trafic x Vitesse est significative, $F(3,174)=16.94$, $p<.001$, $\eta^2=.23$. L'effet de la vitesse s'observe significativement et principalement dans les conditions VT-VT et VA-VT.

L'interaction Trafic x Voie est significative, $F(3,174)=34.32$, $p<.001$, $\eta^2=.37$. Cependant, l'effet de la voie s'observe significativement dans toutes les conditions.

L'interaction Trafic x Vitesse x Voie est significative, $F(3,174)=2.572$, $p<.05$, $\eta^2=.04$. Cependant, les comparaisons post-hoc n'apporte rien de plus par rapport aux résultats précédemment exposés.

L'interaction Age x trafic x Voie est significative, $F(3,174)=2.95$, $p<.05$, $\eta^2=.05$. Cependant, les comparaisons post-hoc n'apporte rien de plus par rapport aux résultats précédemment exposés.

L'interaction Age x Trafic x Vitesse x Voie n'est pas significative, $F(3,174)=0.28$, $p=.84$.

Conclusions : L'analyse des temps de traversées révèle aussi des différences entre les conditions de trafic, avec, surtout, un allongement notable du temps de traversée dans la condition VA-VA où approche un véhicule automatisé dans chaque voie, comparativement aux autres conditions de trafic. Cet allongement pourrait témoigner d'un sentiment de méfiance, à confirmer par l'analyse des autres données collectées pendant l'étude.

On retient aussi que les participants âgés traversent la rue globalement et significativement plus lentement que les participants jeunes. Même si la différence est minime, elle est notable. Les piétons âgés semblent en effet privilégier la marche rapide lorsqu'ils traversent la rue, pour éviter de passer du temps sur la chaussée, au détriment de l'observation conjointe de la circulation approchante qui impose des contraintes attentionnelles fortes et pourrait alors réduire la vitesse de marche (voir Dommes, 2019).

On retient également un effet significatif de la vitesse, avec un léger allongement du temps de traversée dans le cas des vitesses élevées d'approche du véhicule.

On retient enfin un effet de la voie, avec un léger raccourcissement du temps de traversée en voie éloignée.

5. Analyses des données verbales déclaratives

5.1. Réponses au questionnaire mesurant l'acceptabilité générale des participants envers les véhicules automatisés (PRQF, Deb et al., 2017)

Pour rappel, les participants évaluent des énoncés par l'intermédiaire d'une échelle allant de 1 (fortement en désaccord) à 7 (tout à fait d'accord), le score 4 étant neutre. Un score plus élevé représente une plus grande acceptabilité envers les véhicules automatisés.

Concernant les attitudes, l'Anova Groupe d'Age (2) ne révèle pas de différences significatives entre les jeunes et les âgés, $F(1,58)=0.11$, $p=.74$. Les attitudes générales envers les véhicules automatisés sont plutôt positives autant chez les participants jeunes ($M=5.23$, $SD=1.25$) que âgés ($M=5.33$, $SD=0.95$).

L'effet de l'âge ne se révèle pas significatif non plus ($F(1,58)=1.85$, $p=.18$) sur le score moyen des items relatifs aux normes sociales, i.e. la perception des individus de ce que les personnes importantes pour eux pensent à propos des véhicules automatisés. Les réponses étaient neutres autant chez les jeunes ($M=4.29$, $SD=1.02$) que les âgés ($M=4.68$, $SD=1.15$).

L'effet de l'âge ne se révèle pas significatif non plus ($F(1,58)=0.01$, $p=.97$) sur le score moyen des items de la catégorie confiance. Les scores moyens de confiance, i.e. la perception des individus de la capacité d'un véhicule entièrement automatisé à accomplir sa tâche prévue avec une grande efficacité, étaient plutôt neutres, autant chez les participants jeunes ($M=4.66$, $SD=1.28$) que âgés ($M=4.67$, $SD=1.18$).

L'effet de l'âge se révèle tendanciel ($F(1,58)=3.69$, $p=.06$, $\eta^2=.06$) sur les scores moyens des items relatifs à la compatibilité i.e., la mesure avec laquelle un véhicule entièrement automatisé est perçu comme étant conforme au système de transport existant. Les participants âgés ont montré des plus hauts scores ($M=4.38$, $SD=1.19$) que les jeunes ($M=3.68$, $SD=1.55$), à noter que les scores sont toutefois très neutres.

Enfin, l'effet de l'âge ne se révèle pas significatif ($F(1,58)=0.05$, $p=.82$) sur les scores moyens des participants aux items relevant de la catégorie efficacité du système, i.e. la mesure avec laquelle un véhicule entièrement automatisé peut détecter avec succès les piétons et les autres obstacles sur la route, s'arrêter pour eux et / ou leur permettre de se déplacer en toute sécurité. Les scores moyens étaient en moyenne positifs chez les jeunes ($M=5.16$, $SD=0.90$) comme les âgés ($M=5.21$, $SD=0.81$).

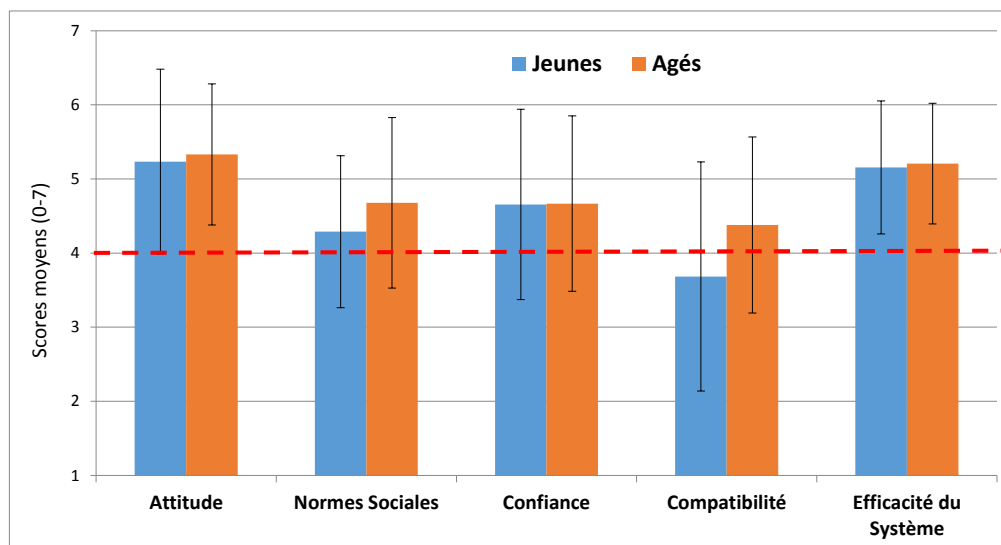


Figure 20. Scores moyens au questionnaire mesurant l'acceptabilité générale des participants envers les véhicules automatisés (PRQF, Deb et al., 2017)

Conclusions : L'analyse des réponses des participants au questionnaire PRQF, qui visait à mesurer l'acceptabilité des véhicules automatisés, en général, révèle des perceptions plutôt positives pour les attitudes et plutôt neutres pour ce qui concerne la confiance. Ces données déclaratives peuvent entrer en contradiction avec certaines des données comportementales relevées sur le simulateur pendant la tâche de traversée de rue, où on observait que les participants montraient des comportements hésitants et méfiants dans la condition VA-VA particulièrement où approchait un véhicule automatisé dans chaque voie.

5.2. Réponses des participants aux questions portant sur la perception des véhicules automatisés virtuels créés pour l'expérimentation

Quatre questions posées dans le questionnaire de fin de l'étude ont particulièrement retenu notre attention, à savoir :

« Avez-vous eu confiance en ces véhicules autonomes que nous avons créés ? »

« Vous êtes-vous senti(e) en sécurité face à ces véhicules autonomes que nous avons créés ? »

« Avez-vous ressenti du stress en traversant face à ces véhicules autonomes que nous avons créés ? »

« Avez-vous pu anticiper le comportement des véhicules autonomes que nous avons créés ? »

Les participants répondaient en mettant une croix sur une échelle de 10 cm allant de « pas du tout » à « énormément ».

L'Anova Age 2 (jeunes / âgés) ne révèle pas de différences significatives entre les jeunes et les âgés $F(1,58)=0.75$, $p=.39$ sur la confiance des participants envers le véhicule virtuel automatisé que nous avons créé, la confiance étant élevée dans les deux groupes (cf. Figure 21 ci-dessous).

L'Anova Age 2 (jeunes / âgés) ne révèle pas de différences significatives entre les jeunes et les âgés $F(1,58)=0.46$, $p=.51$ sur la sécurité perçue des participants envers le véhicule virtuel automatisé que nous avons créé, la sécurité perçue étant élevée dans les deux groupes (cf. Figure 21 ci-dessous).

L'Anova Age 2 (jeunes / âgés) ne révèle pas de différences significatives entre les jeunes et les âgés $F(1,58)=0.01$, $p=.93$ sur le stress perçu des participants face au véhicule virtuel automatisé que nous avons créé, le stress perçu étant faible dans les deux groupes (cf. Figure 21 ci-dessous).

L'Anova Age 2 (jeunes / âgés) ne révèle pas de différences significatives entre les jeunes et les âgés $F(1,58)=1.54$, $p=.22$ sur la prédictibilité perçue du comportement du véhicule virtuel automatisé que nous avons créé, la prédictibilité perçue étant élevée dans les deux groupes (cf. Figure 21 ci-dessous).

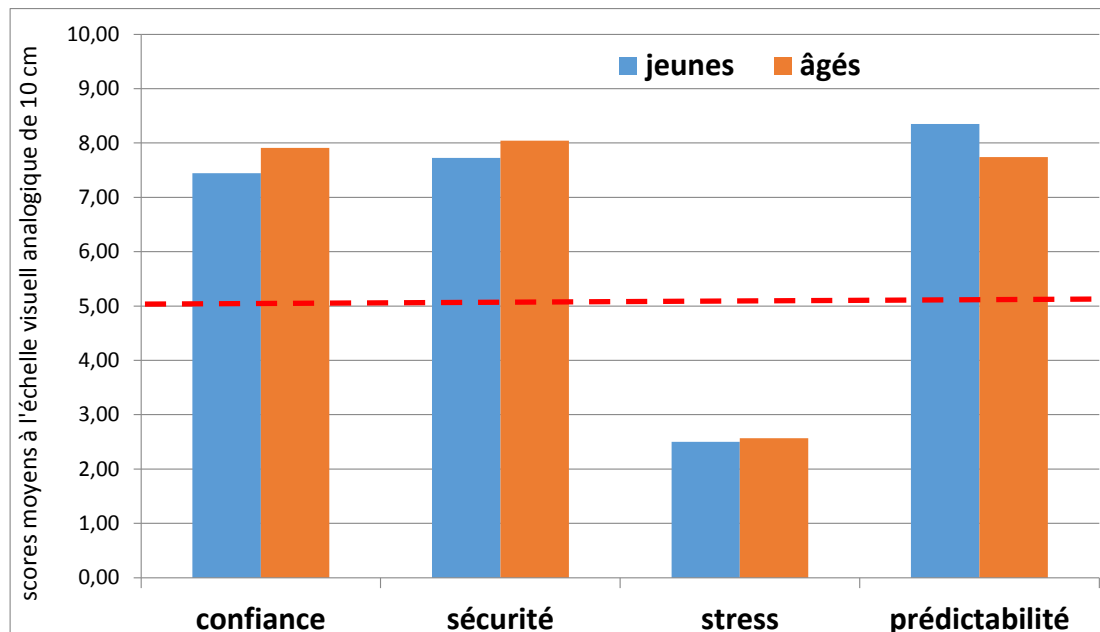


Figure 21. Scores moyens aux questions de fin d'étude portant sur la perception des véhicules automatisés virtuels créés pour l'expérimentation

Conclusions : L'analyse des réponses des participants aux questions portant sur la perception des véhicules automatisés virtuels créés pour l'expérimentation révèle, en général, des perceptions positives en termes de confiance et de sécurité perçues. Le niveau de stress perçu était par ailleurs faible. Enfin, les participants s'accordent tous à dire que les véhicules virtuels automatisés créés pour l'étude adoptaient un comportement très prédictible. Ces données déclaratives semblent donc également, comme celles issues du questionnaire mesurant l'acceptabilité générale des participants envers les véhicules automatisés (PRQF, Deb et al., 2017), entrer en contradiction avec certaines des données comportementales relevées sur le simulateur pendant la tâche de traversée de rue, où on observait que les participants montraient des comportements hésitants et méfiants dans la condition VA-VA particulièrement où approchait un véhicule automatisé dans chaque voie.

6. Analyses des données physiologiques

6.1. Prétraitement des données

La qualité des enregistrements de l'électrocardiogramme (ECG) et de la réaction électrodermale (RED) était faible, ce qui a engendré une perte de 9.79% de la totalité des enregistrements. Malgré l'utilisation de filtres permettant d'améliorer le signal enregistré, nous avons eu 1230 enregistrements inexploitable sur les 7200 enregistrements de 20 secondes, ce qui représente une perte de 17% de l'échantillon. L'enregistrement des données physiologiques a été fortement impacté par les mouvements des participants. Une partie du signal n'était pas reçu par le dispositif d'enregistrement, et il y a eu par ailleurs beaucoup d'artefacts associés aux mouvements des participants.

Les données ECG recueillies ont été traitées à la fois en termes de fréquence cardiaque et d'analyse de la variabilité de la fréquence cardiaque (analyse fréquentielle du rythme cardiaque). Nous avons considéré les variables suivantes : fréquence cardiaque (FC), haute fréquence (HF), basse fréquence (LF), rapport LF/HF, moyenne quadratique des intervalles R-R successif (RMSSD). Les données RED ont été traitées à partir du β de régression linéaire de chaque enregistrement.

6.2. Modèles statistiques utilisées pour l'analyse des données physiologiques

En raison des pertes importantes dans nos données (uniquement 83% de l'échantillon exploitable), nous avons utilisé des modèles mixtes pour l'ensemble du traitement des données physiologiques (ECG et RED). Pour chacune des analyses, nous avons utilisé les conditions de trafic (4 modalités : VT-VT, VA-VT, VT-VA, VA-VA), le gap (5 modalités : 1s, 2s, 3s, 4s, 5s), la vitesse de circulation (2 modalités : 30km/h, 50km/h), l'âge des participants (2 modalités : jeunes, âgés), la traversée (2 modalités : traversée, non-traversée) comme variables fixes, et les participants comme variable aléatoire.

6.3. Résultats et analyses

Fréquence cardiaque

Les analyses statistiques révèlent un effet principal de la traversée sur la fréquence cardiaque (FC), $F(1,5620.34)=112.14$, $p<.001$, avec une fréquence cardiaque plus forte en cas de traversée ($M=82.2$, $SEM=1.64$) qu'en cas de non-traversée ($M=78.84$, $SEM=1.65$). Les autres effets obtenus tels que l'augmentation de la fréquence cardiaque pour les gaps les plus courts en cas de traversée, $F(4,5620.34)=4.738$, $p<.001$, peuvent s'expliquer par une vitesse de marche plus rapide.

Analyse de la variabilité de la fréquence cardiaque

L'analyse du rapport basses fréquences / hautes fréquences (LF/HF) présente deux effets principaux. Nous observons un effet du fait de traverser, $F(1, 637,94)=33.78$, $p<.001$, avec un rapport LF/HF plus important en cas de traversée ($M=10.77$, $SEM=.79$) qu'en cas de non traversée ($M=5.01$, $SEM=.97$). Nous retenons également un effet principal de l'âge des participants, $F(1,78.804)=10.81$, $p<.002$, les participant les plus jeunes ont présenté un rapport LF/HF plus faible ($M=5.58$, $SEM=1.11$) que les participants âgés ($M=10.8$, $SEM=1.14$). Un effet d'interaction entre le fait de traverser et l'âge de participants a été retrouvé, $F(1,647.0)=15.84$, $p<.001$, où les participants les plus âgés présentaient une forte augmentation du rapport LF/HF (non-traversée : $M=5.84$, $SEM=1.37$; traversée : $M=14.96$,

SEM=1.14) lorsqu'ils traversent contrairement aux participants les plus jeunes (non-traversée : M=4.16, SEM=1.37 ; traversée : M=6.70, SEM=.09).

L'analyse statistique effectuée à partir des HF ne présente pas d'effet significatif contrairement à l'analyse effectuée à partir des LF. Nous retenons un effet principal du fait de traverser sur les LF, $F(1,5628.45)=44.27$, $p<.001$, avec une augmentation du LF (M=1400,22, SEM=118.22) en cas de traversée en comparaison au cas de non-traversée (M=704.04, SEM=129.7). L'analyse du RMSSD ne présente pas d'effet significatif.

Réaction électrodermale (RED)

Concernant la RED, nous retenons un effet principal de la traversée, $F(1,5673.76)=25.15$, $p<.001$, avec une augmentation de la RED (M=0.007, SEM=0.001) en cas de traversée en comparaison aux cas de non-traversée (M=-0.005, SEM=0.002). Nous obtenons également un effet principal du gap, $F(1,5651.60)=3.38$, $p=.009$, ainsi qu'un effet d'interaction entre la traversée et le gap, $F(4,5650.759)=2.77$, $p=.026$. Nous avons observé une augmentation plus importante de la RED dans le cas de traversée sur des gaps courts que sur des gaps long (Figure 22 ci-dessous) L'augmentation de la RED et de sa variabilité dans le cas d'un gap de 5s et de non-traversée peut s'expliquer par le faible nombre d'observations pour ce cas de figure (n = 26).

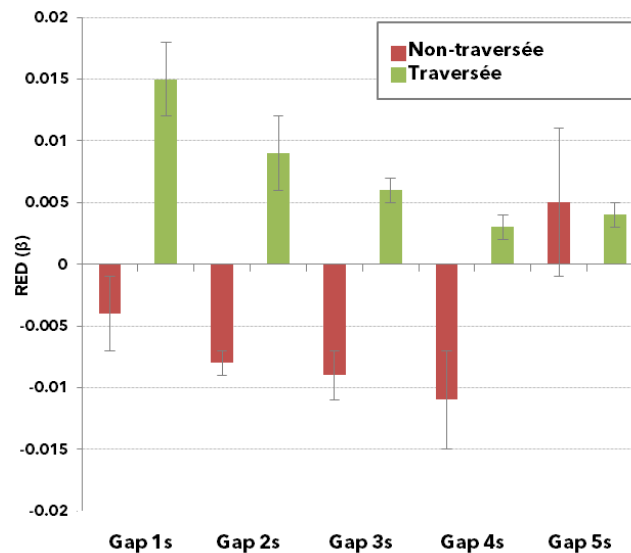


Figure 22. Evolution de la réponse électrodermale (RED) en fonction du gap et de la traversée de la rue

Conclusions : Le traitement des données physiologiques s'est avéré complexe, avec beaucoup de données perdues. Les résultats montrent surtout des modifications physiologiques associées aux mouvements de marche des participants. On retient un effet de l'âge et de la marche sur les mesures recueillies. En effet, l'augmentation de la fréquence cardiaque et du rapport basses fréquences /hautes fréquences lors de traversée, ainsi que l'évolution de la réponse électrodermale en fonction du gap et de la traversée de la rue vont dans le sens d'une activation physiologique associée au mouvement. De manière générale, les situations de gaps courts ont impliqué une activation physiologique plus importante car les participants marchaient plus vite avec une accélération importante à l'initiation de la traversée. Toutefois, ces analyses ne permettent pas de mettre en évidence un stress particulier en fonction des conditions de trafic, ni même de révéler des sentiments de confiance/méfiance envers les véhicules automatisés.

7. Analyse des données biomécaniques

7.1. Rappel des objectifs de ces analyses

L'approche est ici segmentaire. Elle est basée sur les postures corporelles des participants et de leurs coordinations segmentaires dans le but d'identifier des indices prédictifs de l'intention du piéton de traverser la rue. Dans ce contexte, les analyses s'inscrivent principalement dans la continuité de deux études récentes qui ont analysé les indices cinématiques segmentaires précédant la décision de traversée. Kalantarov et collaborateurs (2018) ont mis en place une étude expérimentale impliquant 20 jeunes adultes face à des véhicules projetés sur un écran de télévision (cf. Figure 23a) et circulant à 50 km/h sur une seule voie.

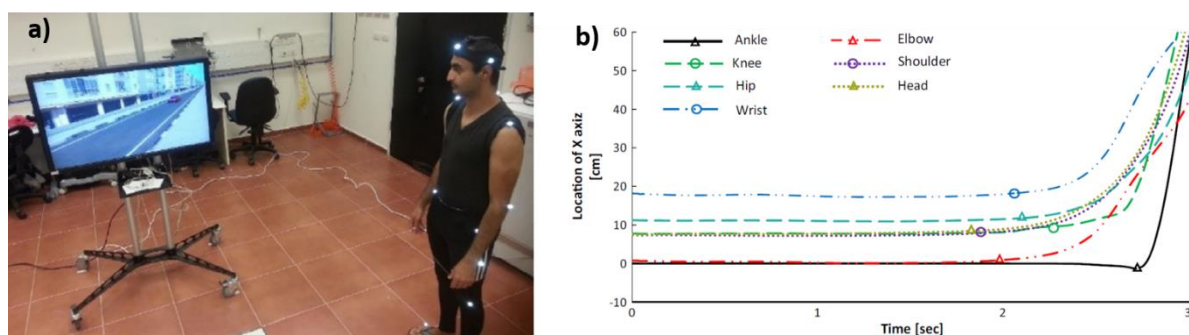


Figure 23. Kalantarov et coll. (2018) ont mis en place un dispositif expérimental face à un trafic automobile affiché sur un écran de télévision (a) et ont mis en avant une séquence d'initiation de la traversée partant de la tête et se terminant par les chevilles (b).

Les auteurs se sont intéressés aux séquences temporelles de mouvement du corps vers l'avant mises en place pour traverser. Ils ont alors montré une séquence d'avancement sur l'axe antéro-postérieur coordonnée de manière « top-down », la tête initiant le mouvement de traversée, suivie par les épaules, les coudes, les poignets, les hanches, les genoux et enfin les chevilles (cf. Figure 23b). C'est le début du mouvement de la cheville qui est alors pris en compte pour définir l'instant initial de traversée de rue.

Sprenger et collaborateurs (2019) se sont quant à eux placés en conditions réelles, sur une portion de route limitée à 30km/h et ont demandé à de jeunes adultes soit de marcher en ligne droite sur un trottoir, soit de faire semblant d'attraper un bus en longeant la rue sur le trottoir au préalable, ou enfin encore de traverser la rue sur un passage piéton (cf. Figure 24). Ils ont comparé les mouvements segmentaires des piétons dans ces trois conditions. Leurs résultats ont mis en avant que les piétons tournent plus leurs épaules et leurs hanches vers la route à traverser que lorsqu'ils doivent prendre un bus. Par ailleurs, les piétons ralentissent plus lorsqu'ils doivent traverser. La rotation de la tête n'était pas un facteur discriminant des différentes conditions.

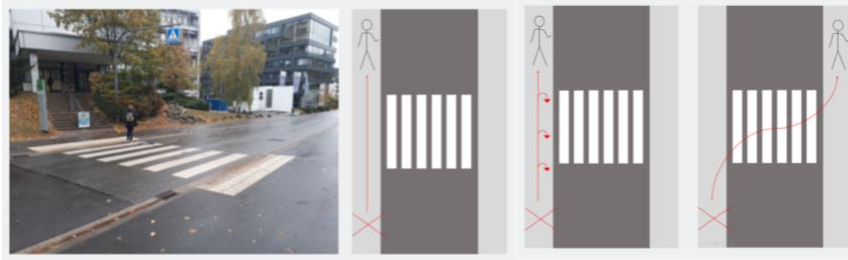


Figure 24. Situations expérimentales proposées par Sprenger et collaborateurs (2019) en situation réelle où le piéton pouvait marcher en ligne droite sur le trottoir, faire semblant d'attraper un bus en longeant auparavant la route sur le trottoir ou encore traverser la rue.

Certaines études ont néanmoins qualifié le comportement de la tête et du regard avant la traversée. Whitebread et Neilson (2000) ont par exemple montré qu'il y a une augmentation de la fréquence des mouvements de la tête chez des jeunes piétons (4-11 ans) dans les 4 secondes avant le début de la traversée et Geruschat et collaborateurs (2003) ont quant à eux constaté que les piétons tournaient leur tête dans les deux directions avant de traverser puis fixaient leur tête vers la zone de danger pendant la traversée.

De manière complémentaire à ces travaux mais néanmoins par une approche originale, le projet Automa-pied couple l'analyse des stratégies corporelles sur l'axe antéro-postérieur (mouvement d'avancée) à celles effectuées par des rotations (i.e., rotation droite / gauche de la tête,...) des participants jeunes et âgés pendant la tâche de traversée de rue sur simulateur.

7.2. Reconstruction des mouvements corporels

Sur les participants, nous avons disposé à des endroits anatomiques standardisés des marqueurs réfléchissants dont la position au cours du temps a été enregistrée à une fréquence de 120Hz grâce à des caméras optoélectroniques (cf. Figure 25a). Grâce à une étape de traitement des données de capture, nous avons pu reconstruire les positions en 3 dimensions des marqueurs et les identifier (faire la correspondance entre chaque marqueur et la position anatomique correspondante) ce qui nous a permis d'étudier les postures et mouvements segmentaires et articulaires précédant la traversée de rue (cf. Figure 25b).

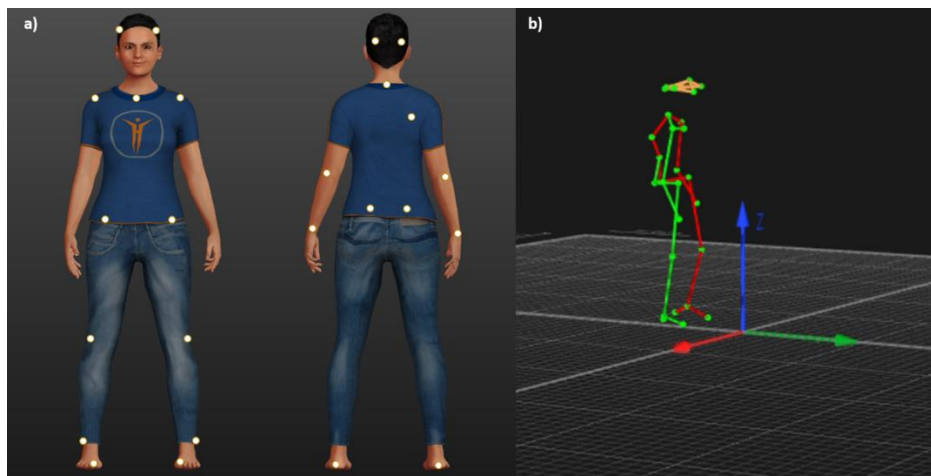


Figure 25. a) A partir des marqueurs disposés sur des positions anatomiques standardisées, b) l'étape de reconstruction des données permet de recueillir les positions en trois dimensions des différentes parties du corps du piéton.

7.3. Identification de l'instant de traversée

Afin de mettre en avant des invariants dans les stratégies corporelles précédant l'initiation de la traversée, nous nous devons d'identifier un instant commun correspondant au début du mouvement de traversée. Nous avons initialement envisagé de réutiliser la méthode de Kalantarov et collaborateur (2018). Pour les essais où le piéton a effectivement traversé la rue, l'instant de traversée a d'abord été défini comme le premier instant pour lequel la vitesse de l'orteil sur l'axe antéro-postérieur dépasse la vitesse moyenne de ce même orteil lors de la phase d'attente (3 premières secondes) + 2 écarts types. Un exemple est fourni sur la Figure 26 ci-après. L'instant de traversée est représenté par la ligne pointillée verticale. Alors que cette méthode fonctionne parfaitement pour identifier le début du mouvement du pied, cette dernière n'a pas montré des performances satisfaisantes sur les autres points d'intérêt (milieu de la tête, milieu des épaules et milieu des hanches). L'inconvénient est qu'étant donnée notre situation de traversée sur une rue bidirectionnelle à deux voies, les participants présentent une plus grande variabilité au niveau des profils de vitesse de la tête durant la phase d'attente ce qui faisait que la méthode ne fonctionnait pas pour l'ensemble des essais avec une détection trop tardive de l'instant d'initiation du déplacement de la tête.

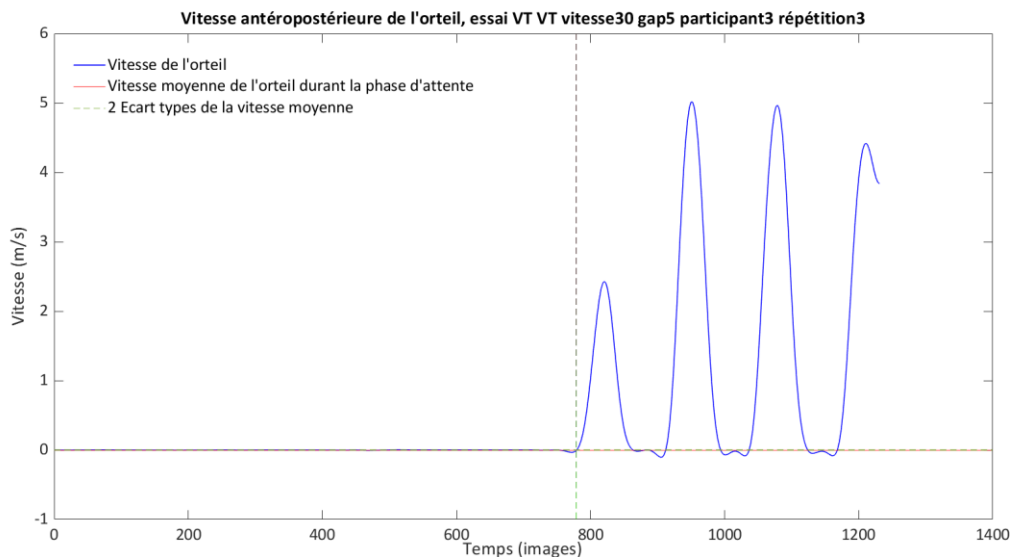


Figure 26. Illustration de la méthode d'identification de l'instant de traversée (la ligne verticale pointillée) se basant sur un seuil de vitesse sur l'axe antéro-postérieur du premier orteil qui avance, sur la base de l'étude de Kalantarov et collaborateurs (2018).

Nous avons alors opté pour une méthode basée sur un seuil commun de vitesse sur l'axe antéropostérieur. A partir du moment où le sujet a franchi le bord du trottoir virtuel, nous cherchons à rebours le dernier instant où la vitesse du point d'intérêt sur l'axe antéropostérieur a atteint la vitesse de 0,1m/s. Le résultat de cette méthode est illustré par la figure 27.

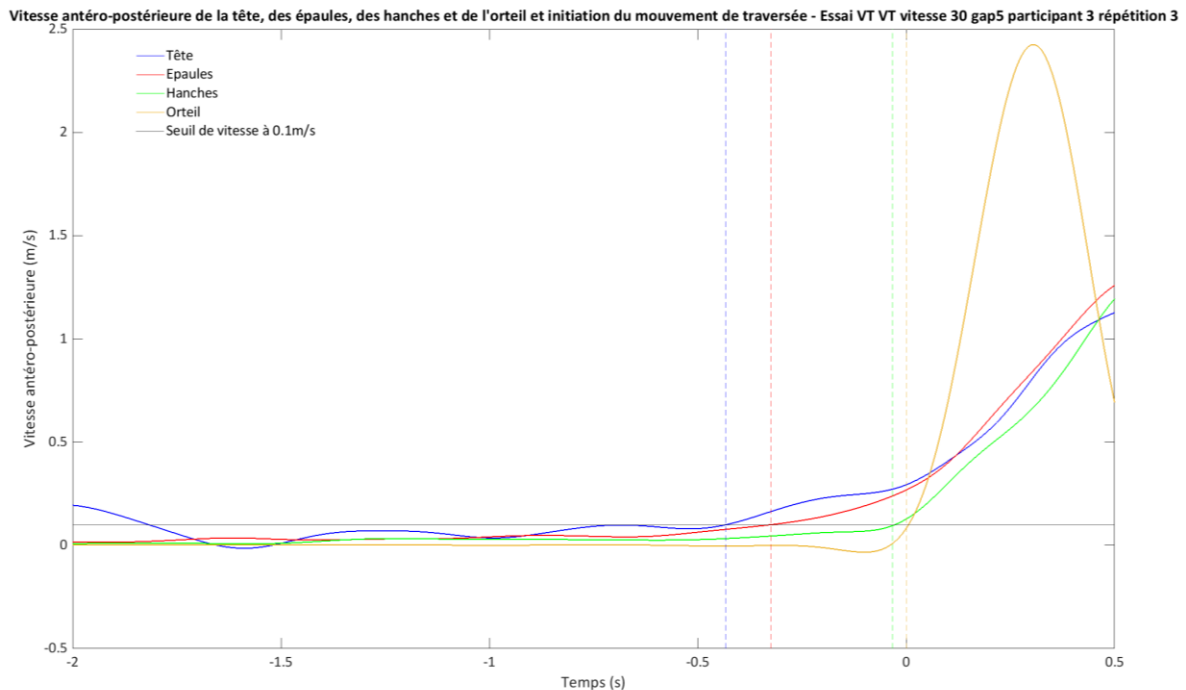


Figure 27. Illustration de la méthode d'identification de l'instant d'initiation du mouvement de traversée (les lignes verticales pointillées) pour la tête, les épaules, les hanches et l'orteil. La méthode se base sur un seuil de vitesse sur l'axe antéro-postérieur à 0,1m/s. L'instant d'initiation du mouvement de l'orteil est défini comme le temps 0 du mouvement.

Les analyses liées aux évolutions des angles corporels du marcheur, détaillées dans la section suivante, se feront de manière relative à l'instant d'initiation de la traversée par le pied. Nous considérerons alors la période comprise 2s avant la traversée, jusqu'à cette dernière.

Afin d'étudier les séquences corporelles de l'initiation de traversée sur l'axe antéropostérieur, nous avons calculé le délai entre l'initiation du mouvement de la tête, des épaules et des hanches avec celui de l'orteil. Un délai négatif signifie que la tête, les épaules ou les hanches ont initié le mouvement avant celui du pied. Nous avons ensuite réalisé une Anova mixte, avec pour facteurs de groupe l'âge (jeunes, âgés), la vitesse des véhicules (30, 50km/h), et le type de véhicules sur la chaussée (VT-VT ; VA-VT ; VT-VA ; VA-VA) et avec pour mesure répétée le point de référence considéré (tête, épaules, hanches). Le seuil de significativité a été fixé à 0,05. En cas d'effet significatif et de taille d'effet suffisante (η^2), nous avons réalisé des tests post hoc de Tukey.

7.4. Orientations segmentaires

Nous nous proposons d'étudier les mouvements de rotation droite - gauche de la tête, de l'axe des épaules et de celui du bassin ainsi que l'inclinaison vers l'avant du tronc afin d'évaluer de possibles invariants sur ces paramètres angulaires qui pourraient indiquer une intention de traverser la rue. Un exemple des évolutions de ces angles avant l'initiation de la traversée est proposé sur la Figure 28.

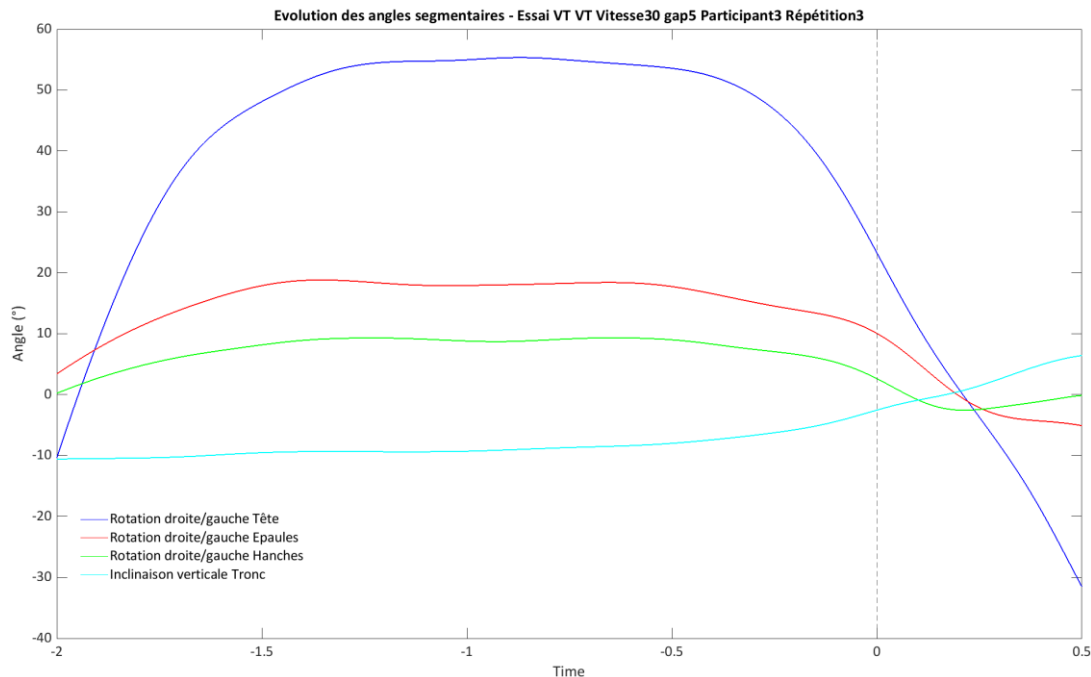


Figure 28. Exemple des orientations segmentaires calculées 2s avant l'initiation de la traversée. La tête, les épaules et les hanches sont orientées vers la gauche lorsque l'angle est positif et vers la droite lorsque ce dernier est négatif. Pour le tronc, ce dernier est incliné vers l'avant lorsqu'il atteint des valeurs positives. L'instant de traversée est représenté par la ligne verticale en pointillés.

En outre, nous proposons une analyse de ces orientations segmentaires à l'aide d'une méthode de classification hiérarchique (« *Agglomerative hierarchical clustering* », cf. Bar-Joseph et collaborateurs 2001), fournie par la librairie python « *scipy.cluster.hierarchy.linkage* ». Le principe de cette méthode est de créer à partir des données expérimentales, des groupes de comportements similaires. A priori, si une de ces variables permet de prédire l'intention de traverser, nous devrions pouvoir identifier un seul groupe qui se comporte ainsi de la même manière pour l'ensemble des essais où il y a eu une traversée. Après avoir normalisé et centré les courbes d'orientations segmentaires entre leurs valeurs minimales et maximales, la proximité entre deux comportements est tout d'abord évaluée par un algorithme de déformation temporelle dynamique, plus communément appelé en langue anglaise Dynamic Time Warping (DTW) permettant de s'affranchir des décalages temporels entre deux événements similaires. La classification renvoie ensuite un arbre de classement, appelé dendrogramme, permettant de mettre en évidence la proximité entre les différents groupes de comportements. Ainsi, l'existence d'un seul groupe et donc d'un seul comportement, permettrait d'attester de la pertinence du paramètre pour une détection précoce d'une intention de traverser. A l'inverse, l'existence de plusieurs groupes refléterait une diversité de mouvements rendant inadaptée l'analyse de l'angle segmentaire en question pour l'identification de l'intention de traverser.

Cette méthodologie a été appliquée aux deux populations pour l'angle de la tête.

7.5. Résultats des analyses

7.5.1. Initiations segmentaires du mouvement de traversée

Les résultats de l'ANOVA concernant les délais de l'initiation du mouvement de la tête, des épaules et des hanches montrent principalement un effet du point de référence ($F(1.41,1537.88)=593.7$, $p<.001$, $\eta^2=.35$), où la tête initie le mouvement de traversée en première ($-0.51 \pm 0.36s$), suivie par les épaules ($-0.33 \pm 0.23s$), les hanches ($-0.21 \pm 0.22s$) et enfin les pieds. Ces résultats s'inscrivent en cohérence avec l'étude de Kalantarov et collaborateurs (2018). Les délais observés sont illustrés sur la figure 29 ci-dessous. Nous ne commentons pas ici les effets d'interaction, qui lorsque significatifs présentent des tailles d'effet très faibles.

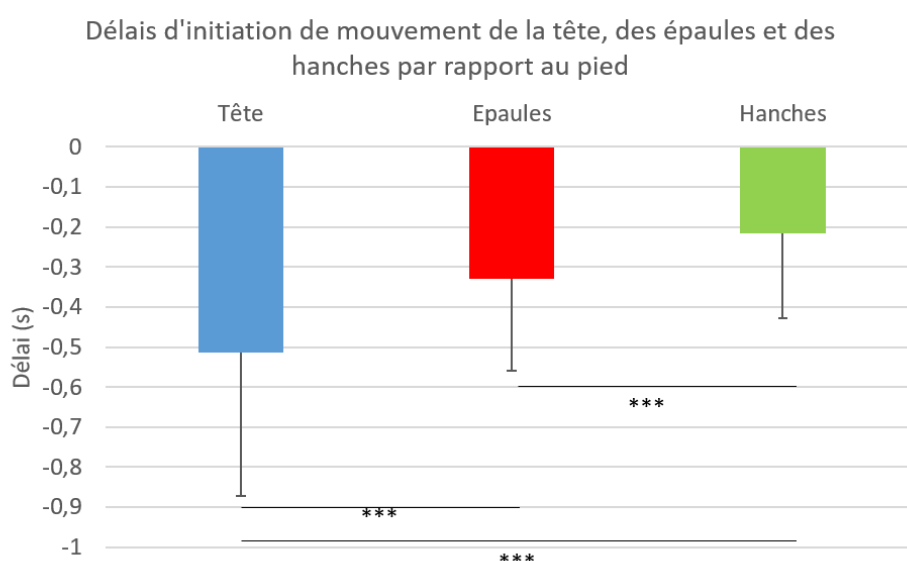


Figure 29. Délais d'initiation du mouvement de traversée pour la tête, les épaules et les hanches par rapport aux pieds. Le test post hoc de Tukey montre que la tête initie le mouvement de traversée, suivie par les épaules et les hanches ($p<.001$).

Intéressons-nous à présent aux instants d'initiation de la tête en fonction des facteurs manipulés dans notre expérience. Les résultats de l'ANOVA montrent un effet significatif de l'âge ($F(1.41,1537.88)=593.7$, $p<.001$, $\eta^2=.35$) et du type de trafic ($F(1.41,1537.88)=593.7$, $p<.001$, $\eta^2=.35$). On retient que la tête initie le mouvement par rapport à celui des pieds plus tôt chez les âgés ($-0.59 \pm 0.35s$) que chez les jeunes ($-0.43 \pm 0.35s$) ($p<.001$) (cf. Figure 30 ci-dessous). On retient aussi que la tête initie le mouvement par rapport à celui des pieds légèrement plus tard dans la condition 4 où deux véhicules automatisés laissent le passage au piéton ($-0.47 \pm 0.35s$) par rapport aux conditions VT_VT ($-0.55 \pm 0.38s$) et VA_VT ($-0.55 \pm 0.37s$), c'est-à-dire les conditions où le véhicule traditionnel se trouve dans la seconde voie (cf. Figure 31). Ces résultats sont néanmoins à considérer avec précaution car la taille d'effet est très faible.

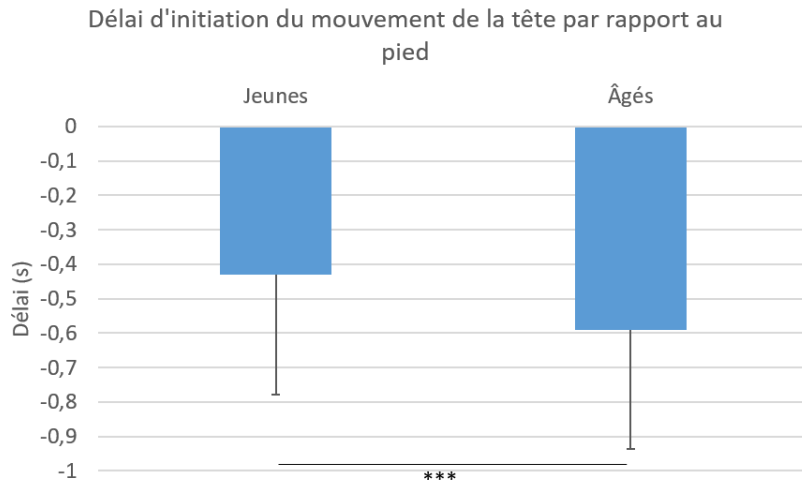


Figure 30. Délais d'initiation du mouvement de traversée pour la tête par rapport aux pieds chez les participants jeunes et âgés. Le test post hoc de Tukey montre que la tête initie le mouvement de traversée par rapport au départ des pieds de manière plus précoce chez les âgés ($p < .001$).

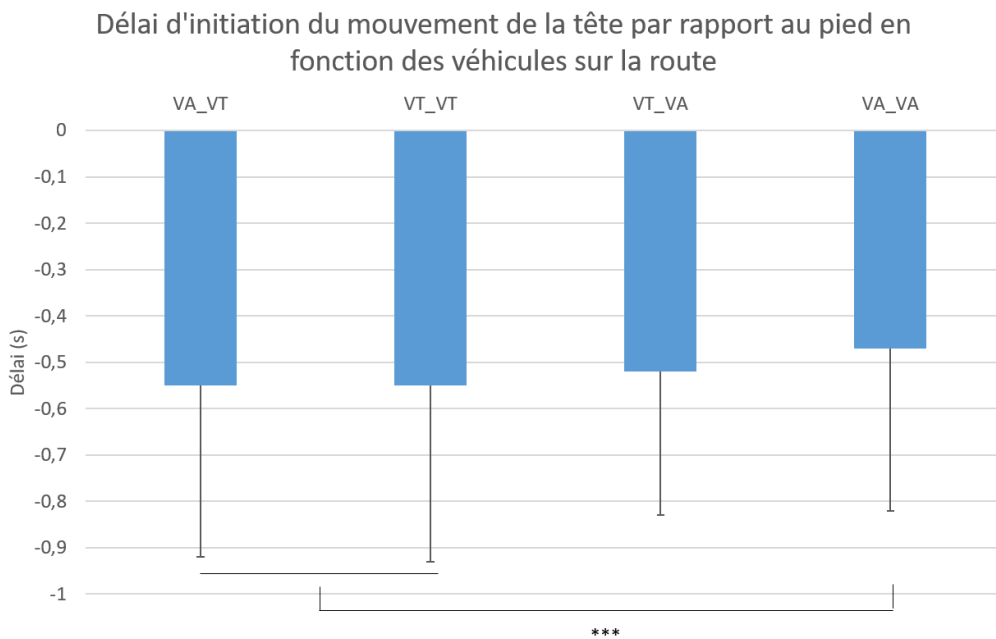


Figure 31. Délais d'initiation du mouvement de traversée pour la tête par rapport aux pieds en fonction du type de trafic présent sur la chaussée. Le test post hoc de Tukey montre que la tête initie le mouvement de traversée par rapport au départ des pieds de manière plus tardive en présence de deux véhicules automatisée sur la chaussée en comparaison avec un véhicule traditionnel présent dans la deuxième voie ($p < .001$).

7.5.2. Variabilité des profils de mouvement de rotation droite/gauche de la tête

Nous avons à ce jour concentré nos analyses sur les mouvements de la tête, puisque c'est cette dernière qui initie le mouvement de traversée. Les résultats de la classification des comportements de rotation droite/gauche de la tête montrent qu'il n'existe pas de comportement stéréotypé avant la traversée mais plutôt une grande variabilité dans les profils de mouvements de rotation de la tête comme l'illustrent les figures 32 et 33 ci-après. Ces dernières mettent en avant les résultats de la classification avec une identification de 5 groupes principaux chez les âgés comme chez les jeunes (un sixième pour être précis avec seulement deux essais). Cette variable n'est sans doute pas un indicateur pertinent pour identifier l'intention de traversée car elle n'est pas reproductible pour tous les essais où le piéton a traversé la rue.

Si on s'intéresse aux courbes moyennes dans la partie basse des figures 32 et 33, on remarque également une disparité dans la direction de la tête au moment de la traversée, avec des essais où le piéton traverse avec la tête regardant la voie de gauche alors que pour certains, ils regardent la voie de droite avant d'initier le mouvement de traversée.

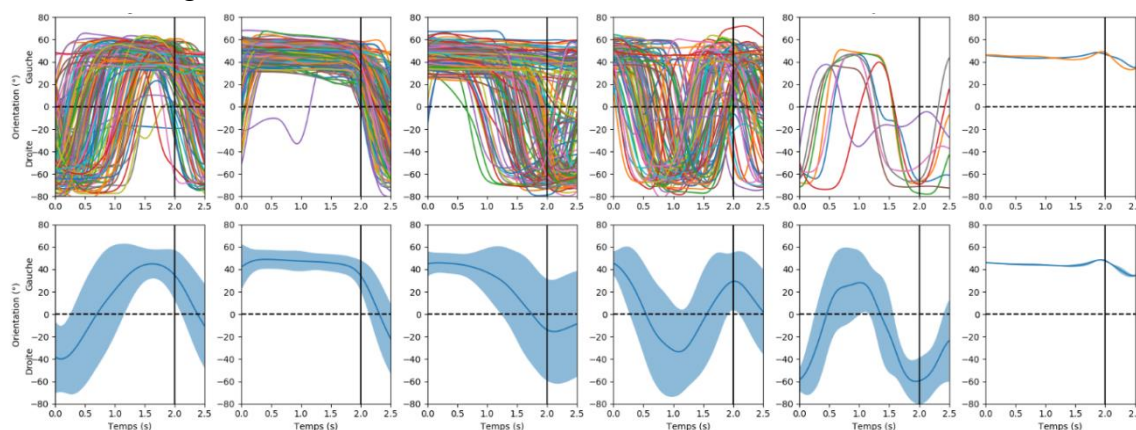


Figure 32. Classification des comportements d'orientation droite-gauche de la tête chez les participants jeunes pour l'ensemble des conditions de trafic

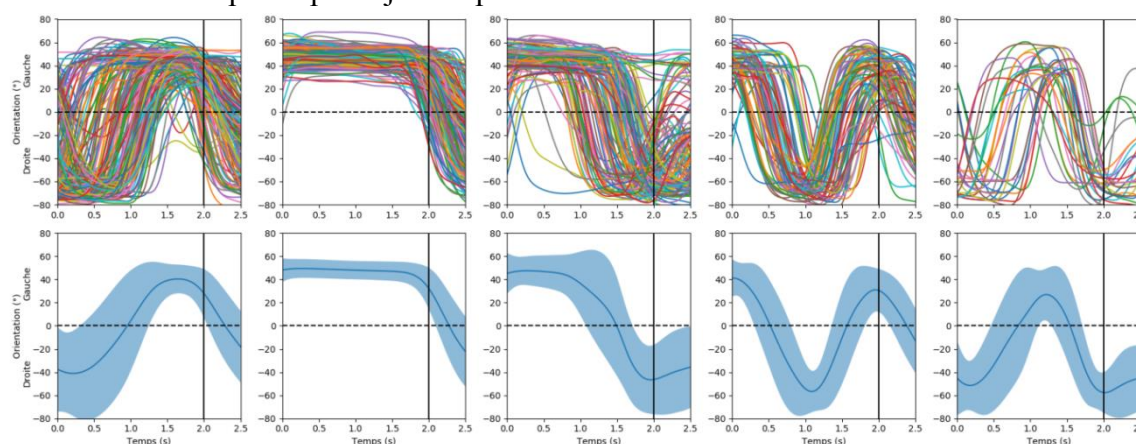


Figure 33. Classification des comportements d'orientation droite-gauche de la tête chez les participants âgés pour l'ensemble des conditions de trafic.

Conclusions : Le mouvement de la tête sur l'axe antéro-postérieur semble être un bon indice pour prédire la décision de traversée de rue puisqu'il précède, dans toutes les conditions expérimentales, le mouvement du pied qui engage la traversée, et cela chez les participants jeunes et âgés. Les mouvements de rotation droite/gauche de la tête ne semblent pas, quant à eux, pertinents pour nos analyses car il existe une trop grande variabilité dans les comportements observés qui rend difficile la prédiction de l'intention de traverser.

8. Discussion générale des résultats et conclusions

Sur la base des connaissances actuelles, déterminer si les interactions piétons-véhicules seront mises à mal avec l'introduction des véhicules automatisés sur nos routes ne trouve pas de réponses claires, en particulier pour la sécurité des traversées de rue. La revue de la littérature publiée sur ce sujet montre des résultats contradictoires. Selon les études, les piétons manifestent des sentiments, perceptions ou comportements face à des véhicules automatisés parfois positifs et sûrs, mais parfois aussi hésitants, ou encore, dans certaines études, non différents comparativement à ceux adoptés face à des voitures traditionnelles. Certaines études montrent par contre des comportements problématiques et potentiellement dangereux.

Pour combler ce manque, la présente expérimentation a visé à étudier les comportements de traversée de rue de piétons en fonction de l'automatisation des véhicules et de leur âge. Pour cela, 30 adultes jeunes ($M=29.43$ ans, 21-39 ans) et 30 personnes âgées ($M=75.40$ ans, 68-81 ans) ont répondu à une tâche de traversée de rue sur le simulateur de l'IFSTTAR autorisant le déplacement réel d'un piéton sur une distance d'environ 8 mètres en interaction avec des véhicules virtuels. Les participants pouvaient traverser soit devant des voitures automatisées programmées pour toujours s'arrêter et leur laisser le passage, soit entre des voitures traditionnelles approchant à vitesse constante et qui ne freinaient pas pour les laisser passer. Les voitures pouvaient approcher à 30 ou 50 km/h, dans la voie proche et / ou éloignée de la rue à double sens. Les gaps disponibles pour traverser variaient également.

Cinq constats majeurs ressortent clairement des **données comportementales** collectées dans le simulateur.

Le premier concerne une **majoration du risque dans la condition où un véhicule automatisé laisse le passage en première voie alors que des véhicules traditionnels approchent en deuxième voie.** Ici, les participants saisiraient l'opportunité offerte par le véhicule automatisé en voie proche mais sans parfois suffisamment considérer la voie éloignée. Comparativement aux autres conditions de trafic, on note ici plus de traversées acceptées, à des gaps plus courts (trop courts), menant souvent à des collisions avec les véhicules traditionnels à l'approche en voie éloignée. Ce constat s'observe chez les participants jeunes comme âgés, mais en plus forte proportion chez les âgés, et à vitesse élevée aussi plus particulièrement.

Le deuxième constat majeur concerne la **méfiance des comportements manifestés par les piétons dans le cas d'une traversée entre deux véhicules automatisés,** alors que la sécurité était totale, puisque les véhicules automatisés virtuels étaient programmés pour systématiquement s'arrêter devant le piéton en attente de traverser sur le simulateur, aucune collision ne pouvait donc se produire. Cette méfiance se manifeste par des moments d'initiation plus tardifs et des temps de traversées plus longs dans cette condition de trafic comparativement aux autres, surtout dans le cas où les véhicules automatisés approchent puis freinent brusquement à une faible distance du piéton (i.e., pour des temps courts avant freinage de l'ordre de 1 et 2 secondes). Le piéton initierait sa traversée tardivement une fois avoir bien perçu le freinage et l'arrêt imminent du véhicule automatisé à l'approche dans chaque voie. Une fois perçu ce freinage et arrêt des véhicules automatisés, les piétons s'engageraient encore avec méfiance dans la traversée, avec des vitesses de marche plus lentes dans cette condition que dans les autres. Ce constat est cohérent avec les quelques études antérieures montrant de tels comportements hésitants et méfiants (Creech et al., 2017; Habibovic et al., 2016; Jayaraman et al., 2018; Lagström & Lundgren, 2015; Nunes Velasco et al., 2019; Rothenbucher et al., 2016). Mais cette méfiance envers les voitures automatisées pourrait en fait être liée à un manque de connaissances et d'expérience. Penmetza, Adanu,

Wood, Wang et Jones (2019) ont récemment montré que les personnes ayant une expérience directe et préalable avec des véhicules automatisés perçoivent davantage de bénéfices en termes de sécurité à leur introduction prochaine sur nos routes que les personnes sans interaction ni expérience préalable. Rahman, Deb, Strawderman, Burch et Smith (2019) indiquent également que la familiarité est un levier positif: les participants qui connaissaient mieux les voitures automatisées en ont une perception plus favorable. Rodriguez, Nuñez Velasco, Farah et Hagenzieker (2017) ont enfin observé que les sentiments positifs sont plus fréquents chez les personnes ayant un degré élevé de confiance et / ou de connaissance envers les véhicules automatisés. Or les participants de la présente expérience ont interagi avec les voitures automatisées pendant seulement 20 minutes. Des travaux futurs doivent approfondir cette question de savoir si le comportement pourrait changer à mesure que la nouveauté de ces véhicules se dissipe (Madigan et al., 2019). Les études futures devront globalement approfondir le rôle des connaissances antérieures, de la pratique répétée et de la confiance envers les véhicules automatisés dans le temps.

La présente étude met également en évidence le **rôle primordial de la dynamique du véhicule à l'approche** dans la communication de son intention aux piétons sur le point de traverser (Ackermann, Beggiato, Bluhm, Löw et Krems, 2019; Dey, Martens, Eggen et Terken, 2019). Que les voitures soient automatisées ou conduites manuellement, les piétons s'appuient essentiellement sur la perception de leurs mouvements d'approche pour choisir le moment de traverser la rue. Des traversées dangereuses ont par exemple été observées dans le cas de voitures traditionnelles qui approchaient au loin et rapidement des piétons qui ne pouvaient pas percevoir les mouvements et la dynamique du véhicule et surestimaient ainsi le temps de traversée. Des comportements méfiants ont été observés dans le cas d'une voiture automatisée très proche du piéton qui freine brusquement pour le laisser traverser. Cette dynamique du véhicule peut avoir effrayé les piétons. Pour rassurer les piétons, un nombre important d'études a été mené ces dernières années pour concevoir et tester l'efficacité des interfaces homme-machine externes pour afficher des informations et communiquer plus directement avec les piétons (voir, par exemple, de Clercq, Dietrich, Núñez Velasco, de Winter et Happee , 2019). Une recommandation pour les constructeurs automobiles pourrait également être de permettre une conduite automatisée douce, conviviale et très prévisible, sans comportements brusques.

La question de savoir **comment concevoir des véhicules automatisés** ne trouve pas de réponse claire dans la littérature. Pouvoir identifier le véhicule comme automatisé pourrait aider à activer en mémoire les bonnes attentes concernant le comportement du véhicule automatisé (Schieben, Wilbrink, Madigan, Louw et Merat, 2018). Mais une voiture d'aspect futuriste pourrait inspirer de la méfiance comparativement à un véhicule d'apparence ordinaire, Dey et al (2019) montrant que la volonté de traverser diminue même. Dey et al. (2019) proposent que « en particulier dans les premiers stades de l'introduction des véhicules automatisés, afin d'assurer une introduction et une intégration en douceur dans la société, il pourrait être important de ne pas rendre les véhicules automatisés trop visibles par leur design » (p.203). De futurs travaux doivent être menés pour fournir plus de connaissances sur la façon de concevoir l'apparence des véhicules automatisés.

Troisième constat important à l'issue des données comportementales recueillies sur le simulateur, **plus de collisions sont globalement observées chez les participants âgés** que chez les participants plus jeunes. Ce constat est dans la lignée des données nationales d'accidentalité piétonne. Encore en 2018, les piétons de plus de 75 représentent la plupart des tués. En 2018, l'ONISR publiait que 36% des piétons tués avaient plus de 75 ans, alors qu'ils ne représentaient que 9% de la population française. Nos travaux menés à l'IFSTTAR sur cette question plus générale de surreprésentation des personnes âgées dans les accidents piétons (voir Dommes, 2019 pour le plus récent), dans la lignée de ceux menés à

l'international, montrent que le plus grand nombre de collisions associé à l'avancée en âge semble être lié à plusieurs phénomènes caractéristiques du vieillissement normal : des processus décisionnels inadéquats, une compensation insuffisante par l'accélération de la vitesse de marche et la faible observation conjointe du trafic approchant, une surcharge cognitive, et une métacognition peut-être aussi affaiblie avec le vieillissement. Au-delà de prises de décisions inadéquates (non prise en compte de la vitesse des véhicules et du trafic approchant dans la voie la plus éloignée d'eux) en raison de déclin perceptifs et cognitifs (attentionnels et exécutifs notamment), les piétons âgés, après avoir pris leur décision de traverser la rue, sembleraient donner la priorité à la marche rapide pour éviter de passer du temps sur la chaussée, au détriment de l'observation conjointe de la circulation approchante. Compenser une mauvaise décision de traverser la rue ne serait pas possible en raison de regards portés au sol pendant la marche (Avineri et al., 2012 ; Tapiro et al., 2016 ; Zito et al., 2015) et de limitations physiques importantes qui contraignent la marche rapide. Le vieillissement est aussi connu pour augmenter les exigences de la marche : les personnes âgées mobiliseraient davantage de ressources attentionnelles que les jeunes adultes (Beauchet et Berrut, 2006). Ces exigences seraient telles qu'observer le trafic qui approche tout en marchant ne serait plus possible, au risque de dépasser les ressources attentionnelles disponibles déjà affaiblies par l'avancée en âge « normale » et d'augmenter le risque de chute. La question de la métacognition renvoie au fait que les âgés ne seraient peut-être pas suffisamment conscients de toutes les contraintes physiques et cognitives associées à la tâche complexe qu'est traverser la rue (voir Dommes, 2019).

Les difficultés des participants âgés sont ici encore plus notables dans la condition où un véhicule automatisé laisse le passage en première voie alors que des véhicules traditionnels approchent en deuxième voie. Ce résultat est dans la lignée des précédentes recherches montrant une faible prise en compte de la voie éloignée chez les participants âgés qui semblent principalement baser leur décision de traverser une rue à double sens de circulation en fonction de la voie la plus proche d'eux, négligeant la seconde voie où peuvent également circuler des véhicules (Dommes et al., 2014). Un trafic mixte composé de véhicules traditionnels et automatisés pourrait donc accroître le risque pour les plus âgés dans les situations où le véhicule automatisé est en voie proche alors que des véhicules traditionnels approchent également en voie éloignée. Le risque est ici à craindre en voie éloignée.

Quatrième constat important à l'issue de l'analyse des données comportementales, la **vitesse d'approche des véhicules est un facteur de risque pour les jeunes et les plus âgés.** Ce constat avait déjà pu être observé dans de précédents travaux (Dommes et al., 2013, 2014 ; Lobjois & Cavallo, 2007, 2009 ; Oxley et al., 2005). Alors que dans nos précédents travaux, l'effet de la vitesse était surtout observé chez les participants âgés, dans la présente étude, l'effet de la vitesse s'observe également chez les participants jeunes. On observe que les participants, jeunes comme âgés (avec une tendance encore plus forte chez les âgés par contre) traversent plus souvent, à des gaps plus courts, la résultante étant qu'ils ont plus de collisions. On observe aussi que les participants initient plus tardivement et marchent plus lentement lorsque le véhicule approche à 50 km/h plutôt qu'à 30. Ces résultats témoignent de la difficulté à prendre en compte la vitesse d'approche du véhicule dans la prise de décision de traverser la rue, notamment dans la présente étude où le trafic est complexe. Si les jeunes comme les âgés acceptent plus souvent de traverser à vitesse élevée, c'est surtout que les distances qui les séparent des véhicules le sont également. Ainsi, pour un intervalle de temps donné, la distance du véhicule à l'approche est nécessairement plus grande à vitesse élevée qu'à vitesse lente. Les grandes distances associées aux vitesses élevées mènent les piétons à penser qu'ils ont le temps de traverser. Mais le temps d'arrivée du véhicule à leur hauteur est alors surestimé, et la décision de traverser potentiellement dangereuse.

Dernier constat important, **l'introduction de véhicules automatisés dans le trafic semble complexifier la tâche de traverser de rue même face à des véhicules traditionnels.** Dans la condition classique de trafic traditionnel (véhicules approchant à vitesse constante sans freiner pour laisser passer le piéton), on observe des difficultés dans le groupe des adultes jeunes dès la voie proche de circulation du trafic, ainsi que des difficultés à considérer la vitesse d'approche des véhicules dans la prise de décision de traverser la rue, de manière incohérente avec les recherches antérieures qui observent ces effets chez les piétons âgés seulement (voir par exemple Dommes et al., 2014 ; Dommes, 2019). De futurs travaux doivent être menés pour confirmer ce résultat et mieux comprendre en quoi l'introduction des véhicules automatisés dans le trafic actuel pourrait complexifier la tâche et bouleverser les stratégies de traverser de rue des piétons avec des véhicules pourtant traditionnels.

Le traitement des **données verbales** révèle des **perceptions positives envers les véhicules automatisés chez la majeure partie des participants, alors même qu'ils ont émis des comportements parfois hésitants et méfiants pendant l'expérimentation.**

Même si le questionnaire d'acceptabilité générale envers les véhicules automatisés (PRQF, Deb et al., 2017) a été proposé juste après l'expérience, les attitudes générales envers les véhicules automatisés étaient positives chez les jeunes comme chez les participants plus âgés, et la confiance générale était neutre (pas négative en tout cas). Ce questionnaire semble mesurer les sentiments et les perceptions des individus envers de futurs véhicules automatisés en général, plutôt qu'envers ceux rencontrés dans l'expérience. Les participants pourraient faire confiance aux véhicules automatisés et à la façon dont ils pourraient être à l'avenir, mais également être conscients des limites que les voitures automatisées actuelles rencontrent, et donc être prudents dans leurs comportements (Nunes Velasco et al., 2019), en particulier dans les situations où les voitures automatisées adoptent des comportements surprenants, comme le freinage brusque sur de courtes distances.

Pour répondre à cette question de savoir si les avis des participants peuvent changer selon qu'on leur demande d'évaluer la sécurité perçue des véhicules automatisés à l'avenir ou celle des véhicules virtuels simulés qu'ils viennent juste de voir dans l'étude sur simulateur, nous avons analysé leurs réponses à quatre questions posées après qu'ils aient traversé la rue sur simulateur. L'analyse de leurs réponses montre des perceptions positives en termes de confiance et de sécurité perçues. Le niveau de stress perçu était par ailleurs faible. Enfin, les participants s'accordent tous à dire que les véhicules virtuels automatisés créés pour l'étude adoptaient un comportement très prédictible. Ces données déclaratives semblent donc également, comme celles issues du questionnaire mesurant l'acceptabilité générale des participants envers les véhicules automatisés (PRQF, Deb et al., 2017), entrer en contradiction avec certaines des données comportementales relevées sur le simulateur pendant la tâche de traversée de rue, où on observait que les participants montraient des comportements hésitants et méfiants dans la condition particulière où approchait un véhicule automatisé dans chaque voie. La question de la mesure de la confiance des piétons envers les véhicules automatisés, et de savoir comment elle influence le comportement, est très délicate. Des contradictions émergent de nos résultats. Comme dans la littérature antérieure, les perceptions et déclarations subjectives peuvent être positives, mais les comportements différents, méfiants, hésitants voire dangereux.

Les **mesures physiologiques** recueillies dans l'étude avaient pour objectif d'étayer les conclusions des analyses des données comportementales et verbales. Mais le traitement des données de fréquence cardiaque et des réponses électrodermales s'est avéré complexe, avec beaucoup de données perdues. **L'enregistrement des données physiologiques a en effet été fortement impacté par les mouvements de marche des participants.** Une partie du signal

n'était pas reçue par le dispositif d'enregistrement ou était biaisée par l'activité même de marche du participant, indépendamment du trafic à l'approche et des choix de l'individu pour traverser la rue. Les résultats des données montrent en effet des modifications physiologiques associées aux mouvements de marche des participants. On retient une augmentation de la fréquence cardiaque et du rapport basses fréquences / hautes fréquences lors des traversées, ainsi qu'une évolution de la réponse électrodermale en fonction du gap et de la traversée de la rue dans le sens d'une activation physiologique associée au simple mouvement de marcher. De manière générale, les situations de gaps courts ont impliqué une activation physiologique plus importante car les participants marchaient plus vite avec une accélération importante à l'initiation de la traversée. Malgré nos attentes, ces analyses ne permettent pas de mettre en évidence un stress particulier en fonction des conditions de trafic, ni même d'établir des sentiments de confiance/méfiance envers les véhicules automatisés. Plusieurs interprétations peuvent nous aider à mieux comprendre ces résultats. La première pourrait être liée au fait que les mesures ne seraient pas assez précises ou pas assez sensibles pour montrer une différence d'émotions entre les différentes conditions de trafic. Il est à noter que cette activité de traversée de rue est très courte (entre 3 et 4 secondes au total). Il n'est pas certain que la réaction physiologique soit suffisamment forte en ces quelques secondes, voire millisecondes pour ce qui concerne un événement inattendu comme un freinage d'urgence, pour être décelable par nos capteurs. La deuxième explication tient à l'usage de la réalité virtuelle, mais secondairement, car on observe bien des différences comportementales (ralentissement net du moment d'initiation et de la vitesse de marche) dans la condition d'une traversée face à un véhicule autonome dans chaque voie comparativement aux autres conditions de trafic, témoignant d'un comportement hésitant voire méfiant. D'autres travaux doivent être menés pour mieux mesurer les émotions des piétons lorsqu'ils traversent la rue face à des véhicules automatisés et/ou traditionnels.

Les **analyses biomécaniques** révèlent enfin des données très novatrices et intéressantes pour les algorithmes de détection du piéton. On retient de nos analyses que les **mouvements d'orientation de la tête du piéton** (à gauche et à droite, vers les voies proches et éloignées d'une rue à double sens où approchent le trafic bidirectionnel) **ne sont pas des marqueurs pertinents pour prédire l'intention de traverser la rue**. Beaucoup de différences interindividuelles sont observées et plusieurs stratégies émergent. Un indicateur plus pertinent pourrait être de considérer **le mouvement de la tête sur l'axe antéro-postérieur** (vers l'avant) pour prédire la décision de traverser la rue, puisqu'il précède, dans toutes les conditions expérimentales, le mouvement du pied qui engage la traversée, et cela chez les participants jeunes et âgés. D'autres travaux sont à mener sur cette question de la prédiction de l'intention de traverser la rue car nos données révèlent des différences interindividuelles importantes. La question des différences intra-individuelles se pose également, à savoir si le comportement et les mouvements du piéton ne varient pas dans le temps, avec l'expérience et la pratique. Enfin, ces données ont été observées alors que le piéton était en position d'attente statique avant de traverser. On peut se poser la question de savoir si les mêmes prédicteurs ressortiraient des analyses si le piéton était en action de marche avant de traverser. D'autres travaux doivent être menés pour répondre à cette question.

9. Recommandations

À l'issue de ce projet, trois recommandations principales peuvent être formulées (informer, pratiquer et échanger). Quelques recommandations à la conception des véhicules automatisés sont également proposées.

INFORMER. La première recommandation est d'accroître les connaissances générales de la population sur les véhicules automatisés, grâce à de vastes campagnes d'informations. L'objectif sera d'informer les individus sur le fonctionnement de ces véhicules, les comportements que l'on peut en attendre, dans diverses situations, les limites techniques actuelles, les possibilités, etc., pour les utilisateurs de ces véhicules (conducteurs – passagers), mais aussi et surtout, pour notre propos, pour les autres usagers de la route (piétons, cyclistes, etc.). De meilleures connaissances permettraient des attentes plus justes envers ces nouveaux véhicules.

PRATIQUER. La deuxième recommandation est de permettre aux individus de se confronter en situation réelle à ces nouveaux véhicules. L'idée est de favoriser les expérimentations en conditions naturelles, pour permettre des expériences réelles avec des voitures automatisées dans le trafic routier actuel, dans les villes et les campagnes. Accroître les expériences par la pratique répétée pourrait permettre aux individus de se familiariser avec de telles voitures, d'apprendre à se comporter face à elles, augmentant ainsi la confiance et les attitudes positives. Cependant, une attention particulière doit être accordée à un niveau de confiance trop élevé, car les usagers de la route pourraient aussi l'utiliser à leur propre avantage et adopter alors des prises de risque (par exemple, violations de priorité).

ECHANGER. La dernière recommandation est de faire dialoguer toutes les parties prenantes de cette question à enjeux majeurs. Décideurs publics, industriels, équipementiers, ingénieurs et chercheurs doivent communiquer. Le partage des connaissances pourra être la réponse à certains leviers. De nombreux efforts de recherche doivent également être poursuivis pour accroître les connaissances à des questions encore épineuses (design du véhicule, effet de la familiarité, algorithme de détection de l'intention de traverser la rue, réglementation des interactions, etc.).

Conception du véhicule automatisé. Quelques dernières recommandations plus spécifiques à la conception du véhicule automatisé peuvent être formulées. A partir des résultats de notre projet et de la revue de la littérature, il semble que le véhicule automatisé devra (i) être facilement identifiable dans le trafic (facilement perceptible parmi les autres véhicules) mais dont l'apparence ne devra pas être trop « futuriste » (Dey et al., 2019), (ii) faire l'objet de standardisations quant à son design (pour éviter les confusions et voir circuler des véhicules aux apparences multiples) et (iii) adopter une conduite fluide et souple (ex. anticipation, freinage progressif en cas d'arrêt devant un piéton).

Références bibliographiques

- Ackermann, C., Beggiato, M., Bluhm, L.F., Löw, A., & Krems, J.F. (2019). Deceleration parameters and their applicability as informal communication signal between pedestrians and automated vehicles. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 62, 757-768.
- Avineri, E., Shinar, D., & Susilo, Y. (2012). Pedestrians' behaviour in cross walks: the effects of fear of falling and age. *Accident Analysis & Prevention*, 44 (1), 30–34.
- Bar-Joseph, Z., Gifford, D. K., & Jaakkola, T. S. (2001). Fast optimal leaf ordering for hierarchical clustering. *Bioinformatics*, 17(suppl_1), S22-S29.
- Bengler, K., Dietmayer, K., Farber, B., Maurer, M., Stiller, C., & Winner, H. (2014). Three Decades of Driver Assistance Systems: Review and Future Perspectives. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 6(4), 6–22.
- Botello, B., Buehler, R., Hankey, S., Mondschein, A., & Jiang, Z. (2019). Planning for walking and cycling in anautonomous-vehicle future. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 1, 100012.
- Cavallo, V., Dommes, A., Dang, N.-T., & Vienne, F. (2019). A street-crossing simulator for studying and training pedestrians. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 61, 217-228.
- Cao, Y., Guan, D., Huang, W., Yang, J., Cao, Y., & Qiao, Y. (2019). Pedestrian detection with unsupervised multispectral feature learning using deep neural networks. *Information Fusion*, 46, 206–217.
- Curran, R., Park, S. Y., Domingo, L., Garcia-Mancilla, J., Santana-Mancilla, P. C., Gonzalez, V. M., & Ju, W. (2018). ¡Vamos! *Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '18*, 210–220.
- Creech, C., Jayaraman, S. K., Robert, L., Tilbury, D., Yang, X. J., Pradhan, A., & Tsui, K. (2017). Trust and Control in Autonomous Vehicle Interactions. Workshop on “Morality and Social Trust in Autonomoy”, Robotics Science and Systems Conference, (October).
- Czaja, S. J., Charness, N., Fisk, A. D., Hertzog, C., Nair, S. N., Rogers, W. A., & Sharit, J. (2006). Factors predicting the use of technology: Findings from the Center for Research and Education on Aging and Technology Enhancement (CREATE). *Psychology and Aging*, 21, 333-352.
- 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.
- Deb, S., Hudson, C. R., Carruth, D. W., & Frey, D. (2018). Pedestrians receptivity in autonomous vehicles: Exploring a video-based assessment. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 62(1), 2061–2065.
- 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.
- Dey, D., Martens, M., Eggen, B., & Terken, J. (2019). Pedestrian road-crossing willingness as a function of vehicle automation, external appearance, and driving behavior. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 65, 191-205.
- Dommes, A. (2019). Street-crossing workload in young and older pedestrians. *Accident Analysis and Prevention*, 128, 175-184.
- Dommes, A., Cavallo, V., Dubuisson, J.B., Tournier, I., & Vienne, F. (2014). Crossing a two-way street: comparison of young and old pedestrians. *Journal of Safety Research*, 50, 27-34.
- Dommes, A., Cavallo, V., & Oxley, J.A. (2013). Functional declines as predictors of risky street-crossing decisions in older pedestrians. *Accident Analysis and Prevention*, 59, 135-143.
- Dommes, A., Le Lay, T., Vienne, F., Dang, N.-T., Perrot Beaudoin, A., Do, M.C. (2015). Towards an explanation of age-related difficulties in crossing a two-way street. *Accident Analysis & Prevention*, 85, 229-238.
- Geruschat, D. R., Hassan, S. E., & Turano, K. A. (2003). Gaze behavior while crossing complex intersections. *Optometry and vision science*, 80(7), 515-528.

- Habibovic, A., Andersson, J., Nilsson, M., Lundgren, V. M., & Nilsson, J. (2016). Evaluating Interactions with N on-existing Automated Vehicles: Three Wizard of Oz Approaches. 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, (IV).
- Hariyono, J., & Jo, K. H. (2017). Detection of pedestrian crossing road: A study on pedestrian pose recognition. *Neurocomputing*, 234, 144–153.
- Hulse, L.M, Xie, H., & Galea, E.R. (2018). Perceptions of autonomous vehicles: Relationships with road users, risk, gender and age. *Safety Science*, 102, 1-13.
- Jayaraman, S. K., Creech, C., Robert Jr., L. P., Tilbury, D. M., Yang, X. J., Pradhan, A. K., & Tsui, K. M. (2018). Trust in AV: An Uncertainty Reduction Model of AV-Pedestrian Interactions. Companion of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction - HRI '18, 133–134.
- Kalantarov, S., Riemer, R., & Oron-Gilad, T. (2018). Pedestrians' road crossing decisions and body parts' movements. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 53, 155–171.
- Lagström, T., & Lundgren, V. M. (2015). AVIP - Autonomous vehicles in interaction with pedestrians, Master's thesis, Chalmers University of Technology, Gothenborg, Sweden, 2015.
- Lobjois, R., & Cavallo, V. (2007). Age-related differences in street-crossing decisions: the effects of vehicle speed and time constraints on gap selection in an estimation task. *Accident Analysis & Prevention*, 39, 934–943.
- Lobjois, R., & Cavallo, V. (2009). The effects of aging on street-crossing behavior: from estimation to actual crossing. *Accident Analysis & Prevention*, 41, 259–267.
- Madigan, R., Nordhoff, S., Fox, C., Amini, R.E., Louw, T., Wilbrink, M., Schieben, A., & Merat, N. (2019). Understanding interactions between Automated Road Transport Systems and other road users: A video analysis. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 66, 196-213.
- Merat, N., Louw, T., Madigan, R., Wilbrink, M., & Schieben, A. (2018). What externally presented information do VRUs require when interacting with fully Automated Road Transport Systems in shared space? *Accident Analysis and Prevention*, 118, 244–252.
- Millard-Ball, A. (2018). Pedestrians, Autonomous Vehicles, and Cities. *Journal of Planning Education and Research*, 38(1), 6–12.
- NHTSA (2017). Traffic Safety Facts 2015. National Highway Traffic Safety Administration, U.S. Washington. doi: DOT HS 812 409
- Noy, I. Y., Shinar, D., & Horrey, W. J. (2018). Automated driving: Safety blind spots. *Safety Science*, 102, 68–78.
- Nunes Velasco, J.P., Farah, H., van Arem, B., & Hagenzieker, M.P. (2019). Studying pedestrians' crossing behavior when interacting with automated vehicles using virtual reality. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 66, 1-14.
- Ohn-Bar, E., & Trivedi, M. M. (2016). Looking at Humans in the Age of Self-Driving and Highly Automated Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 1(1), 90–104.
- Oxley, J.A., Ihsen, E., Fildes, B.N., Charlton, J.L., & Day, R.H. (2005). Crossing roads safely: an experimental study of age differences in gap selection by pedestrians. *Accident Analysis & Prevention*, 37, 962–971.
- Penmetsa, P., Adanu, E.K., Wood, D., Wang, T., & Jones, S.L. (2019). Perceptions and expectations of autonomous vehicles – A snapshot of vulnerable road user opinion. *Technological Forecasting and Social Change*, 143, 9-13.
- Rahman, M.M, Deb, S., Strawderman, L., Burch, R., & Smith, B. (2019). How the older population perceives self-driving vehicles. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 65, 242-257.
- Razmi Rad, S., Homem de Almeida Correia, G., & Hagenzieker, M. (2020). Pedestrians' road crossing behaviour in front of automated vehicles: Results from a pedestrian simulation experiment using agent-based modelling. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 69, 101-119.
- Rasouli, A., Kotseruba, I., & Tsotsos, J. K. (2018). Are They Going to Cross? A Benchmark Dataset and Baseline for Pedestrian Crosswalk Behavior. Proceedings - 2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, ICCVW 2017, 2018-Janua, 206–213.

- Raza, M., Chen, Z., Rehman, S. U., Wang, P., & Bao, P. (2018). Appearance based pedestrians' head pose and body orientation estimation using deep learning. *Neurocomputing*, 272, 647–659.
- Rodriguez, P., Nuñez Velasco, J. P., Farah, H., & Hagenzieker, M. (2017). Safety of Pedestrians and Cyclists when Interacting with Self-Driving Vehicles – A Case Study of the WEpods. Master thesis. Delft University.
- Rodríguez Palmeiro, A., van der Kint, S., Vissers, L., Farah, H., de Winter, J. C. F., & Hagenzieker, M. (2018). Interaction between pedestrians and automated vehicles: A Wizard of Oz experiment. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 58, 1005–1020.
- Rothenbucher, D., Li, J., Sirkin, D., Mok, B., & Ju, W. (2016). Ghost driver: A field study investigating the interaction between pedestrians and driverless vehicles. 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, RO-MAN 2016, 795–802.
- Schieben, A., Wilbrink, M., Madigan, C. K. R., Louw, T., & Merat, N. (2018). Designing the interaction of automated vehicles with other traffic participants: A design framework based on human needs and expectations. *Cognition, Technology & Work* (August).
- Schmidt, S., & Färber, B. (2009). Pedestrians at the kerb - Recognising the action intentions of humans. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 12(4), 300–310.
- Sparrow, R., & Howard, M. (2017). When human beings are like drunk robots: Driverless vehicles, ethics, and the future of transport. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 80, 206–215.
- Sprenger, J., Kilger, H., Müller, C., Slusallek, P., & Malone, S. (2019, July). Capturing Subtle Motion Differences of Pedestrian Street Crossings. In *Proceedings of the 32nd International Conference on Computer Animation and Social Agents* (pp. 29-32).
- Tapiro, H., Borowsky, A., Oron-Gilad, T., & Parmet, Y. (2016). Where do older pedestrians glance before deciding to cross a simulated two-lane road? A pedestrian simulator paradigm. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting* (Vol. 60, No. 1, pp. 11-15). Sage CA: Los Angeles, CA: Sage Publications.
- Van Brummelen, J., O'Brien, M., Gruyer, D., & Najjaran, H. (2018). Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 89, 384–406.
- Wang, H., Wang, B., Liu, B., Meng, X., & Yang, G. (2017). Pedestrian recognition and tracking using 3D LiDAR for autonomous vehicle. *Robotics and Autonomous Systems*, 88, 71–78.
- Whitebread D, & Neilson, K. (2000). The contribution of visual search strategies to the development of pedestrian skills by 4–11 year-old children. *The British journal of educational psychology*, 70 (4), 539–557.
- Wilde, G. J. S. (1982). The theory of RHT: Implications for safety and health. *Risk Analysis*, 2, 209–226.
- Woodman, R., Lu, K., Higgins, M.D., Brewerton, S., Jennings, P., Birrell, S. (2019). Gap acceptance study of pedestrians crossing between platooning autonomous vehicles in a virtual environment. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 67, 1-14.
- Zito, G.A., Cazzoli, D., Scheffler, L., Jäger, M., Müri, R.M., Mosimann, U.P., Nyffeler, T., Mast, F.W., & Nef, T. (2015). Street crossing behavior in younger and older pedestrians: an eye- and head-tracking study. *BMC Geriatrics*, 15, 176-186.