



HAL
open science

Reconstitution sur piste de deux cas d'accidents avec des véhicules équipés d'un système autonome d'aide à l'évitement de collision avec des piétons (AEB)

Christophe Perrin, Nicolas Clabaux, Jean-Yves Fournier, Adrien Canu

► To cite this version:

Christophe Perrin, Nicolas Clabaux, Jean-Yves Fournier, Adrien Canu. Reconstitution sur piste de deux cas d'accidents avec des véhicules équipés d'un système autonome d'aide à l'évitement de collision avec des piétons (AEB). 2024. <hal-04989444>

HAL Id: hal-04989444

<https://hal.science/hal-04989444v1>

Submitted on 13 Mar 2025

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

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



HAL Authorization



Reconstitution sur piste de deux cas d'accidents avec des véhicules équipés d'un système autonome d'aide à l'évitement de collision avec des piétons (AEB)

Christophe Perrin, Nicolas Clabaux, Jean-Yves Fournier, Adrien Canu

Résumé : L'objectif de cette recherche était de confronter expérimentalement sur piste deux véhicules (une citadine et une compacte) équipés d'un système autonome d'aide à l'évitement de collision avec des piétons (AEB), à des situations d'accidents et d'examiner leur comportement dans ces situations. L'originalité de cette recherche réside dans le fait que les deux situations d'accidents auxquelles les véhicules ont été confrontés, correspondent à des cas d'accidents réels ayant fait l'objet d'une étude détaillée. Ces cas d'accidents ont d'autre part été sélectionnés parce qu'ils correspondent à des scénarios types d'accidents représentant un enjeu important en matière d'accidentalité des piétons (de l'ordre de 25 % des accidents de piétons recensés). Le premier cas d'accident correspond à un véhicule tournant dans une intersection et heurtant en sortie de carrefour un piéton non détecté par le conducteur. Le second correspond à un véhicule circulant en ligne droite et percutant un piéton non détecté. Vingt-quatre essais ont été réalisés pour le scénario de tourne à gauche et 31 pour le scénario ligne droite. Au-delà du nombre d'évitements ou d'impacts sur le mannequin impactable, nous avons également cherché à examiner l'effet que pourrait avoir certaines variables sur le taux d'évitement, comme par exemple la vitesse d'approche du véhicule, le type de véhicule, la position du soleil, etc. Les résultats montrent qu'en situation de tourne à gauche, aucun des deux véhicules n'a évité l'impact avec le piéton. Ce résultat est concordant avec les résultats obtenus dans d'autres travaux. Les systèmes de freinage automatique d'urgence qui sont pour l'instant les plus répandus dans le parc automobile, ne semblent pas conçus pour réagir face à un piéton traversant dans une courbe. Il serait toutefois intéressant de répliquer ce type d'étude dans les années à venir puisque désormais les véhicules neufs commencent à être équipés d'un AEB qui fonctionne en virage. Concernant le scénario de traversée d'un piéton en ligne droite, les essais réalisés correspondaient, comme dans le scénario précédent, à une situation a priori difficile pour le système, puisque le véhicule circulait cette fois face à un soleil rasant. En dépit de ces difficultés, les deux véhicules ont évité le piéton dans plus de la moitié des cas (18 essais sur 31), auxquels s'ajoutent trois cas dans lesquels la vitesse a été significativement réduite avant l'impact : réduction comprise entre 30 et 67 % de la vitesse initiale. Enfin, il est apparu que la "Compacte" évitait significativement plus souvent le piéton par rapport à la "Citadine" (86 % contre 43 %). Cela pourrait s'expliquer par la présence d'un radar en plus de la caméra sur la *Compacte*, alors que la *Citadine* ne dispose que d'une caméra.

Cette recherche a été conduite dans le cadre du projet SURCA (Sécurité des Usagers de Route et Conduite Automatisée) financé par la Fondation Sécurité Routière.

Mots clés : accident, piéton, freinage automatique d'urgence, AEB, aide à la conduite.

Affiliation des auteurs : Université Gustave Eiffel, LMA (Laboratoire Mécanismes d'accidents), F-13300 Salon-de-Provence, France.

Les auteurs tiennent à remercier Cédric Taurelle et Baptiste Ducrocq de la société Transpolis pour leur appui dans la préparation et la réalisation des essais.

Abstract: Effect of a pedestrian autonomous emergency braking system: reconstruction of two accidents on the test track

The aim of this study was to experimentally test two vehicles (a city car and a compact car) equipped with an Automatic Emergency Braking (AEB) system, in accident situations, and to examine their behavior in these situations. The originality of this study is that the two accident situations with which the vehicles were confronted corresponded to real accident cases which had been in-depth investigated. They were also selected because they corresponded to typical accident scenarios representing a major issue in terms of pedestrian accidents (around 25% of all pedestrian accidents recorded). The first scenario involved a vehicle turning into an intersection and striking a pedestrian not detected. The second involved a vehicle travelling in a straight line and colliding with a pedestrian not detected. 24 tests were carried out for the left-turn scenario and 31 for the straight-line scenario. The number of avoidances or impacts were studied. The effect that certain variables might have on the avoidance rate, such as approach speed, vehicle type, position of the sun, were studied. The results show that in the left-turn situation, neither vehicle avoided impact with the pedestrian. This result is consistent with the findings of other studies. Automatic emergency braking systems, which are currently the most widespread in the vehicle fleet, do not appear to be effective when the vehicle is turning. However, it would be interesting to replicate this study, as new vehicles are now starting to be fitted with an AEB that operates when the vehicle is turning. In the straight-line scenario, the vehicle travelled facing the sun, which is an a priori difficult situation for the system. Despite these difficulties, both vehicles avoided the pedestrian in more than half the cases (18 out of 31 trials), plus 3 cases in which the speed was significantly reduced before impact: a reduction of between 30% and 67% of the initial speed. It appeared that the “Compact” avoided the pedestrian significantly more often than the “City Car” (86% versus 43%). This could be explained by the presence of a radar in addition to the camera on the Compact, whereas the “City Car” has only a camera.

This research was carried out as part of the SURCA project funded by the Fondation Sécurité Routière.

Keywords: crash, pedestrian, autonomous emergency braking system, AEB, advanced driver assistance system, ADAS

1. Introduction

Le développement de véhicules hautement automatisés et leur déploiement dans les espaces publics supposent que ces véhicules soient en mesure de gérer les situations les plus complexes, de façon à ce qu'elles n'entraînent aucun dommage corporel. Cette exigence vaut en particulier pour les espaces denses fréquentés par de nombreux usagers vulnérables, en particulier les piétons. Elle nécessite que les automates embarqués dans les véhicules soient en mesure, au même titre que le conducteur d'un véhicule conventionnel, de mettre en œuvre un certain nombre de fonctions allant de la perception (détection, recherche d'information) à l'action, en passant par des étapes d'analyse, d'anticipation et de prise de décision (Van Elslande, 2003). D'un certain point de vue, les prémices de ces automates existent déjà dans certains véhicules contemporains équipés d'aides à la conduite conçues pour assister le conducteur dans certaines situations. Les travaux présentés ici s'intéressent aux systèmes d'aide à l'évitement de collision avec des piétons, généralement dénommés AEB (pour Automatic Emergency Braking). Le principe d'un système autonome d'aide à l'évitement de collision avec un piéton n'est pas nouveau puisque, dès les années 1950, les constructeurs automobiles américains ont expérimenté les premiers dispositifs (American Automobile Association, 2019). Leur introduction sur des véhicules de série est en revanche plus récente. En 2011, la Volvo S60 fut la première voiture de grande série à être équipée d'un tel dispositif. L'AEB consiste à freiner de façon autonome le véhicule lorsqu'un piéton se trouve sur la trajectoire du véhicule et qu'aucune action n'est entreprise par le conducteur pour éviter une collision imminente. L'AEB s'appuie généralement sur l'utilisation d'une ou deux caméras situées derrière le rétroviseur central, souvent couplées avec un radar situé dans la calandre, plus rarement avec un lidar. Différents travaux ont examiné l'efficacité potentielle ou réelle de ce dispositif.

Une première série de travaux a cherché à évaluer *ex ante* l'impact que pourrait avoir l'AEB sur les accidents de piétons si l'ensemble du parc automobile en était équipé (voir par exemple : Rosén et al., 2010 ; Chauvel et al., 2013 ; Hamdane et al., 2015). Ces travaux, qui s'appuient généralement sur l'analyse détaillée de plusieurs centaines de cas d'accidents, suggèrent que la généralisation de l'AEB pourrait conduire à une réduction de l'ordre de 40 % du nombre de piétons tués et de 27 % du nombre de piétons gravement blessés (voir Rosén et al., 2010 pour le cas de l'Allemagne). Lorsque le système s'appuie uniquement sur une caméra, les performances seraient *a priori* moins élevées (Combs et al., 2019).

Une deuxième série de travaux a examiné si les véhicules équipés de l'AEB étaient effectivement moins impliqués dans les accidents avec un piéton, toutes choses égales par ailleurs (voir par exemple les publications du HLDI, 2017 ou de Cicchino, 2022). Cette dernière montre par exemple que la présence de l'AEB sur un véhicule, est associée à un risque d'accident avec un piéton significativement plus faible d'environ 30 %. L'AEB ne semble en revanche avoir aucun effet significatif dans les situations de manœuvre tournante et pour les accidents survenant de nuit.

Nous rendons compte ci-après d'un travail exploratoire¹ visant à examiner l'efficacité de dispositifs autonomes d'aide à l'évitement de collision avec un piéton dans des situations d'accidents réels et correspondant à des enjeux importants en matière d'accidentalité. Deux cas d'accidents de piétons ayant fait l'objet d'une Étude Détaillée d'Accident (EDA) par les équipes de recueil du Laboratoire Mécanismes d'Accidents de l'Université Gustave Eiffel et correspondant aux deux scénarios types d'accidents les plus représentés en France, ont pour cela été reconstruits puis reconstitués sur piste.

L'utilisation d'un mannequin mobile impactable a permis de confronter deux véhicules équipés d'un système automatique de freinage d'urgence (AEB) à ces situations de piétons traversant et d'examiner l'influence de certains paramètres sur le taux d'évitement.

Enfin, une troisième série de travaux a cherché à confronter expérimentalement sur piste des véhicules équipés de l'AEB à différentes situations d'accidents de piétons et à examiner l'efficacité de l'AEB dans ces situations (voir par exemple American Automobile Association, 2019 ; HLDI, 2019 ; Mahdinia, Khattak et Haque, 2022). Les travaux de Mahdinia, Khattak et Haque (2022) ont porté sur 91 véhicules équipés de l'AEB, qui ont été confrontés à trois scénarios différents (deux scénarios de traversée d'un piéton et un scénario de piéton marchant longitudinalement dans le sens du véhicule). Les résultats montrent que dans 70 % des cas, le piéton est évité. Ils suggèrent également que plus les véhicules sont récents, plus le taux d'évitement est important. D'autre part, dans les cas où l'AEB n'est

¹ Ce travail exploratoire a été conduit dans le cadre du projet de recherche SURCA (Sécurité des usagers de la route et conduite automatisée) financé par la dévolution de la Fondation Sécurité Routière à l'IFSTTAR.

pas parvenu à éviter le piéton, la vitesse d'impact a été réduite, en moyenne de 50 %. C'est dans cette troisième série de travaux que le présent travail s'inscrit.

Nous commençons par décrire la démarche adoptée pour le choix des deux cas d'accidents puis présentons de façon sommaire ces deux cas. Quelques éléments relatifs aux aspects méthodologiques sont ensuite énoncés. Le protocole expérimental est alors exposé, suivi par la présentation des résultats obtenus, d'abord de manière globale, puis pour chacun des deux scénarios d'accident. Enfin, une conclusion reprend les principaux résultats et les met en perspective avec ceux obtenus dans d'autres travaux.

2. Méthode

2.1 Scénarios types d'accidents de piétons et sélection des cas d'accidents à reconstituer

L'étude de l'efficacité de l'AEB dans les situations d'accidents impliquant des piétons, qui mettent actuellement en difficulté les conducteurs, suppose de disposer de connaissances bien établies sur ces situations. S'agissant des situations et processus accidentels touchant les piétons, des scénarios types d'accidents ont été précisément documentés à partir d'échantillons de cas représentatifs des accidents recensés par les forces de l'ordre en France métropolitaine, sur la base de leurs procès-verbaux. Ces connaissances ont fait l'objet de publications (en particulier voir Brenac et al., 2003). Un travail de réévaluation des enjeux correspondant aux différents scénarios types d'accidents a fait l'objet d'un travail récent (voir Clabaux & Brenac, 2022).

Les scénarios types d'accidents de piétons n° 8 et n° 9 apparaissent comme étant les plus fréquents. Ils représentent respectivement 13,8 % et 11 % des cas, soit environ 1160 et 920 cas par an en France métropolitaine (estimation faite avec les données d'accidentalité de l'année 2018). La description détaillée de ces deux scénarios types est présentée Figure n° 1.

Le scénario type 8 correspond à des accidents se produisant en carrefour, impliquant un véhicule tournant depuis une voie principale vers une rue secondaire et heurtant un piéton traversant, non détecté, à la sortie du carrefour. Ce scénario type met en jeu des situations de concurrence attentionnelle (contrôle du trafic et des mouvements de piétons dans deux directions) et des prises d'information en direction du piéton dans les secteurs avant-gauche ou avant-droit. On notera que le conducteur ne réalise généralement pas de manœuvre d'évitement du piéton. La part de ces accidents semble être en augmentation ces dernières années (Clabaux & Brenac, 2022).

Le scénario type 9 correspond à des accidents se produisant sur des infrastructures urbaines larges, dans lesquels un piéton s'engage en confiance sur un passage piéton et n'est pas détecté par un automobiliste. Les cas relevant de ce scénario type impliquent généralement des piétons âgés ou, au contraire, très jeunes, qui ont tendance à traverser davantage sur les passages piétons et à parfois s'appuyer sur une présumée protection offerte par le passage piétons. Les infrastructures sur lesquelles se produisent généralement ces accidents donnent, d'un autre côté, le sentiment à l'automobiliste de circuler sur une voie aménagée pour l'automobile, ce qui se traduit souvent par des attentes inappropriées quant à la présence éventuelle de piétons. Les mauvaises conditions de visibilité parfois constatées dans les accidents relevant de ce scénario type, ont également contribué à la non-détection du piéton (Brenac et al., 2003).

Les investigations présentées dans la suite du document porteront sur ces deux scénarios types. Le choix de ces deux scénarios types présente en effet le double avantage de pouvoir confronter les systèmes automatiques d'évitement de collision à des situations d'accidents qui, d'une part, représentent un enjeu fort en termes d'accidentalité et, d'autre part, sont des situations *a priori* difficiles pour l'automate (mauvaises conditions de visibilité, véhicule en train d'effectuer une manœuvre tournante).

Figure n° 1 : Description des scénarios types 8 et 9

SCÉNARIO TYPE N° 8
Situation de conduite
Un véhicule circule en agglomération dans une intersection généralement large, en provenance d'une voie principale, et s'apprête à tourner à gauche ou à droite. Un piéton, souvent âgé, commence (ou s'apprête) à traverser la branche de destination du véhicule, en général sur un passage piéton.
Situation d'accident
Le conducteur réalise sa manœuvre de changement de direction alors que le piéton poursuit ou engage sa traversée. Le plus souvent, le conducteur n'a pas vu le piéton, ou très tardivement.
Situation d'urgence
Dans la plupart des cas, le conducteur ne réalise pas de manœuvre d'urgence.
Situation de choc
Le véhicule heurte le piéton.
SCÉNARIO TYPE N° 9
Situation de conduite
Un véhicule circule, généralement en agglomération, sur une infrastructure large et/ou rapide. Un piéton, souvent âgé ou au contraire enfant ou adolescent, est en attente (ou en cours) de traversée, sur un passage piéton.
Situation d'accident
Le conducteur continue sa progression alors que le piéton engage ou poursuit sa traversée de chaussée. En général, le piéton détecte le véhicule mais estime qu'il est assez loin et/ou ne s'attend pas à ce qu'il poursuive sa progression sans ralentir, compte tenu de la présence du passage piéton. Le conducteur détecte trop tardivement le piéton, ou s'attend à ce que le piéton ne s'engage ou ne poursuive pas sa traversée.
Situation d'urgence
Selon les cas, il y a freinage d'urgence ou aucune manœuvre d'urgence n'est réalisée.
Situation de choc
Le véhicule heurte le piéton.

L'étape suivante a consisté à identifier, dans l'accidenthèque EDA du Laboratoire Mécanismes d'Accidents de l'Université Gustave Eiffel, un cas d'accident illustratif de chacun de ces deux scénarios types. Les informations recueillies par les équipes d'enquêteurs permettent généralement d'accéder à une très bonne compréhension du cas et de réaliser une reconstruction cinématique du déroulement de l'accident. Parmi les différents cas correspondant aux scénarios types 8 et 9, nous avons retenu les deux accidents suivants.

2.1.1 Accident Toyota Starlet contre piéton

Cet accident s'apparente au scénario type 8. Il implique un conducteur d'une Toyota Starlet (voiture citadine) qui, dans une intersection en T, tourne à gauche en direction d'une rue secondaire sans détecter un piéton traversant en limite de passage piéton. L'avant gauche du véhicule heurte le piéton, alors situé au niveau de l'axe médian de la chaussée, le projetant au sol. Le piéton sera légèrement blessé dans l'accident. D'après l'ensemble des éléments du dossier, en particulier les entretiens réalisés sur place, puis quelques jours plus tard avec les personnes impliquées, il ressort que le conducteur était arrêté au niveau d'une zone de stockage réservée aux véhicules tournant à gauche et qu'il n'a jamais détecté le piéton avant le choc. Son attention était en effet focalisée sur la surveillance du trafic circulant en sens inverse et sur le choix d'un créneau d'insertion. Il semble également avoir été en partie distrait par une connaissance située dans un véhicule en attente au stop, à qui il a fait un signe de la main. Le piéton, un homme d'une soixantaine d'années, avait bien détecté la Toyota avant d'engager sa traversée, mais pensait avoir le temps de traverser la première partie de la chaussée avant que celle-ci ne redémarre et

ne survienne. À noter également qu'il existe un contraste entre la première moitié de la rue traversée par le piéton, qui est dans l'ombre, et la seconde moitié exposée au soleil. Ce contraste n'a peut-être pas facilité la détection du piéton par le conducteur. La Figure n° 2 présente succinctement le lieu de l'accident ainsi qu'un schéma de l'accident.

Figure n° 2 : Schéma de l'accident (Toyota Starlet contre piéton)

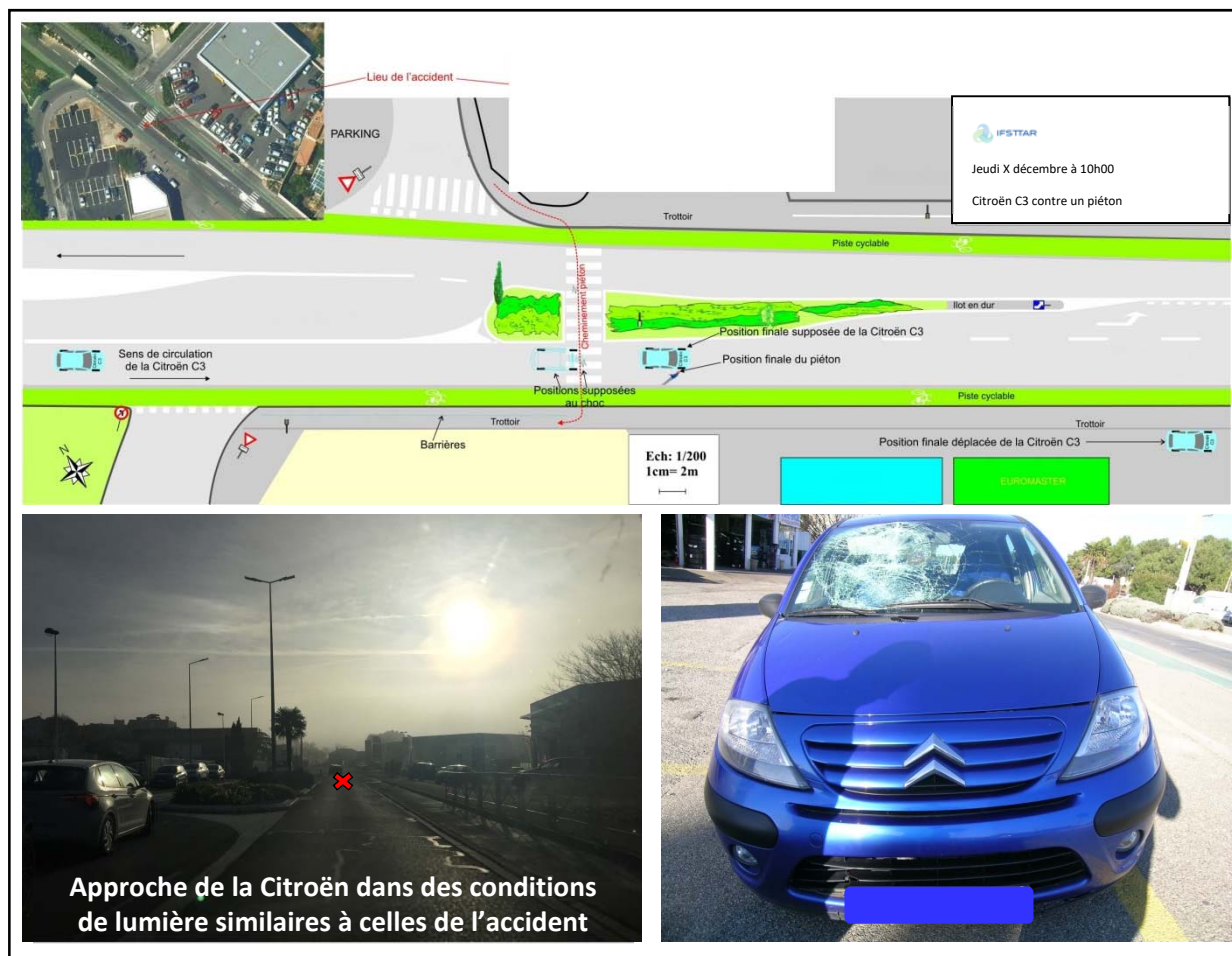


2.1.2 Accident Citroën C3 contre piéton

Cet accident s'apparente au scénario type 9. Il s'est produit sur un axe situé en périphérie de ville, dans une zone d'activités comprenant des concessionnaires et des garages automobiles de part et d'autre de la voie. L'accident implique une Citroën C3 conduite par un homme d'environ 80 ans. Ébloui par le soleil, il ne perçoit pas un piéton qui traverse de gauche à droite sur un passage piéton. La Citroën C3 heurte le piéton. L'impact est légèrement décalé à droite par rapport à l'axe de la voiture. Le piéton est projeté sur le pare-brise, puis retombe au sol à environ 7 mètres du point de choc. D'après l'ensemble des éléments du dossier, en particulier les entretiens réalisés sur place, puis quelques jours plus tard, il ressort que le conducteur avait l'habitude d'effectuer ce trajet et connaissait bien les lieux. Le jour de l'accident, le soleil était rasant, avec une hauteur de l'ordre de 15 degrés par rapport à l'horizon. Il déclare à la psychologue avoir été gêné par le soleil et avoir mis le pare-soleil et regardé le bord de la route. Il ne perçoit le piéton qu'au moment du choc et ne réalise pas de manœuvre d'urgence. Il circule alors à environ 30 km/h. Le piéton, un homme d'environ 80 ans, effectue un trajet qu'il connaît bien. Il traverse sur le passage piéton. Des îlots protègent les piétons et leur permettent de traverser le boulevard en deux temps. La présence de végétation (arbre, buissons, etc.) sur l'îlot a pu également masquer le piéton à certains moments de sa traversée. C'est lors de la traversée de la deuxième partie de la chaussée

qu'il est heurté par la Citroën C3. Le piéton décédera dans les jours suivant l'accident. La Figure n° 3 présente succinctement le lieu de l'accident, le véhicule impliqué, ainsi qu'un schéma de l'accident.

Figure n° 3 : Schéma de l'accident (Citroën C3 contre piéton)



2.2 Protocole expérimental

Les deux accidents retenus ont été reconstitués avec l'appui de la société Transpolis. Une première étape a consisté à sélectionner les sites les mieux adaptés aux deux accidents sur leur centre d'essais dédiés à la sécurité des véhicules et des infrastructures (Saint-Maurice-de-Rémens, Ain). Les critères d'aménagement, d'infrastructure et d'orientation par rapport au soleil ont été déterminants. Les deux sites retenus se trouvaient dans la partie *Ville* du centre d'essais. La prestation fournie par Transpolis incluait : la mise à disposition des sites, leurs aménagements (marquages au sol, bordures de trottoir, etc.), la fourniture de la cible "piéton impactable" ainsi que du temps d'expérimentateurs pour la préparation des essais, le pilotage de la cible et des véhicules de test. La prestation demandée n'incluait pas d'acquisition de mesures spécifiques (position, vitesse, accélération), ni l'asservissement des mouvements des deux mobiles.

Le banc de test "piéton" utilisé était de marque ABDynamics. Il comprenait un mannequin impactable (fourni par Transpolis) et une plateforme mobile pilotée (fournie par l'Université Gustave Eiffel). Cet équipement est conçu pour la mise au point des AEB et leurs évaluations selon les standards Euro NCAP (European New Car Assessment Program). Pour plus de renseignements, on pourra consulter ACEA (2016).

Les deux véhicules de test ont été fournis par l'Université Gustave Eiffel. Le premier était une automobile de type *Citadine polyvalente*, appartenant au segment B (B2), mise en circulation en octobre 2020. Nous l'appellerons par la suite *Citadine*. Ce véhicule était équipé d'un AEB utilisant uniquement une caméra implantée derrière le pare-brise, au-dessus du rétroviseur intérieur.

Le deuxième véhicule testé était une automobile de type *Berline compacte*, du segment C (ou M1), mise en circulation en novembre 2019. Nous l'appellerons *Compacte*. Elle était équipée d'un AEB plus complexe utilisant à la fois une caméra, comme la *Citadine*, et un radar logé derrière la calandre avant.

La configuration cinématique de chaque accident a été reproduite au mieux, c'est-à-dire que les positions et vitesses de chacun des mobiles (piéton et voiture) ont été reproduites de manière à ce que, si l'AEB n'intervient pas, le choc ait lieu dans la même configuration que celle de l'accident réel. Le pilote essayeur de la voiture de test avait une trajectoire et une vitesse imposées. Le mouvement du piéton était déclenché par le passage du véhicule de test devant une cellule optique.

Trois caméras (deux à 60 images par seconde et une à 30 images par seconde) à déclenchement synchronisé ont filmé tous les essais. Une caméra était positionnée à l'intérieur du véhicule test (dirigée vers le volant et l'avant du véhicule), une autre sur le toit (dirigée vers l'avant) et une sur un trépied fixe, filmant la scène dans l'axe de la trajectoire du piéton.

Nous avons équipé sommairement les véhicules de test d'un système d'acquisition basé sur une application smartphone qui enregistre principalement les accélérations et vitesses de rotation sur les trois axes à une fréquence de 50 Hz, ainsi que les positions via un capteur externe GPS/GLONAS à une fréquence d'acquisition de 10 Hz. La principale utilisation de ce système d'acquisition a été d'indiquer sa vitesse réelle au conducteur et de vérifier *a posteriori* le respect des vitesses de consigne.

Compte tenu de l'instrumentation sommaire de ces essais, les résultats attendus étaient principalement qualitatifs : *accident évité*, ou *vitesse d'impact réduite*, ou *aucun effet*.

2.2.1 Reconstitution de l'accident Scénario type 8 - Tourne à gauche

La reconstruction cinématique de l'accident est présentée Figure n° 4. Le véhicule était arrêté, en attente de pouvoir réaliser sa manœuvre de tourne à gauche. Il démarre avec une accélération relativement faible, il a 10 m à parcourir jusqu'au point de choc et heurte le piéton avec une vitesse d'environ 15 km/h. Ce mouvement correspond à une accélération moyenne d'environ 0.9 m/s², en accord avec les résultats des travaux de Happer et al. (2009). Le piéton, quant à lui, a 4 mètres à parcourir et marche à environ 5 km/h. Il est heurté par la voiture au niveau du phare avant gauche.

La Figure n° 5 présente le plan du site tel qu'il a été aménagé pour s'approcher au mieux de celui de l'accident. Des marquages au sol ont été réalisés, des bordures de trottoir positionnées, ainsi que deux véhicules en attente au stop. En réalité, il s'agit pour l'expérimentation d'un véhicule léger et de la remorque de commande du banc de test "Piéton". Des photographies des deux sites, celui de l'accident EDA et celui de la reconstitution, sont présentées Figure n° 6.

Figure n° 4 : Reconstruction cinématique du cas EDA retenu pour le scénario type 8 - Tourne à gauche



Figure n° 5 : Plan du site de la reconstitution sur piste de l'accident EDA Scénario type 8
Tourne à gauche - Site de TRANSPOLIS

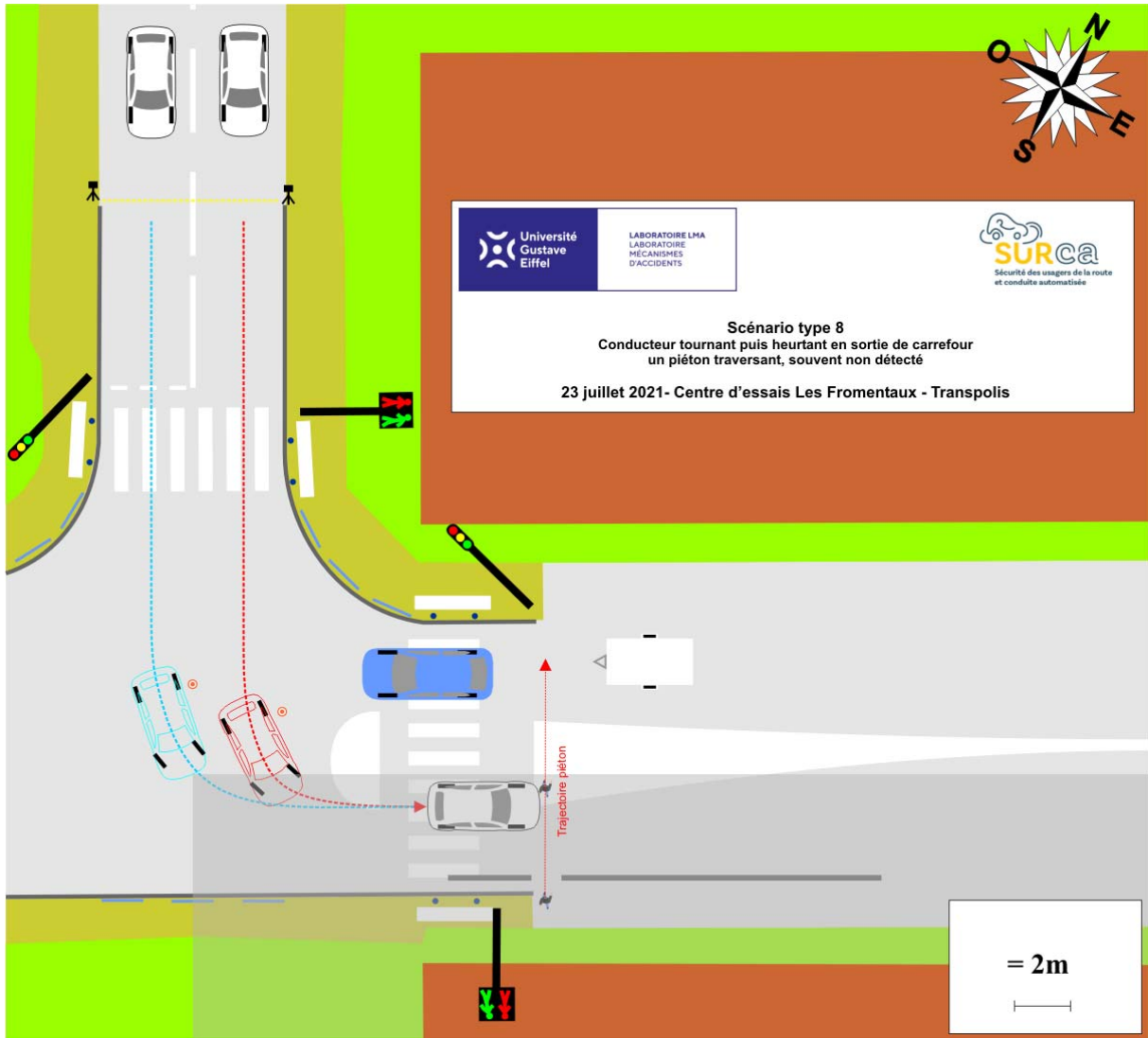


Figure n° 6 : Comparaison des sites Accident / Reconstitution Scénario type 8 - Tourne à gauche



Site Accident EDA



Site Reconstitution TRANSPOLIS

Dans l'accident réel, le VL est à l'arrêt, en attente de pouvoir démarrer sa manœuvre de tourne à gauche. Il a environ 10 m à parcourir jusqu'au point de choc et sa vitesse d'impact a été évaluée à 15 km/h. Afin de permettre la répétabilité de nos essais, nous avons choisi pour les reconstitutions un mouvement à vitesse constante correspondant à la vitesse d'impact de 15 km/h. Des essais ont également été réalisés à une vitesse plus élevée : 20 km/h.

Dans ce cas réel, le piéton est heurté à la fin, ou juste avant la fin, de la manœuvre de tourne à gauche. Il nous a semblé intéressant d'examiner l'effet d'un "éloignement" de la trajectoire de traversée du piéton afin d'augmenter le temps entre le début de la manœuvre de tourne à gauche et le conflit avec le piéton. Toutefois, le banc de test piéton étant difficile à déplacer, nous avons préféré décaler la trajectoire d'approche du VL avant son tourne à gauche (TàG) (cf. Figure n° 5). Si l'on mesure la distance entre l'axe de la trajectoire du VL en approche (avant le TàG) et l'axe de la trajectoire de traversée du piéton, nous obtenons 11 m dans les conditions de l'accident (trajectoire en rouge sur la Figure n° 5). Nous avons également réalisé des essais avec une distance de 14 m, ce qui équivaut à décaler la trajectoire de traversée du piéton de 3 m (trajectoire en bleu sur la Figure n° 5).

Le pilote essayeur de la voiture de test avait donc une trajectoire et une vitesse imposées. Le mouvement du piéton (4 m à parcourir à 5 km/h) était déclenché par le passage du véhicule de test devant une cellule optique, décalé dans le temps d'un délai adéquat (cf. Tableau n° 1). La synchronisation a été faite de manière à ce que, si l'AEB n'intervient pas, le choc ait lieu dans la même configuration que celle de l'accident réel (sauf pour les paramètres volontairement modulés).

Tableau n° 1 : Cinématiques utilisées pour les reconstitutions - Scénario type 8 Tourne à Gauche

CONFIGURATION DE L'ACCIDENT REEL Vitesse d'approche 15km/h d(AppVL/trajPiét) = 11 m	VL			Piéton	
	Distance (m)	Vitesse (km/h)	TEMPS (s)	Distance (m)	Vitesse (km/h)
Passage VL devant Cellule optique	-30	15	-7.2	-4	0
Départ Piéton	-12	15	-2.88	-4	0
Choc théorique	0	15	0	0	5

Trigger
Délai entre Passage VL devant Cellule optique et Démarrage piéton (s)
4.32

Configuration Vitesse d'approche 20 km/h d(AppVL/trajPiét) = 11 m	VL			Piéton	
	Distance (m)	Vitesse (km/h)	TEMPS (s)	Distance (m)	Vitesse (km/h)
Passage VL devant Cellule optique	-30	20	-5.56	-4	0
Départ Piéton	-16	20	-2.88	-4	0
Choc théorique	0	20	0	0	5

Trigger
Délai entre Passage VL devant Cellule optique et Démarrage piéton (s)
2.68

Configuration Vitesse d'approche 15 km/h d(AppVL/trajPiét) = 14 m	VL			Piéton	
	Distance (m)	Vitesse (km/h)	TEMPS (s)	Distance (m)	Vitesse (km/h)
Passage VL devant Cellule optique	-31.4	15	-7.54	-4	0
Départ Piéton	-12	15	-2.88	-4	0
Choc théorique	0	15	0	0	5

Trigger
Délai entre Passage VL devant Cellule optique et Démarrage piéton (s)
4.66

Configuration Vitesse d'approche 20 km/h d(AppVL/trajPiét) = 14 m	VL			Piéton	
	Distance (m)	Vitesse (km/h)	TEMPS (s)	Distance (m)	Vitesse (km/h)
Passage VL devant Cellule optique	-31.4	20	-5.65	-4	0
Départ Piéton	-16	20	-2.88	-4	0
Choc théorique	0	20	0	0	5

Trigger
Délai entre Passage VL devant Cellule optique et Démarrage piéton (s)
2.77

La distance entre l'axe de la trajectoire de traversée du piéton et l'axe de trajectoire du VL avant sa manœuvre de tourne à gauche est appelée d(AppVL/trajPiét)

Pour le Scénario type 8 - Tourne à gauche, le plan d'expérience faisait varier quatre paramètres (les valeurs soulignées sont les valeurs de l'accident réel EDA) :

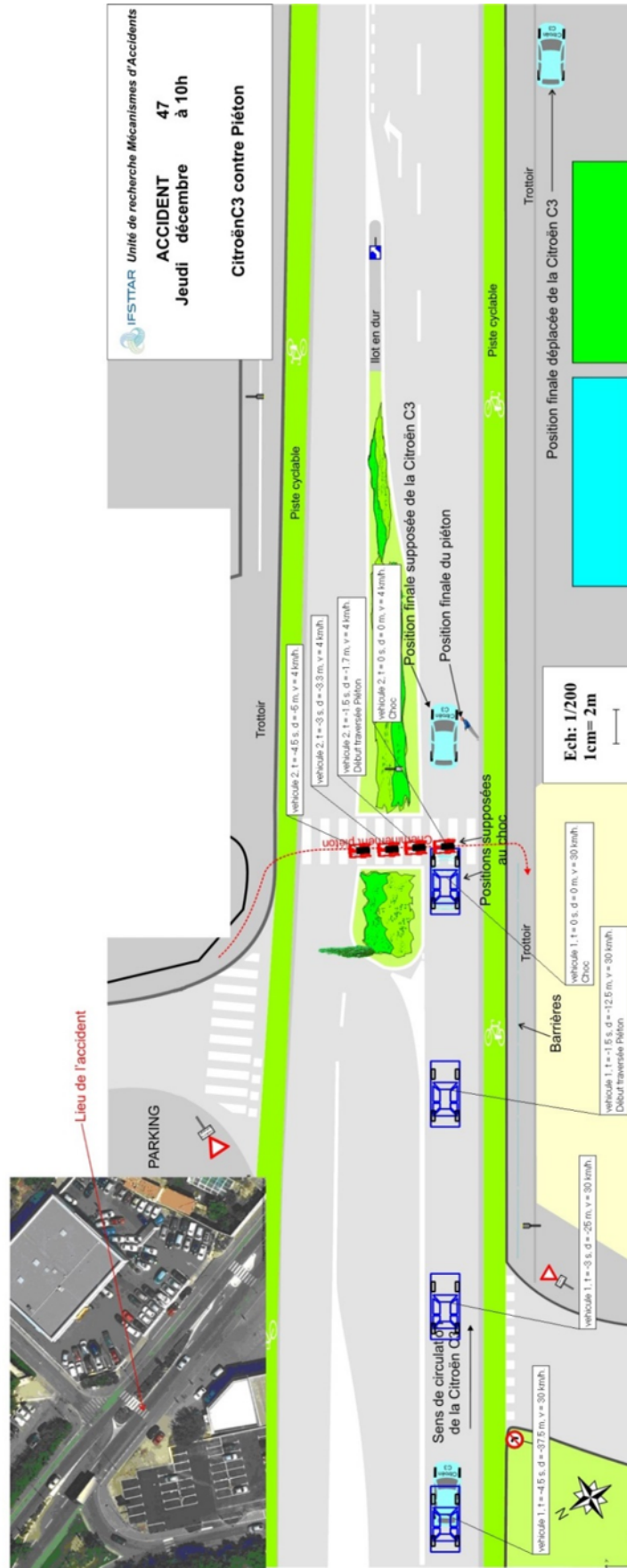
- Vitesse d'impact : 15 et 20 km/h,
- Véhicules : Citadine - Compacte,
- Sensibilité de l'alerte AEB (FCW) : normale - élevée,
- Distance entre la trajectoire de traversée du piéton et l'axe longitudinal du VL en position initiale à l'arrêt, en attente pour tourner à gauche : 11 m – 14 m.

Au total, 24 essais ont été réalisés.

2.2.2 Reconstitution de l'accident Scénario type 9 - Ligne droite

La reconstruction cinématique de l'accident (Figure n° 7) et les déformations du véhicule impliqué indiquent les positions et vitesses de chacun des deux mobiles au moment du choc : la vitesse du piéton âgé a été estimée à 4 km/h et celle de l'automobile à 30 km/h, le choc est légèrement décalé à sur la droite du véhicule (2/3 de voie environ).

Figure n° 7 : Reconstruction cinématique du cas EDA retenu pour le scénario type 9 - Ligne droite



Pour la reconstitution, la Figure n° 8 présente le plan du site aménagé pour reproduire au mieux le site de l'accident. Des marquages au sol ont été réalisés, des bordures de trottoir ont été positionnées, ainsi qu'un VL en stationnement et un arbre susceptibles de perturber la perception du piéton (voir également Figure n° 9).

Le Tableau n° 2 présente les caractéristiques des mouvements et leur synchronisation. La vitesse d'approche nominale, correspondant à celle de l'accident réel, est de 30 km/h, mais nous avons également réalisé des essais à 20 et 40 km/h.

Figure n° 8 : Plan du site de la reconstitution sur piste de l'accident EDA – Scénario type 9 - Ligne droite. Site de TRANSPOLIS



Figure n° 9 : Comparaison des sites Accident / Reconstitution, Scénario type 9 - Ligne droite



Site Accident EDA



Site Reconstitution TRANSPOLIS

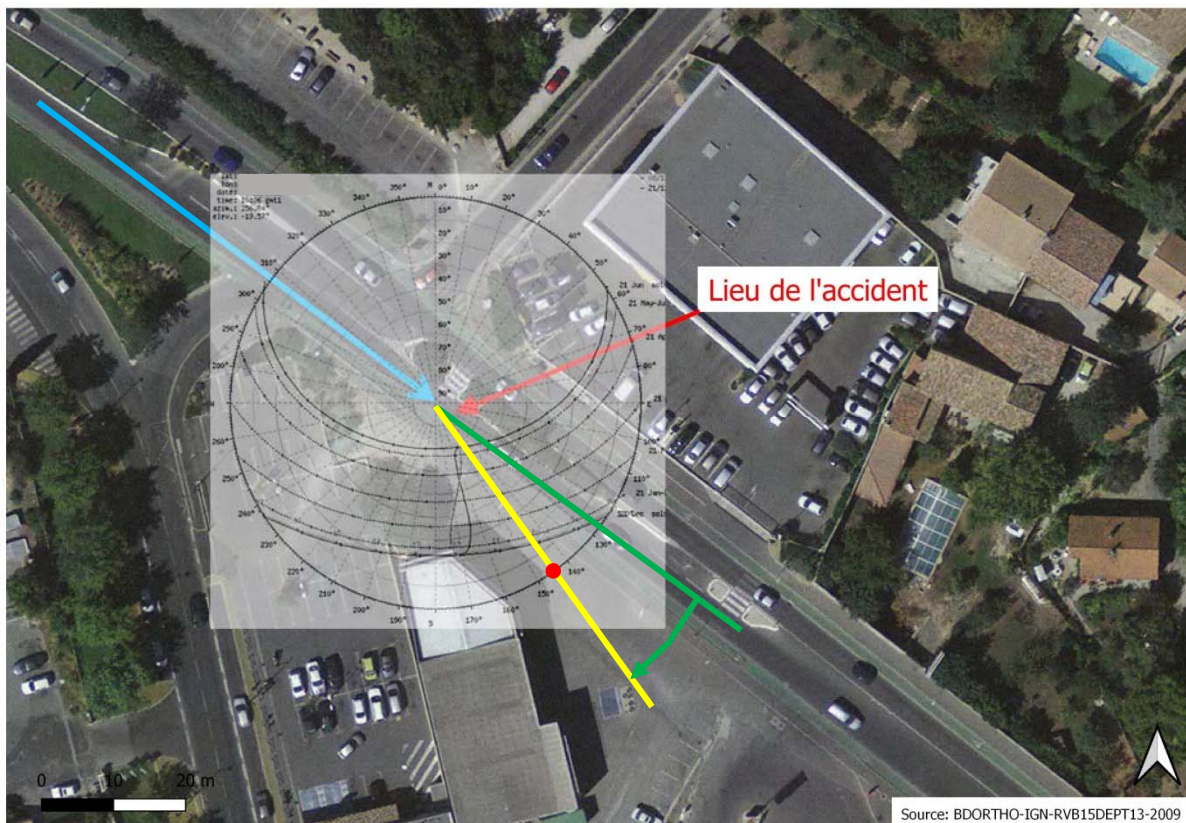
Tableau n° 2 : Cinématiques utilisées pour les reconstitutions - Scénario type 9 - Ligne Droite

Configuration	VL			Piéton		Trigger Délai entre Passage VL devant Cellule optique et Démarrage piéton (s)
	Distance (m)	Vitesse (km/h)	TEMPS (s)	Distance (m)	Vitesse (km/h)	
Configuration Vitesse d'approche 40 km/h						
Passage VL devant Cellule optique	-60	40	-5.4	-5.5	0	0
Départ Piéton						
Choc théorique	0	40	0	0	4	
CONFIGURATION DE L'ACCIDENT REEL 30km/h						
Passage VL devant Cellule optique	-60	30	-7.2	-5.5	0	1.8
Départ Piéton	-45	30	-5.4	-5.5	0	
Choc théorique	0	30	0	0	4	
Configuration Vitesse d'approche 20 km/h						
Passage VL devant Cellule optique	-60	20	-10.8	-5.5	0	5.4
Départ Piéton	-30	20	-5.4	-5.5	0	
Choc théorique	0	20	0	0	4	

Pour cet accident, les conditions de luminosité, avec un soleil rasant et éblouissant, ont été identifiées comme l'un des principaux facteurs ayant joué un rôle dans la production de l'accident. Nous avons donc veillé à ce que ces conditions soient les plus similaires possibles entre l'accident réel et la reconstitution sur piste.

En se positionnant au niveau du point de choc de l'accident, à la date et à l'heure de l'accident, d'après l'Observatoire de Paris, l'élévation du soleil était de 15°48 et l'azimut de 145°29 (Source : <https://ssp.imcce.fr>, accès le 9 juin 2021). L'angle entre la trajectoire de l'automobile (126°) et l'azimut du soleil (145°) était donc de l'ordre de 19° (cf. Figure n° 10).

**Figure n° 10 : Angle entre la trajectoire du VL et l'azimut du soleil
Accident EDA Scénario type 9 - Ligne droite**



Source : Les calculs d'éphémérides de position des corps du Système solaire ont été réalisés par le service de calcul des éphémérides de l'IMCCE à travers son portail Système solaire (<https://ssp.imcce.fr>)

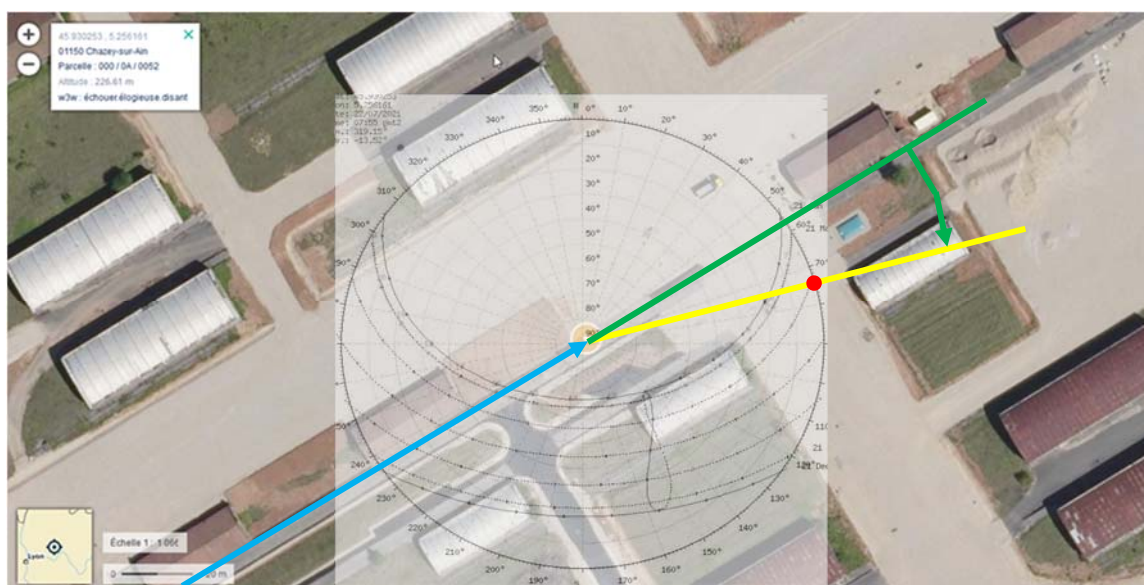
Les coordonnées du site choisi pour la reconstitution sont 45.930253 N et 5.256161 E. À cet endroit, le matin du 22 juillet 2021, d'après l'observatoire de Paris, l'élévation du soleil la plus proche de celle de l'accident (15°48) était à 7 h 55 (cf. Tableau n° 3) avec une valeur de 15°59. À cette heure, l'azimut était de 77°14.

Tableau n° 3 : Éphémérides de position des corps du Système solaire

Soleil (Étoile)													
Date	TSL	h	α	δ	HA	Az	H	AM	ρ_{obs}	m_{v}	$\Delta\alpha\cos\delta$	$\Delta\delta$	v_{r}
		h	h	deg	h	deg	deg		au	mag	arcsec/min	arcsec/min	km/s
2021-07-22T05:00:00.000	1:21:42.5520	8:07:09.9813	20°13'33.785"	17:14:32.6400	67°54'46.080"	6°52'49.800"	7.858	1.015974268989	-26.71	2.3380087	-0.4910771	-0.4429198	
2021-07-22T05:04:59.999	1:26:43.3680	8:07:10.8121	20°13'31.329"	17:19:32.5200	68°46'13.080"	7°41'16.800"	7.113	1.015973379486	-26.71	2.3374351	-0.4910895	-0.4441749	
2021-07-22T05:10:00.000	1:31:44.1840	8:07:11.6428	20°13'28.873"	17:24:32.4000	69°37'30.000"	8°30'01.080"	6.49	1.015972487609	-26.71	2.3368592	-0.4911061	-0.4452878	
2021-07-22T05:15:00.000	1:36:45.0000	8:07:12.4733	20°13'26.417"	17:29:32.6400	70°28'37.560"	9°19'01.200"	5.964	1.015971593642	-26.71	2.3362814	-0.4911271	-0.4462582	
2021-07-22T05:20:00.000	1:41:45.8160	8:07:13.3035	20°13'23.961"	17:34:32.5200	71°19'36.840"	10°08'16.800"	5.513	1.015970697873	-26.71	2.335702	-0.4911523	-0.4470856	
2021-07-22T05:25:00.000	1:46:46.6680	8:07:14.1335	20°13'21.504"	17:39:32.4000	72°10'29.280"	10°57'47.520"	5.124	1.015969800589	-26.71	2.3351211	-0.4911818	-0.4477695	
2021-07-22T05:30:00.000	1:51:47.4840	8:07:14.9633	20°13'19.048"	17:44:32.6400	73°01'15.960"	11°47'32.280"	4.784	1.015968902077	-26.71	2.3345392	-0.4912157	-0.4483097	
2021-07-22T05:35:00.000	1:56:48.3000	8:07:15.7930	20°13'16.592"	17:49:32.5200	73°51'57.960"	12°37'30.720"	4.486	1.015968002626	-26.71	2.3339564	-0.4912539	-0.4487059	
2021-07-22T05:40:00.000	2:01:49.1160	8:07:16.6224	20°13'14.135"	17:54:32.4000	74°42'36.360"	13°27'41.760"	4.221	1.015967102525	-26.71	2.333373	-0.4912963	-0.4489579	
2021-07-22T05:45:00.000	2:06:49.9320	8:07:17.4516	20°13'11.679"	17:59:32.6400	75°33'12.960"	14°18'05.040"	3.986	1.015966202064	-26.71	2.3327894	-0.4913432	-0.4490657	
2021-07-22T05:49:59.999	2:11:50.7480	8:07:18.2806	20°13'09.222"	18:04:32.5200	76°23'48.840"	15°08'39.840"	3.775	1.015965301531	-26.71	2.3322057	-0.4913943	-0.4490291	
2021-07-22T05:55:00.000	2:16:51.5640	8:07:19.1093	20°13'06.764"	18:09:32.4000	77°14'25.080"	15°59'25.440"	3.585	1.015964401216	-26.71	2.3316223	-0.4914498	-0.4488482	
2021-07-22T06:00:00.000	2:21:52.4160	8:07:19.9379	20°13'04.307"	18:14:32.6400	78°05'03.120"	16°50'21.480"	3.414	1.015963501408	-26.71	2.3310394	-0.4915095	-0.4485231	
2021-07-22T06:05:00.000	2:26:53.2320	8:07:20.7662	20°13'01.849"	18:19:32.5200	78°55'44.400"	17°41'26.520"	3.258	1.015962602397	-26.71	2.3304573	-0.4915736	-0.448054	
2021-07-22T06:10:00.000	2:31:54.0480	8:07:21.5944	20°12'59.391"	18:24:32.4000	79°46'30.000"	18°32'40.920"	3.116	1.015961704471	-26.71	2.3298762	-0.4916421	-0.4474411	
2021-07-22T06:15:00.000	2:36:54.8640	8:07:22.4223	20°12'56.933"	18:29:32.2800	80°37'22.080"	19°24'03.240"	2.985	1.015960807918	-26.71	2.3292965	-0.4917148	-0.4466846	

Source : <https://ssp.imcce.fr> (nota : l'heure indiquée correspond à l'heure UTC)

Figure n° 11 : Angle entre la trajectoire du VL et l'azimut du soleil - Site Transpolis Scénario type 9 Ligne droite



Source : <https://ssp.imcce.fr> et <http://www.geoportail.fr>

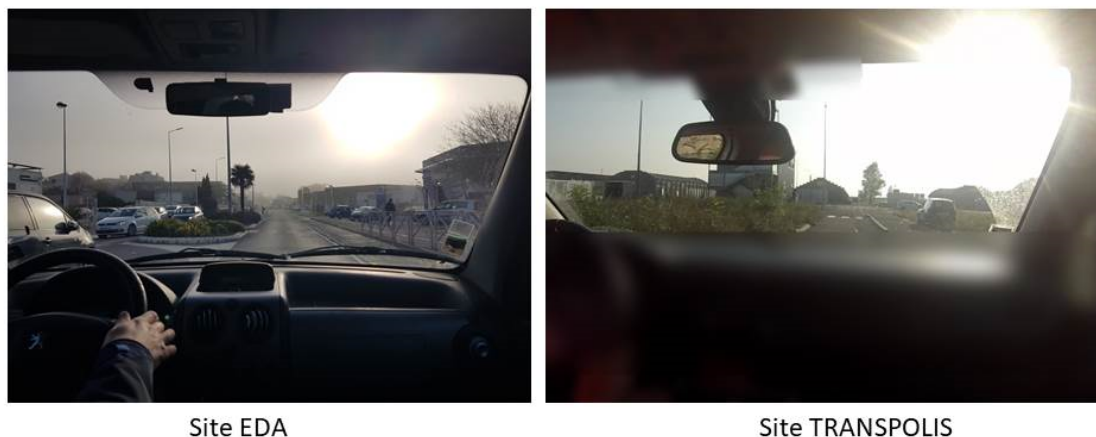
La Figure n° 11 permet d'évaluer l'angle entre la trajectoire du véhicule en approche du point de choc (60°) et l'azimut du soleil (77°) soit une valeur d'environ 17°.

Le Tableau n° 4 présente un récapitulatif des conditions de luminosité "soleil éblouissant" entre l'accident réel et sa reconstitution sur le site de Transpolis et la Figure n° 12 illustre le résultat en présentant deux photos prises de l'intérieur d'un véhicule sur les deux lieux, aux dates et heures correspondantes.

Tableau n° 4 : Comparaison des conditions de luminosité, position du soleil

	Date	Heure	Cap VL	Azimut	Élévation	Angle du Soleil/axe VL
Site accident	xx/12/yyyy	10h06	126°	145°29	15°48	19°
Site reconstitution	22/07/2021	07h55	60°	77°14	15°59	17°

Figure n° 12 : Condition d'éblouissement, comparaison accident EDA / reconstitution



Le niveau de sensibilité de l'alerte de l'AEB (généralement appelé FCW pour Forward Collision Warning), a également été modulé selon les trois modalités offertes par le système sur les deux véhicules de test (voir le récapitulatif du plan d'expérience présentés ci-après).

Pour le Scénario type 9 - VL en ligne droite, le plan d'expérience faisait varier quatre paramètres (les valeurs soulignées sont les valeurs de l'accident réel EDA) :

- Vitesse d'impact : 20 - 30 – 40 km/h,
- Véhicules : Citadine - Compacte,
- Sensibilité de l'alerte AEB (FCW) : basse - normale - élevée,
- Position du soleil (élévation et azimut) : le premier essai a eu lieu vers 7 h 50 (les conditions les plus proches de celles de l'accident étaient estimées à 7 h 55). L'élévation et l'azimut du soleil ont évolué au fil du déroulement des essais.

Au total, 31 essais ont été réalisés entre 7 h 51 et 10 h 49.

3. Résultats

3.1 Résultats généraux

Parmi les 55 essais réalisés (24 pour le scénario type 8 - Tourne à gauche et 31 pour le scénario type 9 - Ligne droite), on observe que l'AEB a permis d'éviter l'accident dans 18 cas, soit près d'un cas sur trois. Cette proportion est nettement inférieure à celle observée par Mahdinia, Khattak et Haque (2022), dont les travaux, portant sur un nombre considérablement plus élevé d'essais (n=3095), ont observé un taux d'évitement de 70 %.

L'AEB a également contribué à réduire significativement la vitesse d'impact dans trois cas supplémentaires. Ainsi, globalement, le système a permis d'éviter ou d'atténuer les conséquences de l'accident dans 21 cas sur 55. En ce qui concerne l'alerte FCW (Forward Collision Warning), le signal sonore a été effectif dans 36 cas sur 55 (voir Tableau n° 5).

Tableau n° 5 : Impact, évitement, mitigation et alerte FCW

n=2 véhicules et 55 essais		Nb d'essais	Proportion (%)
Résultats	Impact	34	62
	Évitement	18	33
	Mitigation	3	5
FCW	Alerte FCW	36	65
	Pas d'alerte FCW	19	35

Nous présentons successivement ci-après les résultats pour chacun des deux cas reconstitués. Nous commençons par l'accident correspondant au scénario type 8 - Tourne à gauche.

3.2 Résultats pour le scénario type 8 - Tourne à gauche

Le Tableau n° 6 présente les valeurs prises par les différentes variables pour les 24 essais. On observe que quels que soient le véhicule, la vitesse d'approche, et l'éloignement du piéton par rapport à l'intersection, le véhicule a heurté le piéton sans réduire sa vitesse dans chacun des 24 essais. Dans ce scénario d'accident, l'AEB ne semble pas être en mesure de détecter suffisamment tôt le piéton et de freiner avant que le véhicule ne croise sa trajectoire. Bien que reposant sur un nombre faible d'essais, ce résultat concorde avec les résultats obtenus par l'American Automobile Association (2019). Dans cette recherche, les auteurs ont confronté 4 véhicules (une Honda Accord, une Chevrolet Malibu, une Tesla Model 3 et une Toyota Camry, toutes de l'année 2019) à un scénario de traversée d'un piéton en sortie de virage (3 mètres après la fin du virage, rayon de courbure d'environ 17 m). Tous les essais (5 essais par véhicule, soit 20 essais) ont été réalisés à la vitesse de 15 mph (soit 24 km/h). Là aussi, le véhicule a heurté le piéton dans chacun des 20 essais. D'après les auteurs, les systèmes automatiques de freinage d'urgence de ces véhicules ne semblent pas conçus pour réagir face à un piéton traversant dans une courbe.

D'après les échanges que nous avons eus avec les techniciens et ingénieurs de TRANSPOLIS, il semblerait que l'AEB soit inhibé sur certains véhicules au-delà d'un certain angle au volant, ce qui pourrait expliquer pourquoi les véhicules heurtent systématiquement le piéton dans ces configurations. C'est pourquoi, nous avons étudié les valeurs de l'angle au volant à différents moments avant l'impact pour chacun des 24 essais (Tableau n° 6). Ces valeurs ont été estimées sur la base des images prises par la caméra qui filmait l'intérieur du véhicule. Cette valeur apparaît, à 0,5 seconde de l'impact, supérieure ou égale à 40 degrés dans 16 essais sur 24.

En ce qui concerne, l'alerte sonore (FCW), celle-ci n'a pas fonctionné dans 19 cas sur 24. On observe que les cinq cas où l'alerte a retenti concernent tous des essais à 13 km/h réalisés avec le véhicule "Compacte".

Tableau n° 6 : Descriptif des variables Accident 1 – Scénario type 8 TàG (n=24 essais)

Heure	N°Essai	Véhicule	Vitesse d'approche (km/h)	Trajectoire piéton/intersession	Vitesse piéton (km/h)	Sensibilité de l'alerte FCW	FCW	AEB	Impact Évitement Mitigation	Angle au volant (°) à t - 0,5 s	Angle au volant (°) à t - 1 s	Angle au volant (°) à t - 1,5 s
08:56	1	<i>Citadine</i>	13	11m	5	normale	not ok	not ok	Impact	0	170	370
09:03	2	<i>Citadine</i>	13	11m	5	normale	not ok	not ok	Impact	90	190	350
09:09	3	<i>Citadine</i>	13	11m	5	normale	not ok	not ok	Impact	40	170	350
09:20	7	<i>Citadine</i>	13	11m	5	élevée	not ok	not ok	Impact	40	180	370
09:29	8	<i>Citadine</i>	13	11m	5	élevée	not ok	not ok	Impact	45	180	380
09:33	9	<i>Citadine</i>	13	11m	5	élevée	not ok	not ok	Impact	45	180	380
09:38	16	<i>Citadine</i>	20	11m	5	normale	not ok	not ok	Impact	170	380	420
09:43	17	<i>Citadine</i>	20	11m	5	normale	not ok	not ok	Impact	170	380	410
09:49	18	<i>Citadine</i>	20	11m	5	normale	not ok	not ok	Impact	170	360	410
10:03	22	<i>Citadine</i>	13	14m	5	normale	not ok	not ok	Impact	30	30	170
10:08	23	<i>Citadine</i>	13	14m	5	normale	not ok	not ok	Impact	20	40	100
10:12	24	<i>Citadine</i>	13	14m	5	normale	not ok	not ok	Impact	20	40	180
10:21	28	<i>Compacte</i>	13	11m	5	normale	not ok	not ok	Impact	90	220	330
10:25	29	<i>Compacte</i>	13	11m	5	normale	not ok	not ok	Impact	90	220	330
10:28	30	<i>Compacte</i>	13	11m	5	normale	not ok	not ok	Impact	80	190	310
10:31	34	<i>Compacte</i>	13	11m	5	élevée	ok	not ok	Impact	90	240	360
10:36	35	<i>Compacte</i>	13	11m	5	élevée	ok	not ok	Impact	70	250	360
10:39	36	<i>Compacte</i>	13	11m	5	élevée	not ok	not ok	Impact	50	240	380
10:44	43	<i>Compacte</i>	20	11m	5	normale	not ok	not ok	Impact	100	280	400
11:05	44	<i>Compacte</i>	20	11m	5	normale	not ok	not ok	Impact	170	300	390
11:09	45	<i>Compacte</i>	20	11m	5	normale	not ok	not ok	Impact	170	370	430
11:15	49	<i>Compacte</i>	13	14m	5	normale	ok	not ok	Impact	0	50	200
11:27	51	<i>Compacte</i>	13	14m	5	normale	ok	not ok	Impact	0	50	160
11:31	50	<i>Compacte</i>	13	14m	5	normale	ok	not ok	Impact	10	30	130

3.3 Résultats pour le scénario type 9 - Ligne droite

Le Tableau n° 9 présente les valeurs prises par les différentes variables pour chacun des 31 essais. On observe que dans 18 essais sur 31 (soit 58 %), le véhicule a freiné automatiquement et n'a pas heurté le piéton. Ce résultat est supérieur à celui observé par l'American Automobile Association (2019) qui, sur la base de 20 essais dans un scénario similaire, mais sans le soleil rasant, a constaté un taux d'évitement de 45 %. Dans une étude plus récente, portant sur un plus grand nombre de scénarios et incluant des véhicules, pour certains, plus récents, Mahdinia, Khattak et Haque (2022) ont observé un taux d'évitement supérieur, de l'ordre de 70 %.

À ces 18 cas d'évitement s'ajoutent trois cas où le véhicule a significativement réduit sa vitesse avant l'impact (réduction de 30 à 67% de la vitesse de consigne).

En ce qui concerne l'incidence de certaines variables sur le taux d'évitement, le type de véhicule semble jouer un rôle, voir Tableau n° 7, puisqu'on observe une différence significative dans le taux d'évitement entre la *Citadine* et la *Compacte* (respectivement 38 % et 80 %, $\chi^2=5,74$, $p=0,017$). Il est possible que cela provienne de la présence d'un radar sur la *Compacte*, en complément de la caméra, contrairement à la *Citadine* qui ne dispose que d'une caméra. Cela est également suggéré par les travaux de Combs et al. (2019) qui ont observé qu'une caméra seule donne lieu à plus de collisions que lorsqu'elle est couplée à d'autres systèmes (radar, lidar).

Tableau n° 7 : Impact, évitement, selon les véhicules (2 véhicules - 31 essais)

	Impact	Évitement
<i>Citadine</i>	10	6
<i>Compacte</i>	3	12

La vitesse de consigne semble également avoir une incidence puisque le taux d'évitement est supérieur à 20 km/h par rapport à 30 km/h (voir Tableau n° 8), même si la différence n'est pas significative au seuil de 0,05 ($\chi^2=3,3$, $p=0,07$). Il n'est en revanche pas apparu de différence entre les essais réalisés à 40 km/h et à 30 km/h ($\chi^2=0,08$, $p=0,78$).

Tableau n° 8 : Impact, évitement, selon la vitesse de consigne (2 véhicules - 25 essais)

	Impact	Évitement
Essais à 20 km/h	0	6
Essais à 30 km/h	10	9

Concernant les autres variables, aucune n'a un impact significatif sur le taux d'évitement. L'incidence du soleil, qui *a priori* était davantage face au véhicule lors des premiers essais, ne semble pas influencer l'efficacité de l'automate, bien que cela mériterait d'être confirmé sur un plus grand nombre d'essais (Test de rang de Mann-Whitney, $p=0,78$).

Contrairement au scénario précédent, le FCW a fonctionné dans tous les cas. Le réglage de la sensibilité de l'alerte ne semble avoir aucune incidence significative, qu'il s'agisse de l'alerte ou du freinage d'urgence ($\chi^2=2,1$, $p=0,36$).

Tableau n° 9 : Descriptif des variables Accident 2 – Scénario type 9 - Ligne droite (n=31 essais)

Heure	N° Essai	Véhicule	Vitesse approche (km/h)	Vitesse moyenne effective (40-60m)	Vitesse piéton (km/h)	Azimut soleil (°)	Élévation soleil(°)	Sensibilité de l'alerte (FCW)	FCW	AEB commentaire	Impact Évitement Mitigation	Réduction de la vitesse au choc (en %)	Distance résiduelle capot - piéton si évitement (en m)
07:51	1	Citadine	30	31,239	4	76°33'54.360"	15°18'46.800"	normale	ok	AEB tardif	impact		nc
08:00	2	Citadine	30	30,259	4	78°05'01.680"	16°50'19.680"	normale	ok	ok	évitement		0
08:05	3	Citadine	30	30,283	4	78°55'42.960"	17°41'25.080"	normale	ok	not ok	impact		nc
08:17	4	Compacte	30	30,413	4	80°57'43.560"	19°44'36.960"	normale	ok	AEB tardif	impact		nc
08:25	5	Compacte	30	30,394	4	82°19'28.560"	21°07'08.760"	normale	ok	ok	évitement		1,8
08:28	6	Compacte	30	30,404	4	82°50'14.640"	21°38'09.960"	normale	ok	ok	évitement		0,1
08:31	7	Compacte	30	30,311	4	83°21'05.040"	22°09'13.320"	basse	ok	ok	évitement		1,8
08:34	8	Compacte	30	30,293	4	83°52'00.120"	22°40'18.480"	basse	ok	freine puis relâche, freinage en deux fois	mitigation	30%	nc
08:41	9	Compacte	30	30,354	4	85°04'27.840"	23°52'57.360"	basse	ok	ok	évitement		1,8
08:44	10	Compacte	30	30,350	4	85°35'40.560"	24°24'07.920"	élevée	ok	ok	évitement		2,9
08:46	11	Compacte	30	30,341	4	85°56'32.280"	24°44'56.040"	élevée	ok	ok	évitement		1,2
08:49	12	Compacte	30	30,325	4	86°27'55.440"	25°16'08.760"	élevée	ok	AEB tardif	impact		nc
09:02	13	Citadine	30	30,129	4	88°45'19.440"	27°31'34.320"	basse	ok	AEB tardif	impact		nc
09:06	14	Citadine	30	30,117	4	89°28'07.320"	28°13'16.680"	basse	tardif	AEB tardif	impact		nc
09:19	15	Citadine	30	30,145	4	91°49'11.640"	30°28'48.720"	basse	tardif	AEB tardif	impact		nc
09:27	16	Citadine	30	30,156	4	93°17'43.440"	31°52'08.760"	élevée	ok	AEB tardif	impact		nc
09:32	17	Citadine	30	30,156	4	94°13'48.720"	32°44'10.320"	élevée	ok	ok	évitement		1,4

Heure	N° Essai	Véhicule	Vitesse approche (km/h)	Vitesse moyenne effective (40-60m)	Vitesse piéton (km/h)	Azimut soleil (°)	Élévation soleil (°)	Sensibilité de l'alerte (FCW)	FCW	AEB commentaire	Impact Évitement Mitigation	Réduction de la vitesse au choc (en %)	Distance résiduelle capot - piéton si évitement (en m)
09:35	18	Citadine	30	30,221	4	94°47'45.960"	33°15'21.240"	élevée	ok	freine puis relâche, freinage en deux fois	mitigation	63%	nc
09:39	18bis	Citadine	30	30,126	4	95°33'24.480"	33°56'53.880"	élevée	ok	ok	évitement		0,8
09:52	31	Citadine	20	20,278	4	98°04'55.920"	36°11'29.040"	normale	ok	ok	évitement		1,4
09:54	32	Citadine	20	20,041	4	98°28'42.960"	36°32'07.080"	normale	ok	ok, freinage en deux fois	évitement		1,7
09:56	33	Citadine	20	20,707	4	98°52'37.920"	36°52'44.040"	normale	ok	ok, freinage en deux fois	évitement		1,3
10:00	34	Citadine	40	40,357	4	99°40'53.040"	37°33'54.000"	normale	ok	freine puis relâche trop tôt	mitigation	67%	nc
10:17	35	Citadine	40	40,300	4	103°12'47.520"	40°27'37.080"	normale	tardif	AEB tardif	impact		nc
10:21	36	Citadine	40	40,256	4	104°04'25.680"	41°08'08.880"	normale	tardif	not ok	impact		nc
10:32	37	Compacte	20	19,879	4	106°30'23.040"	42°58'46.920"	normale	ok	ok	évitement		2,3
10:35	38	Compacte	20	19,190	4	107°11'16.080"	43°28'42.960"	normale	ok	ok	évitement		2,3
10:41	39	Compacte	20	20,538	4	108°34'31.440"	44°28'15.240"	normale	ok	ok	évitement		1,3
10:44	40	Compacte	40	39,457	4	109°16'56.280"	44°57'50.760"	normale	ok	ok	évitement		0,8
10:46	41	Compacte	40	39,569	4	109°45'30.600"	45°17'30.120"	normale	ok	ok	évitement		1,1
10:49	42	Compacte	40	39,528	4	110°28'50.160"	45°46'52.320"	normale	ok	ok	évitement		0

Conclusion

L'objectif de ce travail était de confronter expérimentalement sur piste deux véhicules équipés d'un système autonome d'aide à l'évitement de collision avec des piétons, à des situations d'accidents réels et d'examiner leur comportement dans ces situations. Il s'agit d'une démarche, parmi d'autres, pour étudier l'efficacité de ces systèmes. L'originalité de cette recherche réside dans le fait que les deux situations d'accidents auxquelles les véhicules ont été confrontés, correspondent à des cas d'accidents réels ayant fait l'objet d'une étude détaillée par les équipes d'enquêteurs du Laboratoire Mécanismes d'Accidents. Ces cas d'accidents ont d'autre part été sélectionnés parce qu'ils correspondent à des scénarios types d'accidents représentant un enjeu important en matière d'accidentalité des piétons (de l'ordre de 25 % des accidents de piétons recensés d'après Clabaux & Brenac (2022)).

Le premier cas d'accident correspondait à un véhicule tournant dans une intersection, et heurtant en sortie de carrefour un piéton non détecté par le conducteur. Le second impliquait un véhicule circulant en ligne droite et percutant un piéton non détecté. Au-delà de représenter un enjeu fort en matière d'accidentalité, ces deux cas d'accident présentaient également l'intérêt de pouvoir confronter les systèmes d'aide à des situations *a priori* difficiles pour l'automate, comme elles le sont d'ailleurs pour les conducteurs. Dans le premier cas, le véhicule effectue une manœuvre de tourne à gauche, tandis que dans le second, il circule face à un soleil rasant.

Deux véhicules, une "citadine" et une "compacte", ont été utilisés pour ces essais, sur les pistes de TRANSPOLIS. 55 essais ont été réalisés, 24 pour le scénario de tourne à gauche et 31 pour le scénario ligne droite. Au-delà du nombre d'évitements ou d'impacts sur le piéton, nous avons également cherché à explorer l'influence de certaines variables sur le taux d'évitement, comme par exemple la vitesse d'approche, le type de véhicule, l'éloignement du piéton par rapport à l'intersection (pour le scénario en tourne à gauche uniquement), et la position du soleil (pour le scénario en ligne droite).

Avant de revenir sur les principaux résultats obtenus, rappelons ici que cette étude est avant tout exploratoire. Elle comporte en outre de nombreuses limites. Elle s'appuie tout d'abord sur un nombre faible d'essais pour chaque configuration. Les essais ont d'autre part été réalisés avec un pilote essayeur et non un robot de conduite asservi, ce qui a affecté la répétabilité des essais. Enfin, la rapidité des évolutions technologiques dans le domaine des aides à la conduite limite la portée de ces résultats. À ce titre, les travaux conduits par Mahdinia, Khatkhat et Haque (2022) sur plus de 3000 essais suggèrent une forte amélioration des systèmes anticollision avec des piétons au fil du temps. Par exemple, pour les essais réalisés à 40 km/h, les auteurs observent un taux d'évitement de 50 % pour les modèles de l'année 2018 et de 86 % pour les modèles de l'année 2021. Les résultats plus anciens du Highway Loss Data Institute américain (2017) portant sur les modèles de la marque du constructeur automobile Subaru vont dans le même sens.

Néanmoins, les essais réalisés ont tout d'abord permis d'observer qu'en situation de tourne à gauche, aucun des deux véhicules n'a évité l'impact avec le piéton. Ce résultat est concordant avec les résultats obtenus par l'American Automobile Association (2019) sur la base de 20 essais dans un scénario similaire de traversée d'un piéton en sortie de virage (virage de 17 m de rayon environ). Au cours des 20 essais, les quatre véhicules testés ont tous heurtés le piéton. Les systèmes automatiques de freinage d'urgence des véhicules que nous avons testés, tout comme ceux testés par l'American Automobile Association (2019), ne semblent pas conçus pour réagir face à un piéton traversant dans une courbe. Il semblerait que l'AEB soit inhibé sur certains véhicules au-delà d'un certain angle de braquage du volant, ce qui pourrait expliquer pourquoi les véhicules heurtent systématiquement le piéton dans ce scénario. Cicchino (2022) observe par ailleurs que les véhicules équipés de l'AEB ne sont pas moins impliqués dans les accidents de piétons lors d'une manœuvre tournante, que les véhicules non équipés. Cette situation va toutefois probablement évoluer, puisque par exemple l'organisme Euro NCAP inclut depuis 2020 dans son protocole de test pour la protection des usagers vulnérables, un scénario de traversée d'un piéton en virage (Euro NCAP, 2020, p. 22). Certains véhicules récents sont d'ailleurs déjà équipés d'un AEB qui fonctionne également en courbe.

Concernant le scénario de traversée d'un piéton en ligne droite, les essais réalisés correspondaient, comme dans le scénario précédent, à une situation *a priori* difficile pour le système puisque le véhicule circulait cette fois face à un soleil rasant. Les manuels d'utilisation des deux véhicules testés stipulent à

ce sujet que les performances de l'AEB peuvent être réduites par conditions de luminosité éblouissante. En dépit de ces difficultés, les deux véhicules ont évité le piéton dans plus de la moitié des cas (18 essais sur 31), auxquels s'ajoutent trois cas dans lesquels la vitesse a été significativement réduite avant l'impact : réduction comprise entre 30 et 67 % de la vitesse initiale. Il est apparu que la "Compacte" évitait significativement plus souvent le piéton par rapport à la "Citadine" (86 % contre 43 %). Cela pourrait s'expliquer par la présence d'un radar en plus de la caméra sur la *Compacte*, alors que la *Citadine* ne dispose que d'une caméra. C'est aussi ce que suggèrent les travaux de Combs et al. (2019) qui observent qu'une caméra seule est moins efficace que lorsqu'elle est couplée à d'autres systèmes (radar, lidar). Concernant les autres variables étudiées, la vitesse d'approche semble également avoir une incidence, même si cela mériterait d'être confirmé sur un plus grand nombre d'essais. Les essais à 20 km/h semblent en effet donner lieu à plus d'évitements que les essais à 30 km/h. C'est aussi ce que suggèrent Mahdinia, Khattak et Haque (2022) en s'appuyant sur plus de 3000 essais. En revanche, la position du soleil et le réglage de la sensibilité de l'alerte (FCW) ne semblent pas avoir eu d'impact sur l'efficacité de l'AEB.

D'un point de vue plus méthodologique, ces travaux ont aussi montré toute la difficulté de reproduire sur piste des accidents réels de façon à ce que les reconstitutions soient fidèles et reproductibles d'un point de vue écologique. Une alternative pourrait être de réaliser des essais similaires sur les lieux mêmes des accidents, pour mieux étudier l'influence de certains facteurs environnementaux sur l'efficacité des systèmes. La diffusion progressive de l'AEB dans le parc automobile permet désormais d'envisager une évaluation ex post de cette aide sur le risque final d'accident.

Références

- ACEA (2016). Articulated Pedestrian Target Specifications, document disponible sur le site : <https://www.acea.auto/publication/articulated-pedestrian-target-acea-specifications/> Accés le 18 mai 2022.
- American Automobile Association (2019). Automatic emergency braking with pedestrian detection. American Automobile Association Inc, 48 p.
- Brenac, T., Nachtergaële C, Reigner H., (2003). Scénarios types d'accidents impliquant des piétons et éléments pour leur prévention. Rapport INRETS n° 256. Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, 207 p.
- Chauvel, C., Page, Y., Fildes, B., Lahaussé, J., (2013). Automatic Emergency Braking for Pedestrians: Effective Target Population and Expected Safety Benefits. 23rd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Seoul, Korea, South, 27-30th May 2013, 9 p.
- Cicchino, J.B., (2022). Effects of automatic emergency braking systems on pedestrian crash risk. *Accident Analysis and Prevention*, vol. 172, pp. 1-9.
- Clabaux, N., Brenac, T., (2022), Livrable 2.5 "Réévaluation des enjeux correspondant aux scénarios types d'accidents urbains (avec et sans implication de piétons)", Projet SURCA, financé par la FSR, 47 pages.
- Combs, T.S., Sandt, L.S., Clamann, M.P., McDonald, N.C., (2019). Automated vehicles and pedestrian safety: exploring the promise and limits of pedestrian detection. *American Journal of Preventive Medicine*, vol. 56(1), pp. 1-7.
- Euro NCAP (2020). European new car test assessment programme. Test protocol-AEB VRU systems. Test protocol, version 3.0.3, June 2020, 47 p.
- Hamdane, H., Serre, T., Masson, C., Anderson, R., (2015). Issues and challenges for pedestrian active safety systems based on real world accidents. *Accident Analysis and Prevention*, vol. 82, pp. 53-60.
- Happer, A., Peck, M., and Hughes, M., (2009). "Analysis of Left-Turning Vehicles at a 4-way Medium-Sized Signalized Intersection," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 2(1): pp. 359-370, 2009.
- Highway Loss Data Institute (HLDI), (2017). Effects of eyesight on pedestrian-related bodily injury liability claim frequencies. *HLDI Bulletin*, vol. 34, N° 39, December 2017, 7 p.
- Highway Loss Data Institute (HLDI), (2019). Crash avoidance system pedestrian tests. *Accident Reconstruction Journal*, vol. March-April 2019, pp. 10-11.
- Mahdinia, I., Khattak, A.J., Haque, A.M., (2022). How effective are pedestrian crash prevention systems in improving pedestrian safety? Harnessing large-scale experimental data. *Accident Analysis and Prevention*, vol. 171, 10 p.
- Rosén, E., Källhammer, J.E., Erikson, D., Nentwich, M., Fredriksson, R., Smith, K., (2010). Pedestrian injury mitigation by autonomous braking. *Accident Analysis and Prevention*, vol. 42(6), pp. 1949-1957.
- Van Elslande, P., (2003). Erreurs de conduite et besoins d'aide : une approche accidentologique en ergonomie. *Le Travail humain*, vol. 66(3), pp. 197-224.