

L6.3.1 Evaluation des gains accidentologiques attendus chez les piétons et les cyclistes avec les véhicules autonomes

Focus sur le freinage autonome d'urgence



Work Package	6
Responsable du WP, affiliation	<i>Chauvel C., LAB</i>
Livrable n°	<i>L6.3.1</i>
Version	<i>V2</i>
Auteurs responsables du livrable	<i>Chapitres 1 et 2 : Chajmowicz Henri Chapitre 3 : Perrin Christophe, Clabaux Nicolas, Fournier Jean-Yves, Canu Adrien</i>
Auteurs, affiliations	<i>Chapitres 1 et 2 : LAB Chapitre 3 : Université Gustave Eiffel</i>
Selecteurs, affiliations	
Statut du livrable	<i>Draft</i>

Veuillez citer ce document de cette façon :

Projet SURCA L6.3.1 : « Evaluation des gains accidentologiques attendus chez les piétons et les cyclistes avec les véhicules autonomes » (2022) ; Chapitres 1 et 2 : Chajmowicz, H. (LAB) ; Chapitre 3 : Perrin, C. ; Clabaux, N. ; Fournier, J.Y. ; Canu, A. (Université Gustave Eiffel).

Historique des versions

Version	Date	Auteurs	Type des changements
V0	Janvier 2022	Chajmowicz, H.	Première version des chapitres 1 et 2 envoyée en relecture interne
V1	Mai 2022	Perrin, C. Clabaux, N.	Ajout du chapitre 3, finalisation du document
V2	Juillet 2022	Chajmowicz, H.	Prise en compte des remarques des relecteurs, finalisation du document

Remerciements

Le Projet SURCA est financé par la dévolution de la Fondation Sécurité Routière, la Délégation à la sécurité routière et pour moitié par les partenaires du projet.

Projet SURCA

Les questions posées par la cohabitation de véhicules de plus en plus automatisés avec des véhicules conventionnels et des usagers vulnérables, cyclistes, piétons, deux-roues motorisés, sont au cœur des préoccupations des décideurs publics, constructeurs, ou spécialistes de l'infrastructure routière et de la sécurité routière. Tous ont l'espérance que ces nouvelles technologies contribuent à améliorer la sécurité routière. L'objectif global du projet « Sécurité des Usagers de la Route et Conduite Automatisées, SURCA » est de contribuer à une meilleure intégration de la Conduite Automatisée dans la circulation actuelle.

Les partenaires du projet (Université GUSTAVE EIFFEL, DSR, CEESAR, CEREMA, VEDECOM, LAB), ont ainsi comme objectif d'identifier quelles interactions existent et quelles stratégies pertinentes sont mises en place par les conducteurs pour proposer des recommandations aux concepteurs de véhicules autonomes sur les besoins en termes d'interactions et en termes de comportement du véhicule autonome. Pour cela, il est prévu d'analyser des bases de données existantes sur la conduite des véhicules conventionnels et d'identifier les facteurs qui peuvent expliquer des comportements différents.

Les connaissances issues de ces bases seront utilisables pour simuler l'introduction de la conduite automatisée de niveaux 3, 4 et 5, avec des taux de pénétration faibles. La gestion des interactions avec les autres usagers doit être réalisée dès que le véhicule peut évoluer en autonomie sans supervision du conducteur, quelles que soient la durée et les sections sur lesquelles cette automatisation sera possible. En cas de taux de pénétration très important, d'autres types d'interactions risquent de se mettre en place et devront alors être étudiés.

Ce projet est articulé autour de deux sous-thématiques :

- L'identification des scénarios d'interaction entre véhicules autonomes et autres usagers de la route (véhicules conventionnels, deux roues motorisés, cyclistes, piétons), avec un focus particulier sur les personnes âgées :
 - o Étude des situations de négociation où les conducteurs gèrent cette interaction humaine, à partir de bases de données de conduite conventionnelle, et en utilisant des éléments difficilement émis et perçus par les systèmes automatisés (regard, connaissance a priori d'intention, etc.),
 - o Étude de la réaction des autres usagers face à un véhicule autonome alors que son conducteur est absorbé dans une tâche annexe,
 - o Identification des besoins de communication du véhicule autonome en phase active avec les autres usagers,
 - o Analyse des besoins des usagers âgés et acceptabilité sociétale du véhicule autonome.
- L'étude des impacts de la posture des occupants (conducteur et passagers) d'un véhicule en mode autonome sur le risque lésionnel :
 - o Choix des scénarios de simulation : positions des occupants, conditions de choc (lors de la réalisation de tâches annexes) et systèmes de retenue,
 - o Évaluation des lésions potentielles par simulations numériques en fonction des systèmes de retenue (par ex. déploiement d'air bag),
 - o Recommandations en termes de postures acceptables selon les différents systèmes de retenue.

Contenu du présent livrable

En termes d'enjeu accidentologique de l'interaction véhicule particulier / piéton ou véhicule particulier / cycliste, on observe une prépondérance des enjeux liés aux Systèmes de Freinage Autonome d'Urgence avec détection des piétons et cyclistes (AEB Piéton, AEB Cycliste). Cet enjeu (Tableau 1 et Tableau 2) est constitué par les collisions où le choc du Véhicule Particulier (VP) avec l'usager vulnérable est frontal pour le VP, indépendamment de sa manœuvre préalable à la collision.

	2011 - VOIESUR	2011 - VOIESUR - %	Enjeu VA Niveau 5
Side-swipe / Autres chocs	43	14,3%	?
Perte Contrôle VT	9	3,0%	Oui
Piétons sur trottoir	8	2,7%	Oui
Piétons allongés/franchis	24	8,0%	?
Suicide	6	2,0%	?
Choc secondaire	3	1,0%	Non
Enjeu AEB	197	65,7%	Oui
Enjeu AEB MAR	10	3,3%	Oui

Tableau 1: Tués Piéton dans un choc avec un VP, par typologie (VOIESUR)

	2011 - VOIESUR	2011 - VOIESUR - %	Enjeu VA Niveau 5
Side-swipe / Latéral	11	15,1%	?
Perte Contrôle VT	6	8,2%	Oui
Enjeu AEB	56	76,7%	Oui

Tableau 2: Tués Cyclistes dans un choc avec un VP, par typologie (VOIESUR)

L'importance de l'enjeu AEB justifie le que le focus de ce document – a priori consacré aux gains associés au véhicule autonome de niveau SAE 5 – soit en réalité constitué par les Systèmes de Freinage Autonome d'Urgence. Cela n'est pas contradictoire avec le fait que d'autres systèmes, dont le véhicule autonome de niveau SAE 5 pourrait être porteur, pourraient contribuer à l'amélioration de la situation sur le terrain de l'enjeu AEB. A titre d'exemple, les systèmes contribuant à la réduction de la vitesse des véhicules (par adaptation à la scène de conduite ou par simple respect des vitesses maximales en vigueur) pourraient apporter une contribution forte. Si on examine la répartition des vitesses initiales des véhicules particuliers impliqués dans des collisions mortelles piétons en agglomération et faisant partie de l'enjeu AEB (deux-tiers de l'enjeu AEB mortel piéton), on obtient le graphe de la Figure 1 :

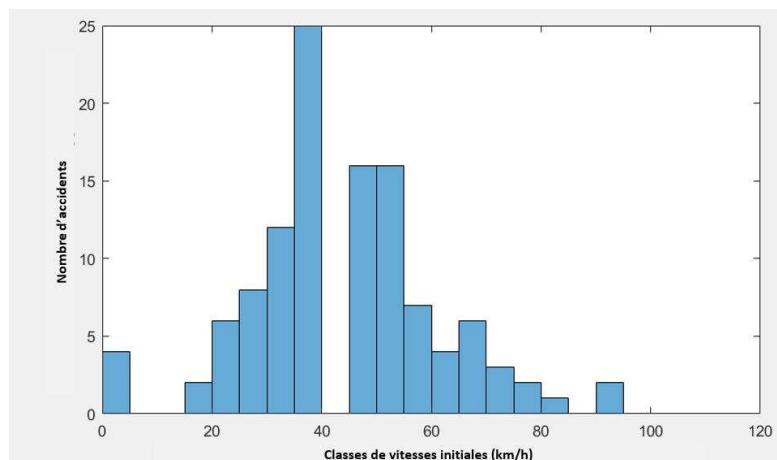


Figure 1: Vitesses initiales véhicule lors des accidents mortels piétons de l'enjeu AEB, en agglomération

On constate alors que :

- 36% de ces accidents correspondent à une vitesse initiale véhicule supérieure à la vitesse maximale autorisée en agglomération en 2011.
- 18% de ces accidents ont lieu avec une vitesse initiale véhicule inférieure à 30 km/h.
- 64% de ces accidents ont lieu avec une vitesse initiale véhicule inférieure à 50 km/h.

Un système de régulation de la vitesse véhicule rendant celle-ci inférieure à la limite légale (même si celle-ci est ramenée à 30 km/h) ne suffirait pas à éliminer les accidents mortels piétons mais contribuerait certainement à une amélioration de la sécurité routière en coopération avec un AEB Piéton. L'évaluation de l'efficacité de ce système couplé requiert cependant l'utilisation d'un modèle numérique de comportement conducteur en présence d'un piéton (pour évaluer si les accidents ont toujours lieu lorsqu'on réduit la vitesse véhicule et elle seule), dont la mise sur pied dépassait le cadre de ressource alloué au présent projet.

Les chapitres 1 et 2 du présent document sont consacrées à l'évaluation par simulation numérique de l'efficacité des AEB Piéton et Cycliste. Ces systèmes équipent en effet une part croissante des véhicules neufs, mais sont encore rares sur le marché automobile, au moins en France, de sorte que leur impact sur la sécurité routière doit encore être évalué en grande partie par des études prospectives. Des courbes de risque de blessure, construites à partir de données représentatives d'accidents survenus en France, ont été utilisées en combinaison avec des distributions de vitesse d'impact re-simulées à l'aide d'un modèle cinématique de véhicule auquel des capteurs AEB avec des stratégies de détection et d'action d'actionneur réalisables ont été ajoutées. Ceci permet à la fois d'évaluer l'efficacité de l'AEB en termes de vies sauvées et de blessures atténuées et d'effectuer une analyse de sensibilité sur cette efficacité. Les résultats révèlent des valeurs d'efficacité encourageantes à tous les niveaux de blessure, en fonction des paramètres de champ de vision seul, une fois les valeurs de référence de l'algorithme de décision et les paramètres de conception de freinage fixés. Notons enfin que certains cas (ex. collisions fronto-frontales entre VP et cycliste, collisions piétons lors desquelles le VP tourne) ont été intégrés à l'enjeu AEB alors même que la définition technique des AEB actuels ne permet pas leur prise en compte – un état des lieux qui devrait s'améliorer dans un futur proche. Les chapitres 1 et 2 sont donc consacrés à l'évaluation d'un potentiel maximal, sous des hypothèses de simulation simplifiées.

Les deux premiers chapitres de ce document contiennent également une analyse des Etudes Détaillées d'Accident (EDA) réalisées au LAB et portant sur les configurations accidentielles d'intérêt identifiées pour le WP6 de SURCA. Initialement prévue sur les accidents avec piétons et cyclistes, cette analyse n'a pu être réalisée que sur les configurations avec piétons, en raison du trop faible nombre d'EDA cyclistes pertinentes pour SURCA dans nos relevés. Des exemples illustratifs ont également été inclus, à la fois pour les EDA impliquant des piétons et celles impliquant des cyclistes.

Le chapitre 3 de ce document rend compte d'un travail exploratoire 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 à ces situations de piétons traversant et d'examiner l'influence de certains paramètres sur le taux d'évitement.

Table des matières

1 INTERACTIONS VÉHICULE AUTONOME-PIÉTONS.....	11
1.1 ÉTUDES DÉTAILLÉES D'ACCIDENT	11
1.1.1 Caractéristiques	11
1.1.2 Exemples-type	16
1.2 SIMULATION DE L'EFFICACITÉ DU FREINAGE AUTOMATISÉ (AEB)	21
1.2.1 Introduction.....	21
1.2.2 Méthode	22
1.2.3 Résultats	28
1.2.4 Discussion	32
1.2.5 Conclusions.....	33
1.2.6 Références	34
2 INTERACTIONS VÉHICULE AUTONOME-CYCLISTES	36
2.1 ÉTUDES DÉTAILLÉES D'ACCIDENT	36
2.2 SIMULATION DE L'EFFICACITÉ DU FREINAGE AUTOMATISÉ (AEB)	36
2.2.1 Introduction.....	36
2.2.2 Méthode	37
2.2.3 Résultats	45
2.2.4 Discussion	48
2.2.5 Conclusions.....	50
2.2.6 Références	51
2.3 ANNEXES	53
2.3.1 Analyse de sensibilité : Influence des paramètres (facteurs).....	53
2.3.2 Choix de la variable indépendante pour les courbes de risque cycliste	55
3 RECONSTITUTION SUR PISTE DE DEUX CAS D'ACCIDENTS AVEC DES VÉHICULES EQUIPÉS D'UN SYSTÈME AUTONOME D'AIDE A L'EVITEMENT DE COLLISION AVEC DES PIETONS (AEB).....	56
3.1 INTRODUCTION	56
3.2 MÉTHODE.....	57
3.2.1 Scénarios types d'accidents de piétons et sélection des cas d'accidents à reconstituer	57
3.2.2 Protocole expérimental	63
3.3 RÉSULTATS	77
3.3.1 Résultats généraux	77
3.3.2 Résultats pour le scénario 8 Tourne à gauche.....	78
3.3.3 Résultats pour le scénario 9 Ligne droite	80
3.4 CONCLUSION	83
3.5 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	85

Table des tableaux

Tableau 1: Tués Piéton dans un choc avec un VP, par typologie (VOIESUR)	5
Tableau 2: Tués Cyclistes dans un choc avec un VP, par typologie (VOIESUR)	5
Tableau 3: Répartition des victimes piétons par âge et lieu de la collision	14
Tableau 3: Valeurs de paramètres pour les systèmes évalués	25
Tableau 4: Configuration Mono-Capteur	26
Tableau 5: Configuration deux capteurs coaxiaux	26
Tableau 6: Configuration deux capteurs frontaux	27
Tableau 7: Résultats en configuration deux capteurs coaxiaux	28
Tableau 8: Résultats en configuration deux capteurs frontaux	29
Tableau 9: Résultats en configuration mono-capteur	30
Tableau 10: Efficacité des systèmes évalués.....	32
Tableau 11: Paramètres utilisés	42
Tableau 12: Plan d'expériences en configuration deux capteurs	44
Tableau 13: Efficacité des différents systèmes suivant les catégories de blessure	47
Tableau 14: Contribution des différents paramètres bi-capteur à la variance, pour les 4 métriques d'efficacité	48
Tableau 15: Contribution des différents paramètres mono-capteur à la variance, pour les 4 métriques d'efficacité	48
Tableau 16: Nombre de victimes réel et recalculé à l'aide des courbes de risque (CDR).....	55
Tableau 17 : Récapitulatif des enjeux correspondants aux différents scénarios types d'accidents de piétons.....	59
Tableau 18 : Cinématiques utilisées pour les reconstitutions - Scénario 8 Tourne à Gauche	68
Tableau 19 : Cinématiques utilisées pour les reconstitutions.....	71
Tableau 20 : Éphémérides de position des corps du Système solaire	75
Tableau 21 : Comparaison des conditions de luminosité, position du soleil	76
Tableau 22 : Impact, évitemen, mitigation et alerte FCW	77
Tableau 23 : Descriptif des variables Accident 1 – Scénario type 8 TàG (n=24 essais)	79
Tableau 24 : Impact, évitemen, selon les véhicules (2 véhicules - 31 essais)	80
Tableau 25 : Impact, évitemen, selon la vitesse de consigne (2 véhicules - 25 essais)	80
Tableau 26 : Descriptif des variables Accident 2 – Scénario type 9 Ligne droite (n=31 essais)	81

Table des figures

Figure 1: Vitesses initiales véhicule lors des accidents mortels piétons de l'enjeu AEB, en agglomération	5
Figure 2: Répartition des EDA Piétons par pictogramme.....	11
Figure 3: Configurations d'intérêt dans SURCA.....	12
Figure 4: Répartition des tués piétons (en EDA) par pictogramme	12
Figure 5: Répartition des blessés graves piétons (en EDA) par pictogramme	13
Figure 6: Répartition des blessés légers piétons (en EDA) par pictogramme	13
Figure 7: Répartition des vitesses de collision	14
Figure 8: Répartition des types de réaction des conducteurs.....	15
Figure 9: Facteurs principaux dans les collisions.....	15
Figure 10: Plan de situation.....	16
Figure 11: Vue des lieux (point de vue conductrice) de jour et de nuit.....	17
Figure 12: Plan de situation.....	18
Figure 13: Plan de situation.....	19
Figure 14: Plan de situation.....	20
Figure 15 : Profil de freinage (principe).....	25
Figure 16 : Position des piétons à (a) TTC = 0.5 sec et (b) TTC = 1.5 sec	28
Figure 17 : Position des piétons par rapport au véhicule à TTC = 1 sec et champs de vision pour les configurations (a) angle étroit, (b) de référence, (c) bi- capteurs et (d) haut de gamme.....	30
Figure 18: Distributions pondérées de vitesses d'impact d'origine (e) et simulées pour respectivement les configurations (a) angle étroit, (b) de référence, (c) bi- capteurs et (d) haut de gamme	31
Figure 19: Distribution des victimes piétons résiduelles.....	31
Figure 20 : Mortalité Piéton par type d'adverse en France (2011 [21], 2019 [22])	34
Figure 21: Processus de sélection des cas pertinents	38
Figure 22: Courbes de risque cycliste.....	45
Figure 23: Champ de vision de référence et positions relatives à TTC=1s.....	46
Figure 24: Distribution (pondérée) des vitesses d'impact d'origine	46
Figure 25: Distribution (pondérée) des vitesses d'impact avec AEB « angle étroit »	46
Figure 26: Distribution (pondérée) des vitesses d'impact avec AEB « référence »	47
Figure 27: Distribution (pondérée) des vitesses d'impact avec AEB « haut de gamme ».....	47
Figure 28 : Mortalité Cycliste par type d'adverse en France (2011, 2019)	50
Figure 29: Influence des facteurs sur la métrique globale	53
Figure 30: Influence des facteurs sur le nombre de tués évités (AF).....	53

Figure 31: Influence des facteurs sur le nombre de blessés hospitalisés évités (ASI)	54
Figure 32: Influence des facteurs sur le nombre de blessés légers évités (ASLI)	54
Figure 33: Directions des cyclistes avant impact (relativement au véhicule)	55
Figure 34 : Description des scénarios type 8 et 9.....	60
Figure 35 : Schéma de l'accident (Toyota Starlet contre piéton).....	61
Figure 36 : Schéma de l'accident (Citroën C3 contre piéton).	62
Figure 37 : Choix des deux sites pour les reconstitutions d'accident	63
Figure 38 : Reconstruction cinématique du cas EDA retenu pour le scénario 8 - Tourne à gauche	65
Figure 39 : Légère déformation du véhicule accidenté (accident Scénario 8 - Tourne à gauche)	66
Figure 40 : Reconstitution de l'accident EDA Scénario 8 Tourne à gauche - Site de TRANSPOLIS.....	66
Figure 41 : Comparaison des sites Accident / Reconstitution, Scénario 8 - Tourne à gauche	67
Figure 42 : Reconstruction cinématique du cas EDA retenu pour le scénario 9 - Ligne droite.....	70
Figure 43 : Déformations du véhicule accidenté (accident EDA Scénario 9 Ligne droite)	71
Figure 44 : Plan du site de reconstitution de l'accident EDA - Scénario 9 Ligne droite	72
Figure 45 : Comparaison des sites Accident / Reconstitution, Scénario 9 - Ligne droite.....	73
Figure 46 : Angle entre la trajectoire du VL et l'azimut du soleil - Accident EDA Scénario 9 Ligne droite	74
Figure 47 : Angle entre la trajectoire du VL et l'azimut du soleil - Site Transpolis - Scénario 9 Ligne droite	75
Figure 48 : Condition d'éblouissement, comparaison accident EDA / reconstitution	76

1 INTERACTIONS VÉHICULE AUTONOME-PIÉTONS

1.1 Études détaillées d'accident

1.1.1 Caractéristiques

Les études détaillées d'accidents (EDA) recueillies au LAB concernent des accidents corporels impliquant au moins un véhicule particulier. La sélection faite ici concerne le sous-ensemble impliquant un seul véhicule particulier et un piéton. **Ce corpus, nommé « EDA Piétons LAB » dans la suite de ce document, n'a pas de prétention à la représentativité : les statistiques qui suivent ne sont données qu'à titre indicatif.**

La figure 2 fait apparaître la répartition des EDA Piétons LAB par configurations accidentelles. Pour rappel, les configurations d'intérêt sélectionnées dans SURCA sont données par la figure 3. Elles représentent 90 % des EDA Piétons LAB.

Les traversées des piétons en section courante constituent le sous-échantillon le plus important (36% des cas) suivi par les traversées de piéton en intersection (26% des cas) et les traversées avec masque à la visibilité (24%).

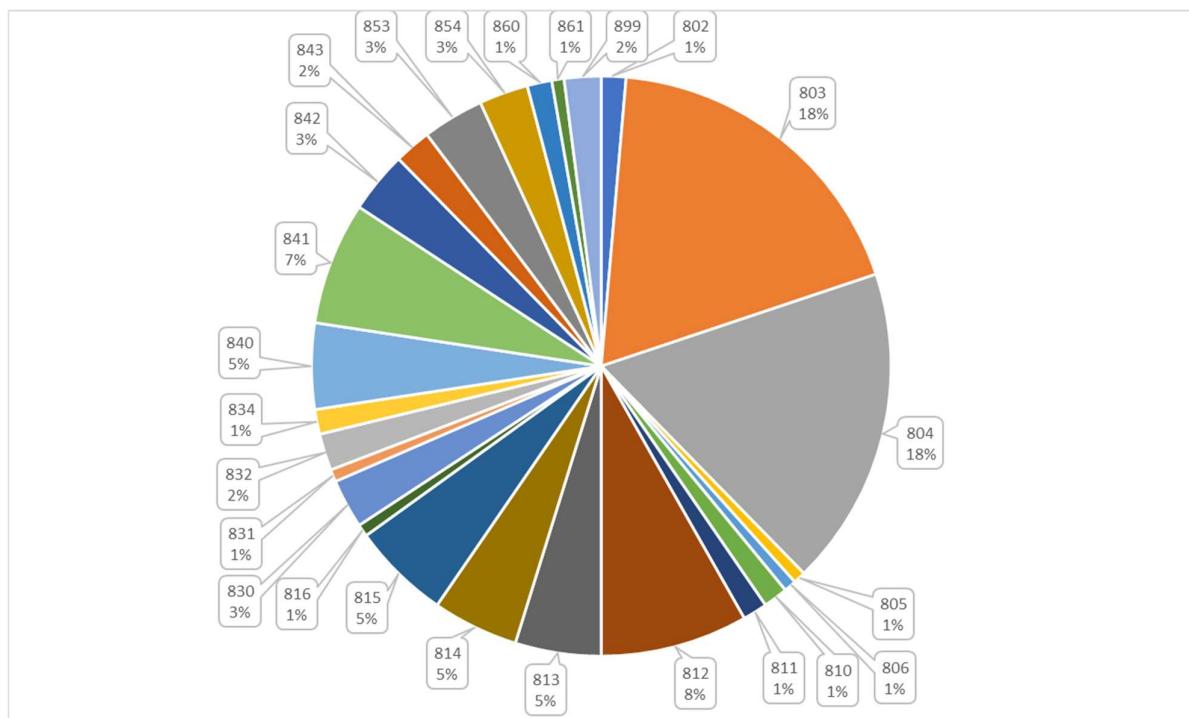


Figure 2: Répartition des EDA Piétons par pictogramme

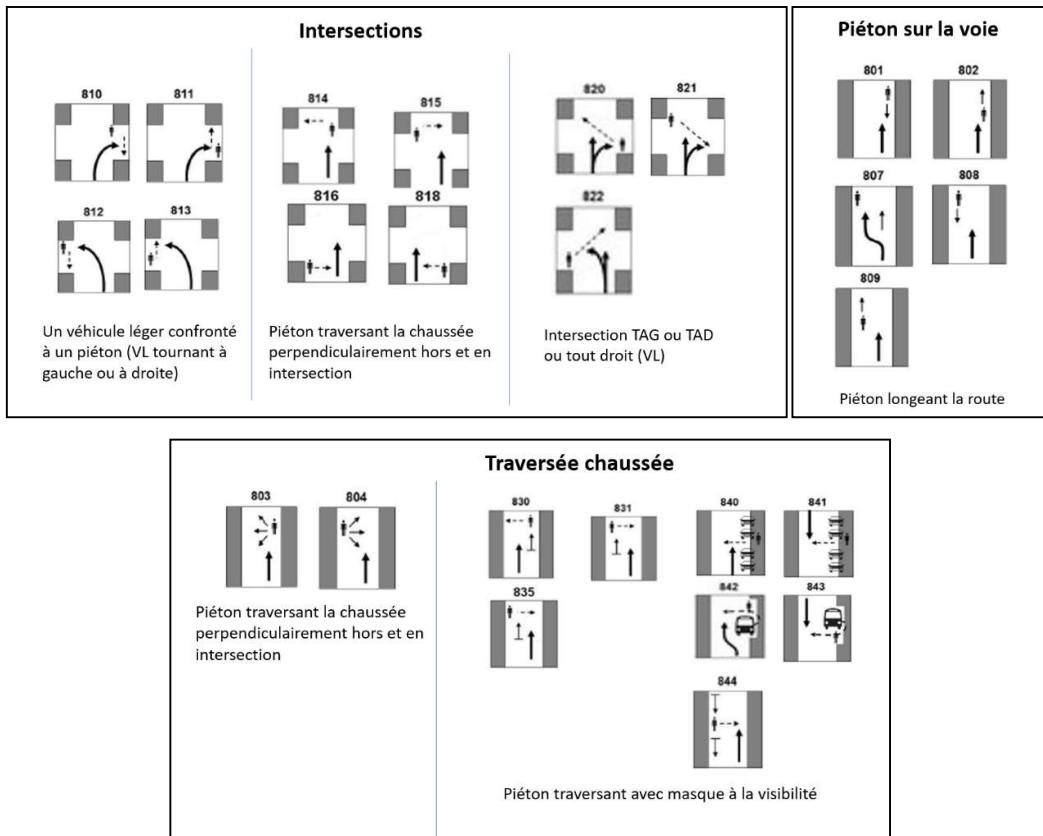


Figure 3: Configurations d'intérêt dans SURCA

Les figures Figure 4, 5 et 6 donnent la répartition des blessures des piétons dans l'échantillon. Les configurations d'intérêt dans SURCA y apparaissent comme les plus sévères : elles rassemblent 78 % des tués de l'échantillon, 88 % des blessés graves (au sens de l'échelle AIS) et 89 % des blessés légers.

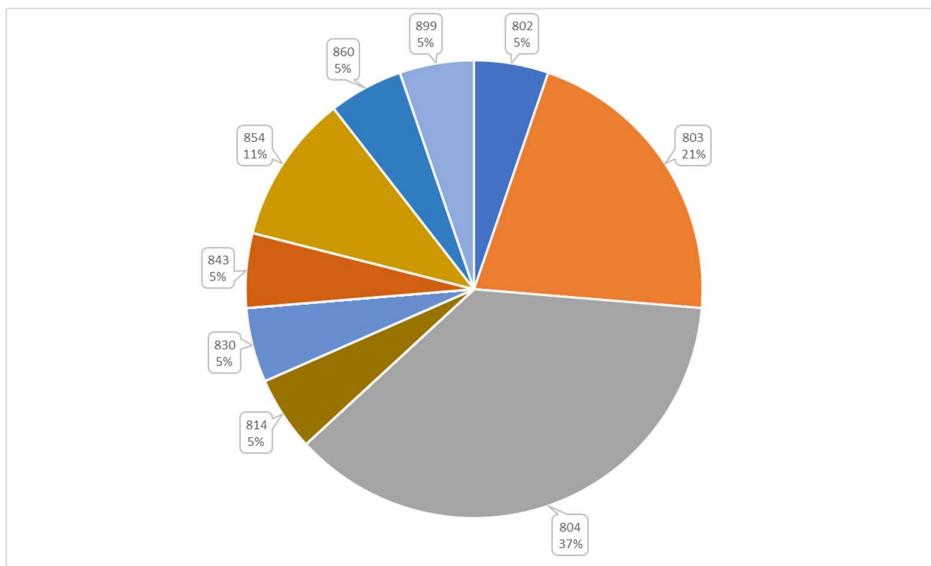


Figure 4: Répartition des tués piétons (en EDA) par pictogramme

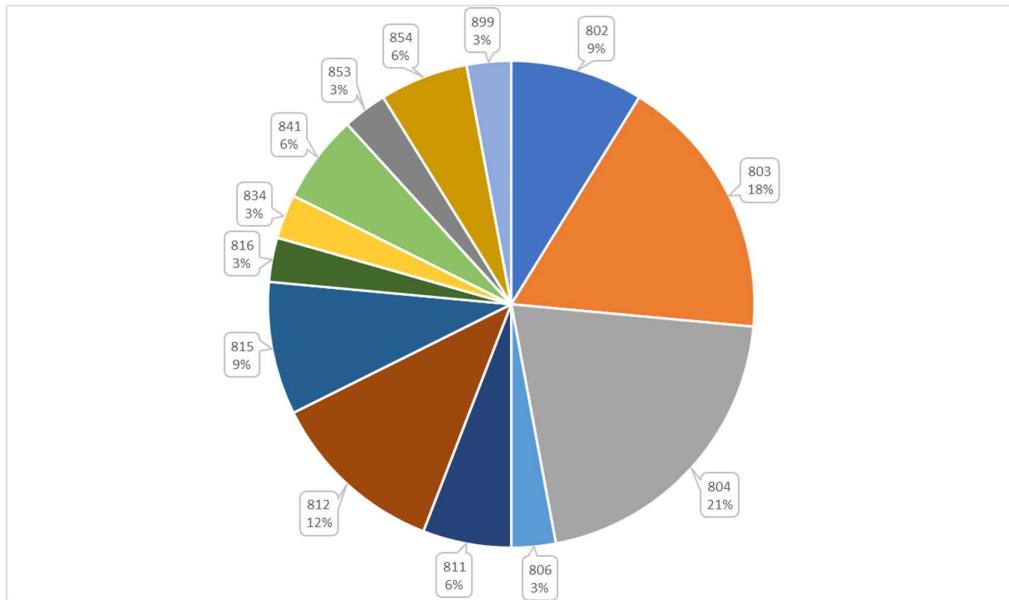


Figure 5: Répartition des blessés graves piétons (en EDA) par pictogramme

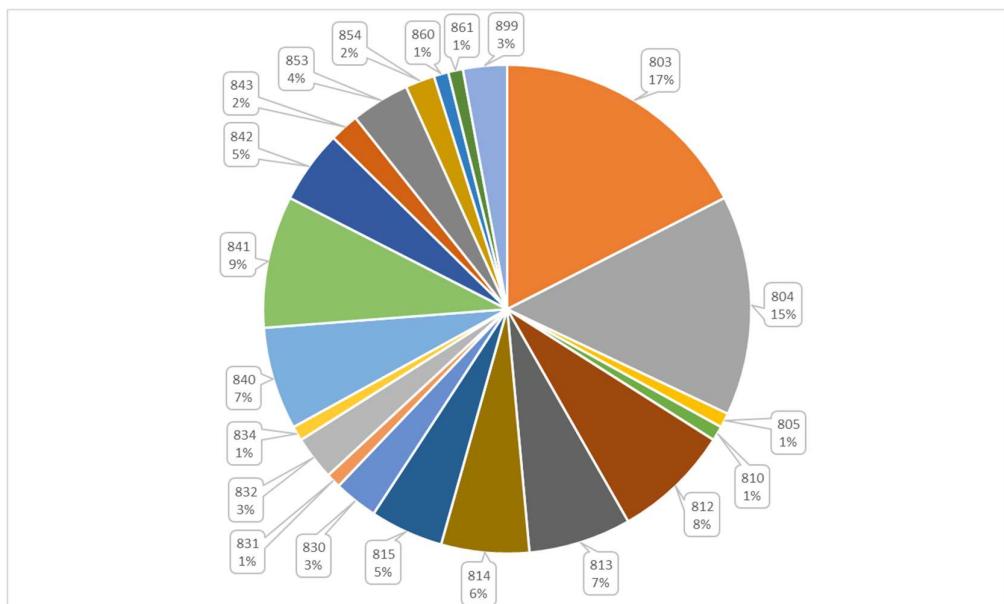


Figure 6: Répartition des blessés légers piétons (en EDA) par pictogramme

Le tableau 3 donne la répartition des victimes piétons dans les EDA Piétons LAB par tranche d'âge et par lieu de collision. On y voit apparaître une problématique liée à des traversées en dehors des passages piétons (en intersection ou non) ainsi que la jeunesse et l'inexpérience des victimes. Typiquement, **20% des victimes piétons de l'échantillon sont de très jeunes enfants qui échappent à la surveillance de leurs parents et traversent la chaussée de façon imprévisible.**

AGE / LIEU	AUTRES	CHAUSSEE HORS PASSAGE PIETONS	HORS CHAUSSEE	SUR PASSAGE PIETON	Total général
0-5 ans		9	1	2	12
5-10 ans		14		4	18
10-20 ans		35	3	9	47
20-65 ans		40	5	13	58
65 ans et +	1	14		3	18
Total général	1	112	9	31	153

Tableau 3: Répartition des victimes piétons par âge et lieu de la collision

La quasi-totalité des cas de l'échantillon ayant lieu en agglomération, nous avons investigué les vitesses initiales des véhicules (figure 7). Celles-ci laissent apparaître une faible minorité d'excès de vitesse : moins de 17% des cas en zone limitée à 50 km/h. La plupart n'excèdent pas la limite légale.

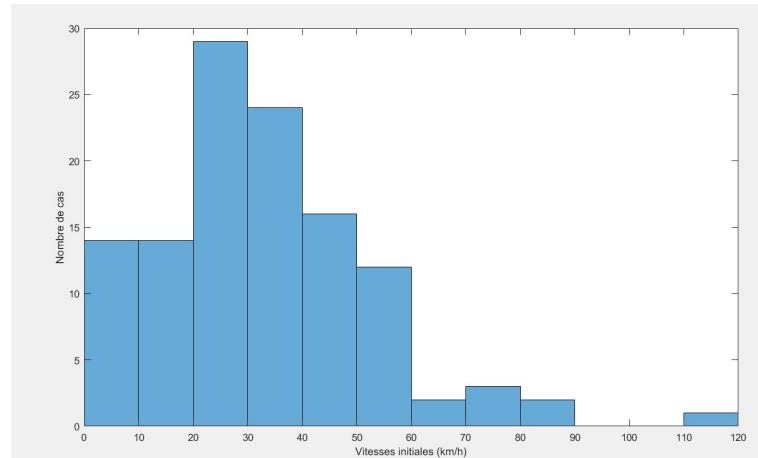


Figure 7: Répartition des vitesses initiales

Nous avons examiné les réactions des conducteurs lors des collisions (figure 8). La proportion très importante de « aucune » a le sens suivant : soit les conducteurs n'ont pas le temps de réagir à la présence du piéton et **la collision a lieu pendant le temps de réaction**, c'est-à-dire entre l'instant où ils perçoivent la présence du piéton et celui où ils pourraient physiquement initier une manœuvre (freinage, éviteme nt) soit ils n'ont pas perçu le piéton, soit encore ils sont tétanisés par la situation et n'y apportent pas la réponse qu'ils pourraient fournir. Ceci est très important dans l'optique de la mise au point des systèmes automatisés et dans celle du véhicule autonome en particulier.

En outre, lorsque les conducteurs ont le temps d'initier le freinage, celui-ci n'est pas suffisamment efficace car la collision a lieu. Les manœuvres d'évitement sont toujours par la gauche (dans notre échantillon) ce qui vu d'un œil extérieur peut paraître contre-productif. Mais c'est un réflexe humain à prendre en compte lors de la mise au point de systèmes automatisés.

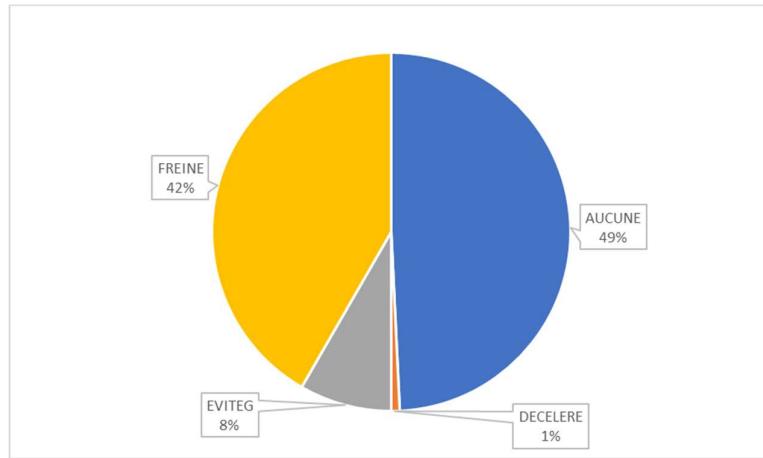


Figure 8: Répartition des types de réaction des conducteurs

Notre dernier graphe (figure 9) concerne les facteurs principaux des collisions et permet de se rapprocher de la notion de responsabilité. On retrouve dans 31% des collisions une responsabilité plutôt côté piétons, avec des traversées soudaines en dehors de tous passages piétons, des traversées de routes nationales ou d'autoroutes. L'attachement au statut prioritaire - qui entraîne la négligence vis-à-vis des contrôles nécessaires avant la traversée – est fréquemment rencontré.

La responsabilité du conducteur est manifeste dans 36% des cas, avec fréquemment un focus sur une partie de la scène de conduite perçue comme plus dangereuse (exemple : autres véhicules venant de la droite et prioritaires) surtout en intersection, ou une conduite insuffisamment prudente à l'approche de véhicules arrêtés ou d'autobus en stationnement. Des comportements aberrants (conduite en état d'ébriété, en excès de vitesse, pare-brise givré ou embué) ont aussi été relevés.

Nous avons tagué une proportion non négligeable (21%) de cas à responsabilité partagée car ils relèvent d'une incompréhension mutuelle entre le conducteur et le piéton. Un cas typique est celui où les piétons pensent avoir été vus par le conducteur car celui-ci ralentit et traversent alors que le conducteur pense que le piéton ne prendra pas ce risque (et a ralenti pour d'autres raisons).

Notons enfin des facteurs environnementaux : masque à la visibilité constitués par d'autres véhicules à l'arrêt ou non, ou encore du mobilier urbain. L'éblouissement du conducteur par le soleil ou encore les accidents de nuit hors de toute zone éclairée entrent aussi dans cette catégorie.

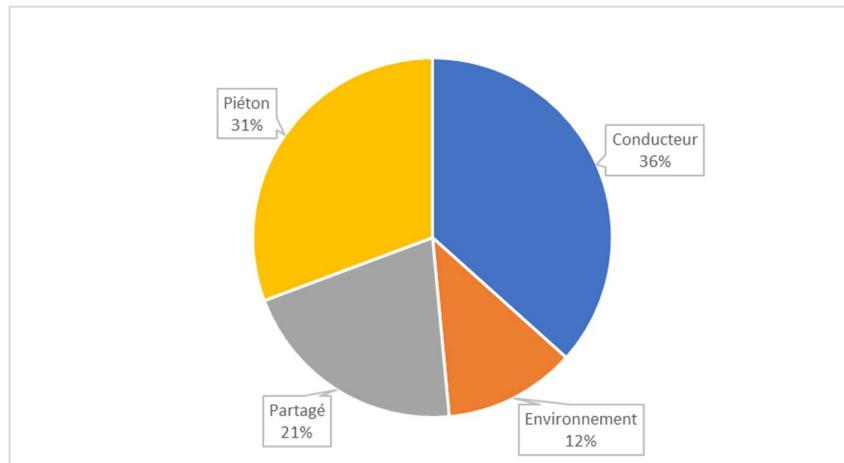


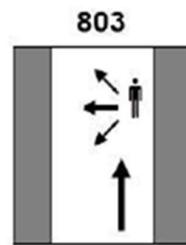
Figure 9: Facteurs principaux dans les collisions

1.1.2 Exemples-type

Traversée inopinée de piéton, de jour

Le piéton, enfant de 3 ans et 9 mois se trouvait avec sa mère et une autre personne à une station de bus. Les deux adultes discutaient, et pour une raison inconnue, l'enfant a traversé la chaussée perpendiculairement en courant.

L'enfant a alors été percuté par un véhicule arrivant de sa gauche, malgré une tentative d'évitement et de freinage de la part de la conductrice de celui-ci. L'enfant a été projeté sur la chaussée, présente un M.AIS de 1 avec un traumatisme crânien sans perte de connaissance, et une dermabrasion à la main droite.



Lors de l'accident, la conductrice circule sur une portion rectiligne d'une nationale. Elle identifie des personnes à l'arrêt de bus **mais ne voit pas l'enfant en approche**, celui-ci se trouvant avec des adultes, et masqué par eux, et continue sa progression. **La conductrice pense ne pas avoir vu la fillette avant que celle-ci ne commence à traverser**. Celle-ci se met à traverser perpendiculairement la chaussée en courant, de la droite vers la gauche, dans le sens de circulation de A. La conductrice donne un coup de volant sur la gauche et freine, se retrouve à cheval sur la voie opposée, mais ne peut éviter le choc avec l'enfant. **Il s'agit d'un exemple typique de traversée sans signe avant-coureur ni prise d'information de la part du piéton, avec de plus une scène en approche difficilement interprétable par le conducteur ou un véhicule automatisé**.

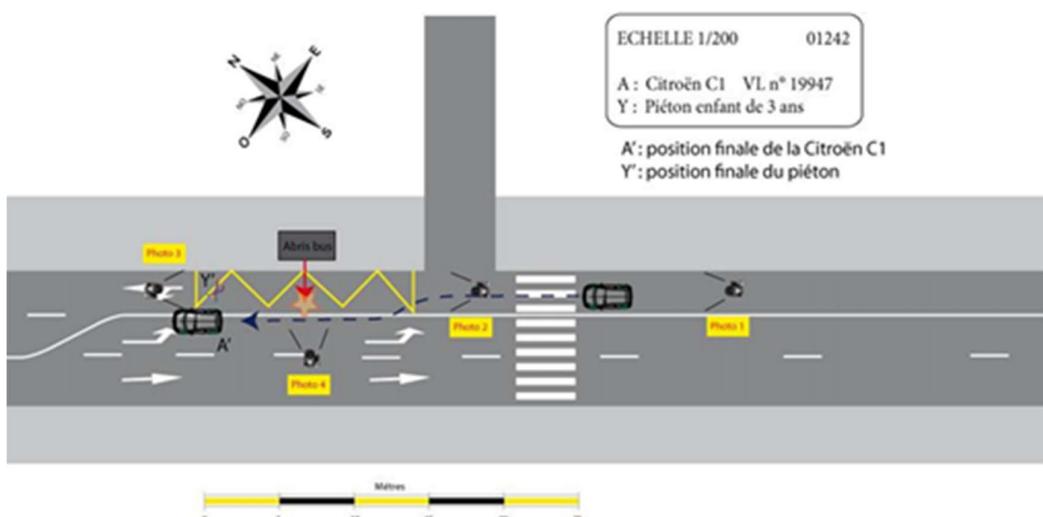
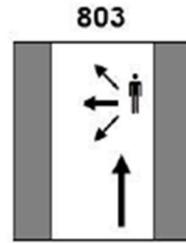


Figure 10: Plan de situation

Traversée sur passage piéton de nuit

Cet accident a eu lieu en agglomération, sur un passage piéton, de nuit (en hiver – période neigeuse et de grand froid). La zone était mal éclairée, aucun éclairage spécifique au niveau de la matérialisation des bandes blanches. Il n'y avait pas de circulation (risque de verglas et de neige important), pas de piéton (hormis les deux jeunes filles impliquées).

La conductrice roule doucement car il fait nuit et elle sait qu'il y a deux priorités à droite puis des véhicules pouvant survenir de sa gauche. Elle discute avec son fils, mais reste concentrée sur la conduite. Elle déclare être en première et ne pas avoir encore passé la seconde. Arrivée à la hauteur de la poste, elle voit devant elle (sur la chaussée) un piéton (traversant sur le passage piéton). Elle freine brutalement (elle sent la voiture brouter – déclenchement de l'ABS) et elle débraye en même temps. Elle passe ensuite au point mort avant de descendre de la voiture. Elle voit alors une jeune fille qui est à moins de 50 cm de son parechoc et qui se relève. Elle aperçoit aussi une enfant à côté de la jeune fille. Sa voiture est immobilisée juste sur le départ du passage piéton. Elle ne se souvient pas avoir vu quoi que ce soit sur le trottoir. C'est une fois dans ses phares qu'elle a pu apercevoir le piéton.



La piétonne est accompagnée de sa petite nièce (11 ans). Au moment de l'accident elles rentraient à leur domicile, sans précipitation (mis à part le froid) et sans stress. Elles sont habillées avec des habits sombres (manteaux, bonnets et jeans) ce qui ne facilite pas leur perception.

La jeune femme se déplaçait dans l'axe du passage piéton sur le trottoir. En arrivant au niveau du passage piéton, elle voit bien la voiture, qui roule doucement. Il n'y a aucune circulation à ce moment, elle pense que la conductrice l'a vue (puisque elle ne roule pas vite) et s'engage sans plus faire attention à la voiture. Lorsqu'elle entend le bruit du freinage et qu'elle perçoit la voiture, elle pousse sa nièce, en arrière, dans un réflexe de protection Elle chute sur le capot de la voiture et glisse au sol, sans endommager ou laisser de traces sur celui-ci.

Les piétons commettent ici une erreur d'interprétation, la scène est difficile pour un conducteur humain, qui plus est absorbé par sa tache de conduite et une tache secondaire, et serait un défi pour un véhicule automatisé.



Figure 11: Vue des lieux (point de vue conductrice) de jour et de nuit

Interaction en intersection (sur passage piéton, de jour)

Le conducteur du véhicule particulier circule à vitesse stabilisée. Arrivée à l'intersection, il ralentit et s'arrête pour laisser passer un véhicule qui arrive de sa droite. Une fois le véhicule passé il redémarre (tranquille). Le conducteur ne voit pas le piéton qui s'était engagé sur le passage piéton à 10 m environ devant lui et le percute au milieu du passage piéton.

Il ne réagit que lorsque le piéton est devant lui, il freine brutalement et s'immobilise 2 m après le choc. Le piéton est poussé et chute à 1,90 m de l'avant du véhicule.

Le piéton marchait sur le trottoir. Il s'est immobilisé face au passage piéton et attendait que les véhicules s'arrêtent pour traverser.

Aux dires du conjoint du piéton « il n'est pas toujours facile de traverser Les voitures ne laissant pas les piétons traverser »..... « [Le piéton], en voyant le véhicule blanc s'arrêter, un peu plus loin, a pensé que le conducteur l'avait vu et a donc traversé [Le piéton] s'est fait percuter sans comprendre – ne regardant pas les véhicules et étant presque arrivé sur le trottoir d'en face ... ».

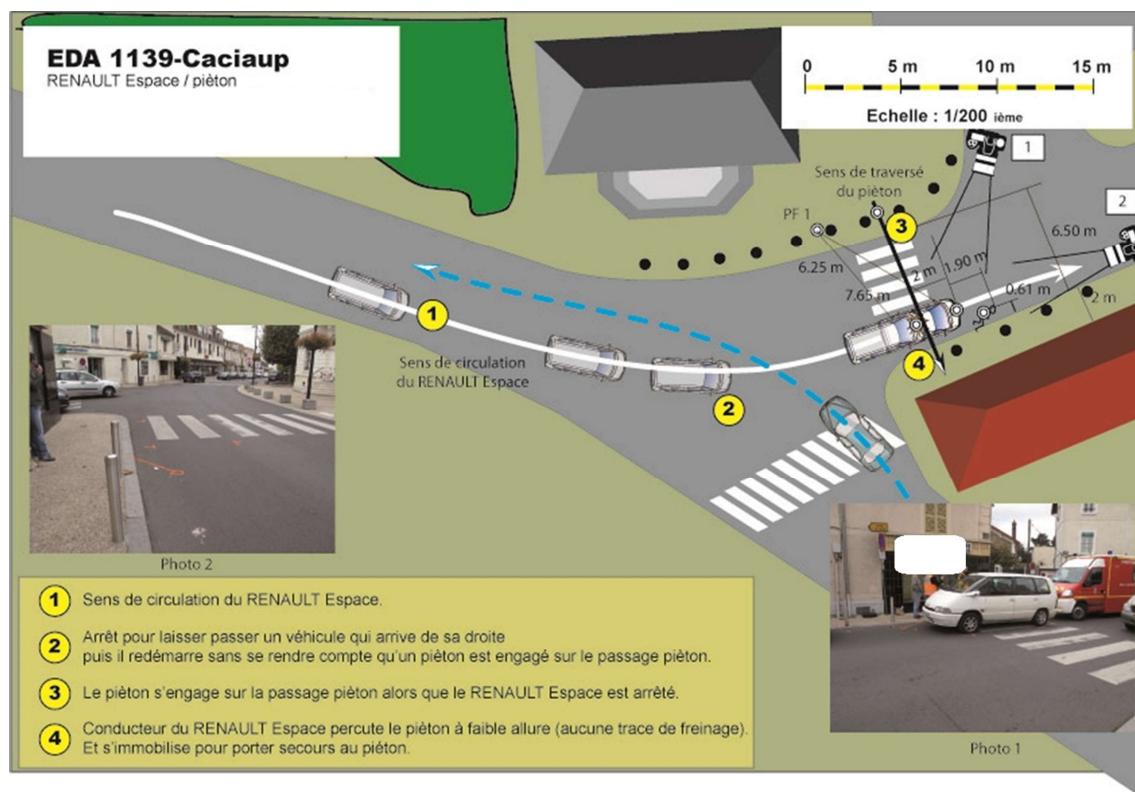
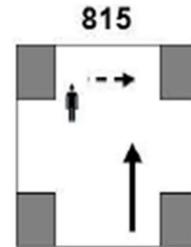
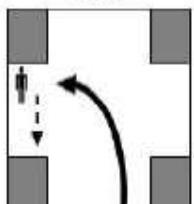


Figure 12: Plan de situation

Interaction en intersection (sur passage piéton, de jour)

812

La conductrice du véhicule particulier circule à vitesse constante puis ralentit et met son clignotant pour tourner à gauche (aucun véhicule n'arrivant en face d'elle). Connaissant bien les lieux et sachant qu'il y a une piste cyclable dans la rue où elle tourne, elle prend un virage très large au-delà du marquage du « stop ». Ensuite, elle redresse sa trajectoire car un autre véhicule particulier est stationné sur le côté droit de sa voie de circulation.

C'est au moment où elle redresse sa trajectoire qu'elle voit un piéton habillé de noir qui traverse devant sa voiture. Elle freine mais ne peut l'éviter. Le piéton impacte le coté du parebrise et chute au sol. La conductrice donne alors un coup de volant à droite tout en terminant son freinage pour se stationner derrière la voiture garée sur le côté. Le piéton chute au sol (MAIS 1 – hématome jambe gauche et coupure lèvre inférieure).

La conductrice pense que c'est le bras ou le sac à dos du piéton qui est venu en contact avec le parebrise.

La conductrice est ici absorbée par une tache de conduite complexe (multiplicité d'éléments mobilisant son attention) au cours de laquelle survient de façon inattendue un piéton.

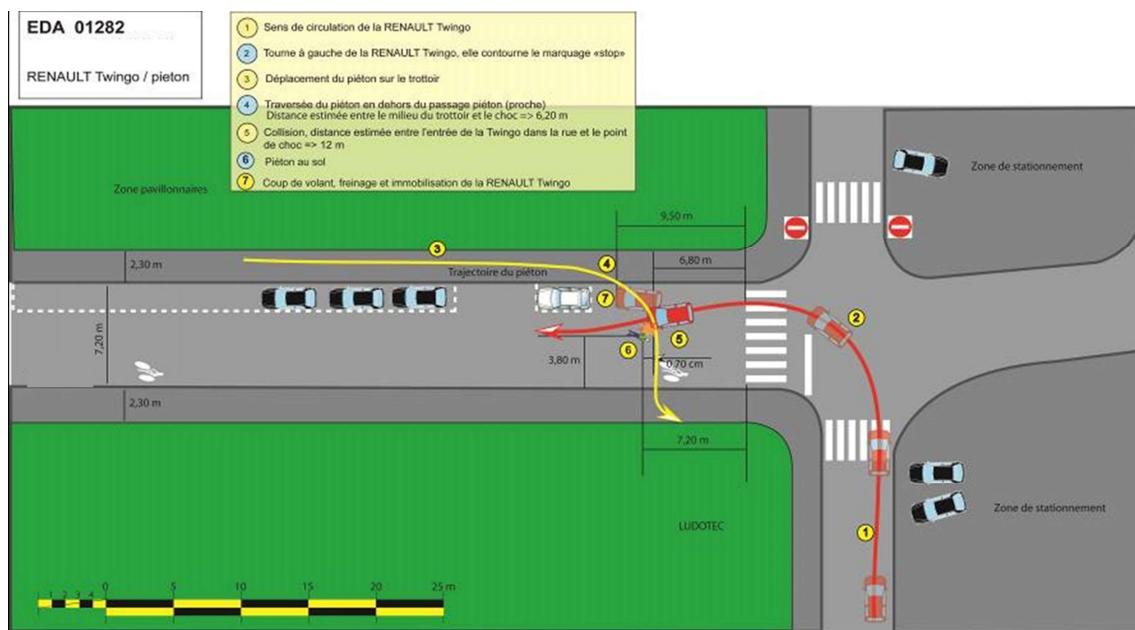


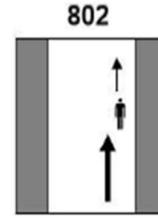
Figure 13: Plan de situation

Interaction longitudinale sur voie rapide (de nuit)

Il s'agit d'un accident mortel très grave de la circulation routière, impliquant deux véhicules légers et trois piétons.

Dans un premier temps, le conducteur du véhicule percute trois piétons circulants de nuit, sans éclairage sur la chaussée, et dans le même sens que lui.

Les trois piétons sont deux jeunes femmes et un bébé dans un landau. Les deux jeunes femmes circulent de front, l'une à côté de l'autre, la plus à droite sur la chaussée poussant le landau devant elle. Elles circulent dans le même sens et dans le même couloir de circulation que le véhicule et occupent un espace important de la partie droite du couloir de circulation du véhicule.



Après ce premier choc, le piéton Y1 qui était le plus à droite sur la chaussée et le bébé Y3 sont projetés dans le bas-côté droit de la route, alors que le piéton Y2 qui circulait le plus à gauche sur la chaussée est projeté sur la route, puis percuté de nouveau et franchi par le véhicule.

Traversée inopinée de piéton (derrière masque à la visibilité)

Cet accident a eu lieu dans une densément peuplée. Il s'agit d'une collision de type « projection vers l'avant » entre un véhicule léger et un piéton (8 ans). Le jeune piéton traverse en courant de droite à gauche (dans le sens de circulation du véhicule) sans regarder et en dehors d'un passage piéton. Il est masqué en approche par un SUV stationné sur la droite (toujours dans le sens de circulation du véhicule). Le conducteur du véhicule léger rentre chez lui et roule doucement, la route étant sinuouse et entourée de hauts bâtiments. Arrivé à la hauteur du SUV il voit un jeune garçon arriver en courant et lui couper la route. Lorsqu'il l'aperçoit, il freine violemment (traces de freinage sur la chaussée) mais ne tente aucun évitemen. Il s'arrête 6 m plus loin.



Il percute le piéton, alors que celui-ci est pratiquement sur la ligne médiane de la chaussée. Il touche le piéton au niveau de son phare avant gauche (légère trace de frottement). Ce choc déstabilise le piéton qui chute au sol, puis tente de s'enfuir malgré qu'il soit blessé (visage en sang).

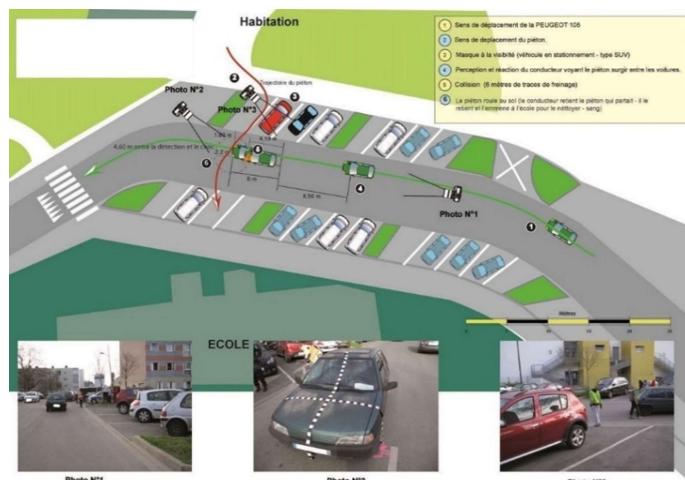


Figure 14: Plan de situation

1.2 Simulation de l'efficacité du freinage automatisé (AEB)

1.2.1 Introduction

La sécurité routière des piétons reste un enjeu majeur dans le monde : en 2016, les piétons représentaient 23% des 1,35 million de tués sur la route enregistrés dans le monde [1]. En Europe, le nombre de piétons tués a baissé de 36 % entre 2007 et 2016 [2] : malgré cela, plus de 5 500 piétons ont été mortellement blessés dans l'UE en 2016, 47 % d'entre eux avaient plus de 65 ans [3]. En 2017 en France, les piétons tués sur les routes représentaient 13 % du total des tués sur les routes [4]. Avec 484 piétons tués, cela correspond presque exactement au décompte de 2010.

Pour augmenter la sécurité des piétons, une solution consiste à équiper les voitures de systèmes avancés d'assistance à la conduite (ADAS). Le freinage d'urgence autonome pour piétons (AEB-Piéton) est l'un de ces systèmes. Il permet d'éviter ou d'atténuer les collisions entre voitures et piétons, en appliquant automatiquement les freins. Certains systèmes peuvent d'abord émettre un avertissement et n'appliquer les freins que si le conducteur ne réagit pas à l'avertissement.

La littérature scientifique décrit plusieurs études traitant de l'efficacité AEB-Piéton [5][6][7][8][9], qui sont résumées dans [10]. Comme la pénétration du marché de la technologie AEB est encore faible, les études consistent principalement en des analyses prospectives des avantages potentiels, en utilisant des re-simulations - avec des modèles de véhicules virtuels, embarquant la technologie AEB - d'instances pertinentes de collisions entre voitures et piétons sélectionnées à partir de bases de données détaillées sur les accidents réels.

Une étude [7] a évalué l'influence d'une définition spécifique de l'AEB sur les vitesses d'impact et les emplacements de l'impact de la tête du piéton. La représentativité de l'échantillon d'accidents n'a pas été recherchée, une caractéristique commune avec [6]. Certaines études [5][6] [8][9] ont utilisé des courbes de risque de blessure pour évaluer l'efficacité des systèmes AEB. Deux d'entre elles [8][9] ont utilisé des échantillons représentatifs de la base de données German In-Depth Accident Study (GIDAS) et évalué l'efficacité de l'AEB dans la réduction des décès [8][9] et des blessures mortelles ou graves [8] des piétons. L'efficacité a été évaluée pour différentes valeurs de l'angle de vue des capteurs AEB [9]. Différentes combinaisons de paramètres ont également été testées [8] et les effets de paramètres tels que le champ de vision ou l'intensité de freinage maximale ont été évalués, bien qu'aucune approche systématique n'ait été utilisée pour évaluer les effets des paramètres de conception individuels. Dans [5], des courbes de risque de blessure ont été utilisées pour les blessures mortelles, graves et légères afin d'évaluer de manière exhaustive trois générations de systèmes AEB.

Dans la présente étude, un ensemble complet de courbes de risque de blessure permettant d'évaluer l'efficacité de l'AEB en termes de vies sauvées et de blessures atténuées a été construit à partir de données d'accidents représentatives par catégories d'usagers et de blessures de l'accidentalité française. Les courbes de risque associé à la gravité des blessures (décès, blessés hospitalisés et légers) ont été utilisées en combinaison avec des re-simulations d'accidents utilisant un modèle cinématique de voiture auquel ont été ajoutés des capteurs AEB avec des stratégies de détection et d'action réaliste.

Des métriques synthétisant l'efficacité de l'AEB ont été construites et utilisées dans un plan d'expérience numérique basée sur la méthode de Taguchi, ce qui a permis de mettre en évidence les paramètres critiques de conception de l'AEB, au moyen d'une analyse de variance.

1.2.2 Méthode

Données

L'efficacité de l'AEB Piéton a été évaluée à l'aide d'accidents pertinents sélectionnés dans la base de données accidentologique française VOIESUR [11]. Cette base de données a été construite dans le cadre du projet VOIESUR qui a été mis en place en 2012 et a impliqué quatre acteurs majeurs de recherche sur la sécurité routière en France (LAB, CEREMA, IFSTTAR et CEESAR). La base de données rassemble tous les accidents mortels survenus en France en 2011 et un tirage d'un accident corporel non mortel sur 20 à l'échelle de chaque département de France métropolitaine. Environ 8 500 accidents ont ainsi été codés avec des informations relatives à l'infrastructure, au véhicule, aux occupants et aux blessures. Des experts ont ensuite ajouté des informations relatives à la vitesse d'impact du véhicule, à la défaillance fonctionnelle humaine, au niveau de responsabilité, etc. Des pondérations ont été calculées pour rendre cette base de données représentative de la situation accidentelle de la France pour 2011 telle que décrite dans le recensement national BAAC [12]. Le poids dépend de la nature des impliqués, de la gravité de l'accident et du type de forces de l'ordre déclarant l'accident mais (par exemple) pas du pictogramme associé à l'accident. La répartition, après pondération, des accidents corporels non mortels par pictogrammes reproduit la répartition par pictogramme de l'échantillon initial (5%) des accidents corporels non mortels. Sa représentativité est une hypothèse de notre travail – signalons cependant qu'il n'existe aucune référence permettant de se prononcer sur sa validité.

La population cible d'accidents retenue ici est constituée des accidents dans lesquels un piéton (tous âges confondus) a été heurté par la partie avant d'une voiture particulière et pour lesquels la vitesse d'impact a pu être reconstruite. Cependant, certains cas ont été exclus de la sélection : véhicule en perte de contrôle avant l'impact sur le piéton, collisions par effleurement latéral, tentatives de suicide etc.

L'échantillon de données brutes contient 164 piétons mortellement blessés (décédant dans les 30 jours suivant l'accident), 47 blessés hospitalisés (au moins 24h) et 60 piétons blessés légers (hospitalisés moins de 24h ou ne se présentant pas à l'hôpital). Un biais courant est que la vitesse d'impact du véhicule est plus souvent disponible pour les accidents mortels ou les accidents entraînant des blessures plus graves, un facteur de correction a donc été appliqué pour compenser la sous-représentation des accidents avec blessures légères dans l'échantillon final.

L'échantillon pondéré final comprend 197 piétons mortellement blessés, 1863 piétons blessés hospitalisés et 3103 piétons blessés légers. Le classement en sévérité de blessure est calqué sur la définition des forces de l'ordre et non sur l'échelle AIS.

Courbes de Risque

Des courbes de risque de blessure sont nécessaires pour les trois niveaux de blessure, car l'atténuation des blessures doit être prise en compte dans l'évaluation. Elles ont été construites à partir d'un modèle de régression log-log polytomique (CLOGLOG) utilisant le **carré de la vitesse d'impact** comme variable indépendante [13]. Les probabilités que le piéton soit tué ($P(T)$) et soit ou tué ou blessé hospitalisé ($P(TBH)$) sont données par les équations suivantes :

$$P(T) = 1 - e^{(-e^{(-4,6451+0,00079*vimpact_kmh^2)})} \quad (1)$$

$$P(TBH) = 1 - e^{(-e^{(-1,5174+0,00079*vimpact_kmh^2)})} \quad (2)$$

où la vitesse d'impact $vimpact_kmh$ est en km/h. Une courbe de risque associée aux blessés hospitalisés a été construite en soustrayant l'équation (1) de l'équation (2), et une courbe de risque associée aux blessés légers en soustrayant l'équation (2) de la constante légère 1. Des intervalles de confiance ont été estimés en suivant la méthode exposée dans [14]. Pour rappel, l'intégralité des accidents constituant notre échantillon sont des accidents corporels où un piéton a été blessé (quel que soit le niveau de blessure).

Reconstruction des accidents

La reconstruction de l'accident s'est basée sur les informations disponibles dans les rapports de police : photos des véhicules et de l'emplacement après l'impact, plan à l'échelle des lieux de l'accident avec les détails de l'accident tels que l'emplacement de l'impact, distance de projection du piéton, traces éventuelles de freinage, etc. Les auditions de témoins présentes dans les rapports ont été pris en compte d'une part pour confirmer les informations fournies par la police, et d'autre part pour compléter les détails éventuellement manquants sur les plans.

Ainsi, les derniers mètres des trajectoires des véhicules avant l'accident ont été modélisés, en remontant aussi loin dans le temps que les données disponibles le permettaient, et les types de trajectoires ont été limités à des portions de cercles ou de lignes droites. L'accélération ou la décélération des véhicules en phase de pré-collision a été supposée constante. L'évaluation des vitesses des piétons en pré-collision a été faite au moyen d'estimations basées sur l'âge et l'attitude, par exemple, marche, course. L'évaluation des vitesses d'impact a été réalisée à partir d'estimations basées sur les distances de projection des piétons [15][16][17].

Finalement, les vitesses et les angles d'impact, les vitesses et les accélérations/décélérations possibles avant la collision, les rayons de courbure de la trajectoire et le sens éventuel de virage du véhicule ont été reconstruits pour tous les accidents pertinents. Les obstacles à la visibilité - tels que bâtiments, arbres ou autres véhicules (en mouvement ou non) - ont également été codés.

Simulation fonctionnelle de l'AEB

Dans le but de simuler la réponse des véhicules équipés d'AEB-Piéton dans des situations d'accident réelles, un outil de simulation a été développé dans Matlab. Cet outil utilise les courbes de risque données par les équations (1) et (2) pour transformer les résultats de simulation exprimés en termes de vitesses d'impact en probabilités de blessures. Ses entrées sont :

1. Scénarios d'accidents décrits par les trajectoires des véhicules et des piétons pendant un temps avant collision (TTC) défini par l'utilisateur. Les scénarios peuvent inclure des obstacles, fixes ou mobiles.
2. Caractéristiques du capteur telles que portée, angle de vision, position longitudinale et latérale sur le véhicule, délai de détection, inclinaison.
3. Caractéristiques de freinage (retard de transmission, valeur de freinage maximale, retard de freinage complet) Les valeurs de freinage maximales dépendent principalement des conditions de la route (par exemple, verglas, pluie).
4. Valeurs caractéristiques des courbes de risque

Les sorties de cet outil sont :

1. Trajectoires du véhicule avec AEB. Celles-ci sont déterminées à l'aide d'un modèle de véhicule bidimensionnel à masse ponctuelle qui calcule une réponse cinématique. Ces trajectoires résultent de la logique de freinage AEB choisie décrite et dans cette section.
2. TTC à la détection des piétons par le système AEB.
3. Répartition des vitesses d'impact (d'origine et avec AEB). Il est possible de distinguer deux types différents de cas de vitesse d'impact nulle : le véhicule peut traverser la trajectoire du piéton sans impact ou s'arrêter avant de rencontrer la trajectoire du piéton.
4. Répartition des piétons blessés (d'origine et avec AEB).

Pour que le freinage démarre, la logique AEB choisie nécessite que toutes les conditions suivantes soient remplies :

- a. Le piéton est entièrement resté dans le champ de vision (FOV) du capteur pendant un temps d'identification défini par l'utilisateur.
- b. La distance latérale du piéton, par rapport à la direction de déplacement du véhicule, a été inférieure à une distance maximale pendant toute la durée d'identification.
- c. Le TTC calculé par le modèle est inférieur à une valeur maximale.
- d. La distance avant collision (DTC) est inférieure à une valeur maximale.

Une fois la décision de freinage prise, le freinage ne démarre pas immédiatement, mais après un délai de transmission des informations au système de contrôle (ce temps est défini par l'utilisateur) et lorsque celui-ci est dépassé, la valeur de freinage maximale définie par l'utilisateur (décélération maximale en m/s^2) n'est pas atteinte immédiatement mais après une augmentation linéaire sur un délai de freinage complet (défini par l'utilisateur). La chronologie complète du freinage est illustrée à la figure 15 et est similaire à ce qui a été utilisé dans [8] - la principale différence étant que, dans le contexte du présent document, les manœuvres de freinage des conducteurs d'origine (le cas échéant) ont été combinées avec les réponses AEB, pour le réalisme de la simulation.

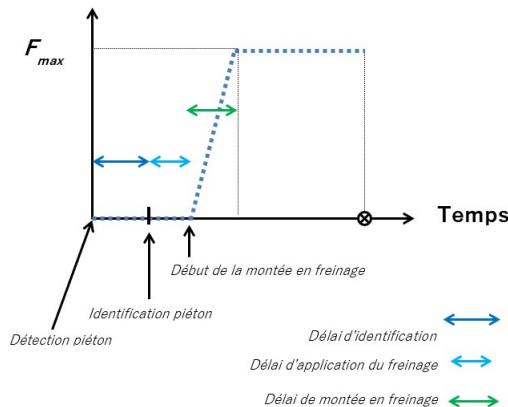


Figure 15 : Profil de freinage (principe)

Calcul d'efficacité

L'évaluation de l'efficacité de l'AEB-Piéton consiste à comparer les conséquences des accidents d'origine avec celles de la simulation de ceux-ci avec action de l'AEB-Piéton. Parmi toutes les métriques possibles, la mesure d'efficacité (E_{inj}) suivante a été utilisée :

$$E_{inj} = 100 * \frac{N_{injini} - N_{injAEB}}{N_{injini}} \quad (3)$$

Où N_{injini} est le nombre d'origine de piétons ayant subi un niveau de blessure donné et N_{injAEB} est le nombre de piétons restant à ce même niveau de blessure après application de l'AEB-Piéton. Pour chaque accident simulé, une probabilité de blessure a été calculée à l'aide des courbes de risque et de la nouvelle vitesse d'impact (avec application de l'AEB). Cette probabilité a ensuite été multipliée par le poids statistique du ou des piétons victimes de cet accident et la somme de tous ces produits a donné les valeurs de N_{injAEB} pour chaque niveau de blessure. Seule la population d'accidents simulés comporte des accidents évités : ceux-ci sont associés à une probabilité de blessure nulle.

Configurations évaluées Quatre configurations de système, représentatif des premières générations d'AEB, ont été évaluées dans cette étude. Elles diffèrent uniquement par le nombre, l'angle et la portée de leurs capteurs. Dans la suite, ils sont appelés systèmes à *angle étroit*, de *référence*, *bi-capteur* et *haut de gamme*. Toutes les valeurs des paramètres du système sont illustrées dans le tableau 4

Tableau 4: Valeurs de paramètres pour les systèmes évalués

Paramètre	Angle étroit	Référence	Bi-capteur	Haut de gamme
Portée Capteur n°1	40 m	20 m	20 m	40 m
Angle Capteur n°1	18°	60°	35°	18°
Durée d'identification Capteur n°1	0.2 sec	0.2 sec	0.2 sec	0.2 sec
Portée Capteur n°2	--	--	20 m	15 m
Angle Capteur n°2	--	--	35°	90°
Durée d'identification Capteur n°2	--	--	0.2 sec	0.2 sec
TTC maximal	1 sec	1 sec	1 sec	1 sec

<i>Délai d'application du freinage</i>	0.05 sec	0.05 sec	0.05 sec	0.05 sec
<i>Temps de montée en freinage</i>	0.3 sec	0.3 sec	0.3 sec	0.3 sec
<i>Freinage maximal</i>	-9 m/s ²	-9 m/s ²	-9 m/s ²	-9 m/s ²
<i>Distance latérale maximale au piéton</i>	2.9 m	2.9 m	2.9 m	2.9 m
<i>DTC maximale</i>	15 m	15 m	15 m	15 m

Analyse de sensibilité

La réalisation d'expériences (numériques ou non) pour évaluer la sensibilité d'un ensemble de réponses à un ensemble de stimuli ou facteurs est connu sous le nom de plan d'expérience factoriel (PLEX). Un plan d'expérience peut être *complet* (utilisant toutes les combinaisons possibles de stimuli ou facteurs) ou *partiel*. Taguchi a défini un ensemble de matrices orthogonales permettant de spécifier la façon de construire des plans d'expérience partiels de taille minimale [18].

Facteurs Les analyses de sensibilité ont été réalisées sur trois configurations de capteurs : une configuration à un seul capteur, une configuration à deux capteurs coaxiaux (un capteur longue portée / angle fermé, un capteur faible portée / angle ouvert) et une configuration à deux capteurs frontaux identiques de part et d'autre de l'axe véhicule (faible portée / angle ouvert). Les facteurs sont récapitulés dans les tableaux 5, 6 et 7.

L'équation (4) donne le nombre minimum d'expériences numériques (N) requises par la méthode si N_f est le nombre de facteurs, chacun avec le nombre L_i de valeurs possibles. L36 – une matrice de 36 expériences, l'équation (4) donnant un minimum de 27 – a été choisie pour toutes les analyses.

$$N = 1 + \sum_{i=1}^{N_f} (L_i - 1) \quad (4)$$

Tableau 5: Configuration Mono-Capteur

Fonction	Facteur	Unité	Valeurs
Capteur	Position longitudinale	m	0, -1, -1.3
"	Position latérale	m	-0.7, 0, 0.7
"	Durée d'identification	s	0.2
"	Portée	m	5, 10, 20
"	Angle	°	20, 45, 90
"	Délai d'application du freinage	s	0.05
"	Freinage maximal	m/s ²	9
"	Temps de montée en freinage	s	0.3
"	Distance latérale maximale au piéton	m	3
"	DTC maximal	m	15
"	TTC maximal	s	1

Tableau 6: Configuration deux capteurs coaxiaux

Fonctions	Facteur	Unité	Valeurs
Capteur longue portée	Position longitudinale	m	0, -1, -1.3
"	Durée d'identification	s	0.1, 0.2, 0.3

	Portée	m	50, 75, 100
"	Angle	s	20, 30, 40
<i>Capteur faible portée</i>	Durée d'identification	s	0.1, 0.2, 0.3
"	Portée	m	10, 30, 50
"	Angle	°	40, 60, 90
<i>Communes</i>	Délai d'application du freinage	s	0.1, 0.15, 0.2
"	Freinage maximal	m/s ²	4, 7, 9.8
"	Temps de montée en freinage	s	0.1, 0.2, 0.3
"	Distance latérale maximale au piéton		1, 2, 5
"	DTC maximal	m	10, 20, 30
"	TTC maximal	s	0.5, 1, 1.5

Tableau 7: Configuration deux capteurs frontaux

Fonctions	Facteur	Unité	Valeurs
<i>Capteurs faible portée</i>	Distance à l'axe véhicule	m	0.3, 0.5, 0.7
"	Durée d'identification	s	0.1, 0.2, 0.3
"	Portée	m	10, 20, 30
"	Angle	°	20, 40, 90
<i>Communes</i>	Délai d'application du freinage	s	0.1, 0.15, 0.2
"	Freinage maximal	m/s ²	4, 7, 9.8
"	Temps de montée en freinage	s	0.1, 0.2, 0.3
"	Distance latérale maximale au piéton	m	1, 2, 5
"	DTC maximal	m	10, 20, 30
"	TTC maximal	s	0.5, 1, 1.5

Réponses Les métriques utilisées correspondent à différents aspects de la performance de l'AEB-Piéton. Les trois premières sont les nombres de tués évités (A_F), le nombre de blessés hospitalisés évités (A_{SI}) et le nombre de blessés légers évités (A_{SLI}). Les estimations maximales de coûts sociaux (C_F, C_{SI}, C_{SLI}) issus du projet Européen Safety Cube [19] ont été utilisés pour construire une métrique globale (M_G) reflétant le fait que si les blessés coûtent moins cher *individuellement* à la société que les tués, ils sont également bien plus nombreux.

$$M_G = C_F * A_F + A_{SI} * C_{SI} + A_{SLI} * C_{SLI} \quad (5)$$

avec les valeurs suivantes (en 10^3 euros/victime) : 3000 (C_F), 960 (C_{SI}) et 70 (C_{SLI}).

Contributions des facteurs Les variations de réponse sur tout le plan d'expérience sont quantifiées par l'indicateur de variance SCT (équation (6)). Les contributions individuelles des facteurs sont quantifiées par des indicateurs de contribution CTR_A (équation (9)) permettant un classement des contributions à la variance globale :

$$SCT = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (6)$$

$$e_{A_i} = \bar{Y}_{A_i} - \bar{Y} \quad (7)$$

$$SC_A = \frac{n}{m} * \sum_{i=1}^m e_{A_i}^2 \quad (8)$$

$$CTR_A = \frac{SC_A}{SCT} \quad (9)$$

Où \bar{Y} est la valeur moyenne de la réponse sur tout le plan d'expérience, Y_i est la valeur de la réponse pour la ligne i du plan d'expérience, n est le nombre d'expériences total, \bar{Y}_{A_i} est la moyenne des réponses pour toutes les expériences où le facteur A est au niveau i sur m niveaux possibles.

1.2.3 Résultats

Positions relatives véhicule / piétons

L'outil de simulation permet de visualiser les positions des piétons à différentes valeurs du TTC (figure 16). Les axes sont gradués en mètres, le véhicule se situe à gauche de la figure.

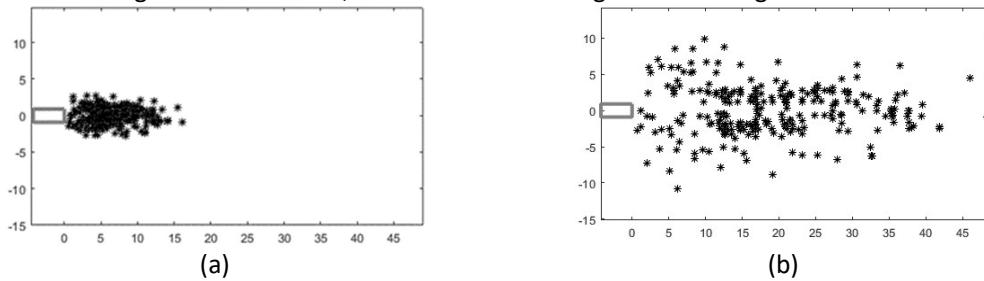


Figure 16 : Position des piétons à (a) TTC = 0.5 sec et (b) TTC = 1.5 sec.

Analyse de sensibilité

Le tableau 8 montre les résultats obtenus pour la configuration à deux capteurs coaxiaux par ordre décroissant de contributions CTR_A (en %) à la métrique globale.

Tableau 8: Résultats en configuration deux capteurs coaxiaux

	Global	Tués	Blessés Hospitalisés	Blessés Légers
<i>Freinage maximal</i>	38,38	42,82	37,88	24,73
<i>Distance Latérale Maximale</i>	31,7	29,1	31,98	29,07
<i>TTC Maximal</i>	9,76	6,82	9,99	14,24
<i>Angle Capteur Faible Portée</i>	6,25	2,09	6,83	15,52
<i>Temps de montée en freinage</i>	3,61	4,03	3,59	2,21
<i>Délai d'application du freinage</i>	2,36	2,31	2,37	2,07
<i>DTC Maximale</i>	2,3	8,07	1,7	1,63
<i>Angle Capteur Longue Portée</i>	1,64	0,71	1,68	4,16
<i>Durée Identification Capteur Longue Portée</i>	0,59	0,38	0,63	0,78
<i>Portée Capteur Faible Portée</i>	0,21	0,19	0,22	0,58

<i>Position en X Capteur Longue Portée</i>	0,19	0,1	0,22	0,38
<i>Portée Capteur Longue Portée</i>	0,12	0,07	0,12	0,71
<i>Durée Identification Capteur Faible Portée</i>	0,03	0,06	0,02	0,03
<i>Résidu</i>	2,86	3,25	2,77	3,89

Le freinage maximal apparaît comme le facteur le plus influent, pour presque toutes les métriques, avec des contributions allant de 24% (blessés légers) à environ 43% (tués), les valeurs croissantes de ce facteur allant dans le sens d'une meilleure performance. Deux facteurs très influents méritent d'être mis en exergue : la distance latérale maximale (les piétons situés au-delà de cette distance ne sont pas détectés) et le TTC maximal (pas de freinage par l'AEB si le TTC restant est supérieur à cette limite). La distance latérale est le facteur le plus influent pour les blessés légers alors que la contribution du TTC maximal croît de 6,8% à 14% à mesure que le niveau de blessure considéré décroît. Pour les deux facteurs, des valeurs élevées vont dans le sens d'une meilleure performance de l'AEB. La DTC maximale n'arrive qu'au septième rang des contributeurs à la métrique globale mais c'est l'un des plus influents en ce qui concerne la réduction du nombre de tués (là encore, des valeurs élevées sont favorables à la performance de l'AEB). Enfin, l'angle du capteur faible portée apparaît influent pour les blessés légers.

L'analyse de sensibilité sur la configuration à deux capteurs frontaux donne une image très différente. Le tableau 9 illustre ce fait à l'aide des contributions (en %) à la métrique globale.

Tableau 9: Résultats en configuration deux capteurs frontaux

	Global	Tués	Blessés Hospitalisés	Blessés Légers
<i>Angle Capteur</i>	32,29	37,91	30,3	22,38
<i>Distance Latérale Maximale</i>	24,19	14,35	26,01	28,35
<i>Freinage Maximal</i>	21,15	8,25	24,23	30,02
<i>Portée Capteur</i>	5,62	19,17	3,43	0,89
<i>TTC Maximal</i>	4,32	3,28	4,43	4,23
<i>Temps de montée en freinage</i>	2,84	3,83	2,62	1,09
<i>Délai d'application du freinage</i>	0,9	0,55	0,9	1,6
<i>Durée Identification Capteur</i>	0,64	0,85	0,6	0,7
<i>Distance en Y Capteur</i>	0,46	1,33	0,31	0,08
<i>DTC Maximale</i>	0,01	0,33	0,01	0,43
<i>Résidu</i>	7,58	10,15	7,16	10,23

L'angle du capteur, la distance latérale maximale et le freinage maximal jouent tous un rôle important et leur classement dépend de la métrique que l'on regarde. L'angle capteur est important pour les tués et les blessés hospitalisés, la distance latérale et la valeur du freinage maximal pour les blessés légers. La portée du capteur apparaît comme le second facteur le plus influent pour les tués et la valeur du

TTC maximal ne semble pas avoir d'influence. Des valeurs élevées du résidu suggèrent que les interactions de facteurs (non considérées ici) pourraient exercer une influence sur le classement.

Le tableau 10 illustre l'analyse de sensibilité de la configuration mono-capteur et montre un équilibre entre les contributions de l'angle (plus de 52%) et de la portée (plus de 40%) pour les blessés légers. Les autres métriques offrent des situations plus contrastées, l'augmentation de portée apparaissant comme le facteur le plus influent pour les tués et les blessés hospitalisés, même si l'augmentation d'angle conserve une petite influence.

Tableau 10: Résultats en configuration mono-capteur

	Global	Tués	Blessés Hospitalisés	Blessés Légers
<i>Position en X du Capteur</i>	0,02	0,14	0,02	0,55
<i>Position en Y du Capteur</i>	0,43	0,06	0,49	1,54
<i>Portée du Capteur</i>	75,38	91,59	72,9	40,01
<i>Angle du Capteur</i>	20,6	6,75	22,47	52,76
<i>Résidu</i>	3,57	1,46	4,12	5,14

Analyse d'efficacité

La figure 17 montre les champs de vision des différents systèmes en traits pointillés, à TTC=1s. Les piétons initialement masqués à la vue du système ou du conducteur par un obstacle ont été représentées par des carrés.

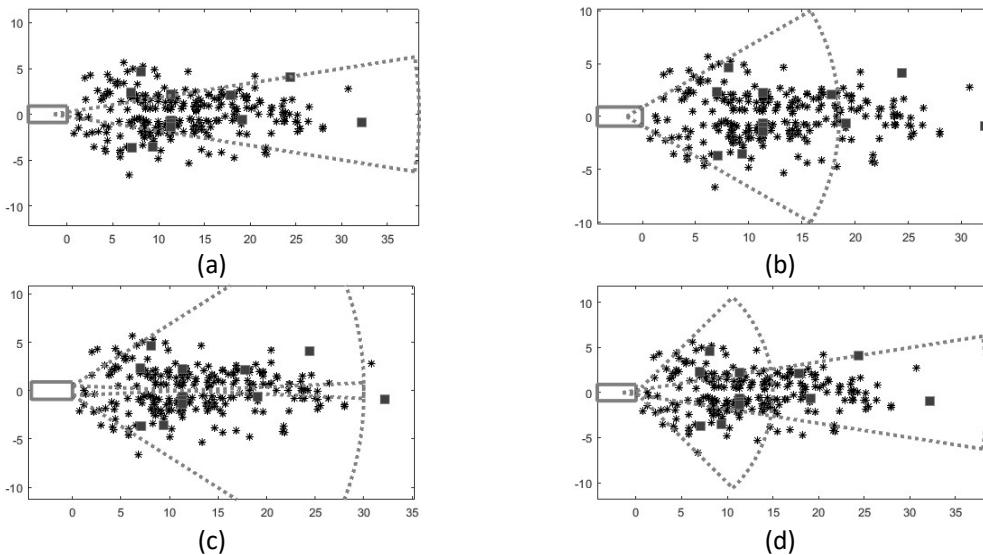


Figure 17 : Position des piétons par rapport au véhicule à TTC = 1 sec et champs de vision pour les configurations (a) angle étroit, (b) de référence, (c) bi- capteurs et (d) haut de gamme

La moyenne des vitesses d'impact est passée de 28.4 km/h (à l'origine) à des valeurs simulées de 18.3 km/h, 8.7 km/h, 9.5 km/h, et 8.4 km/h pour respectivement les configurations (a) *angle étroit*, (b) de *référence*, (c) *bi-capteurs* et (d) *haut de gamme* (Figure 18).

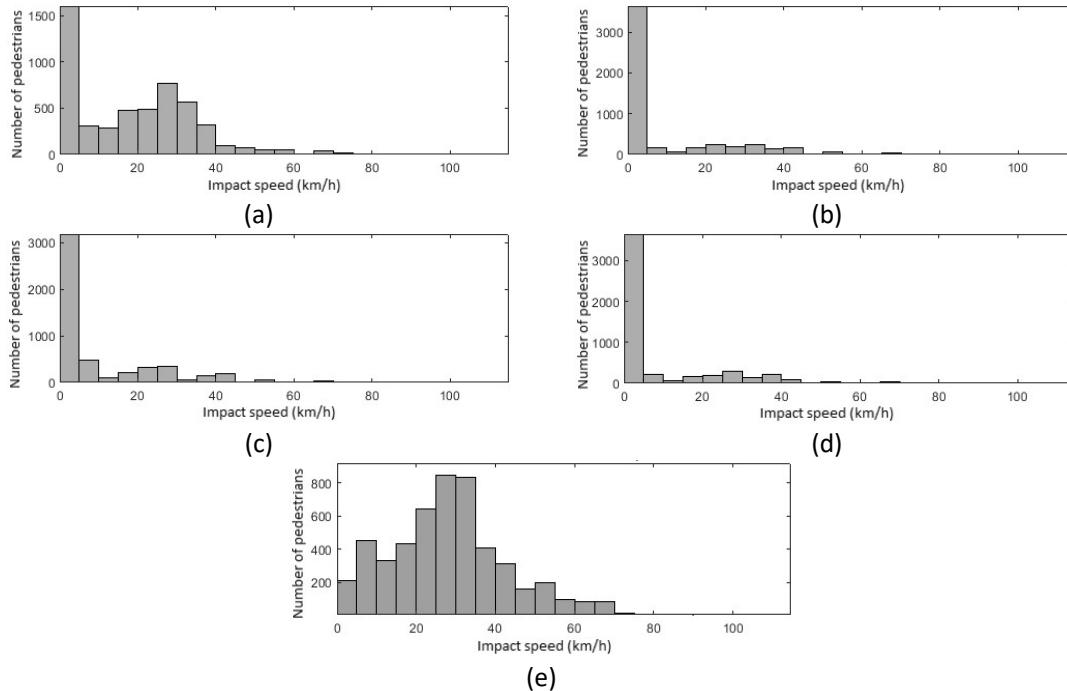


Figure 18: Distributions pondérées de vitesses d'impact d'origine (e) et simulées pour respectivement les configurations (a) angle étroit, (b) de référence, (c) bi-capteurs et (d) haut de gamme

Ces distributions de vitesses d'impact permettent les calculs d'efficacité de l'AEB-Piéton. Le tableau 11 donne les valeurs d'efficacité des quatre configurations d'AEB considérées tandis que la figure 19 donne les nombres de victimes piétons résiduelles.

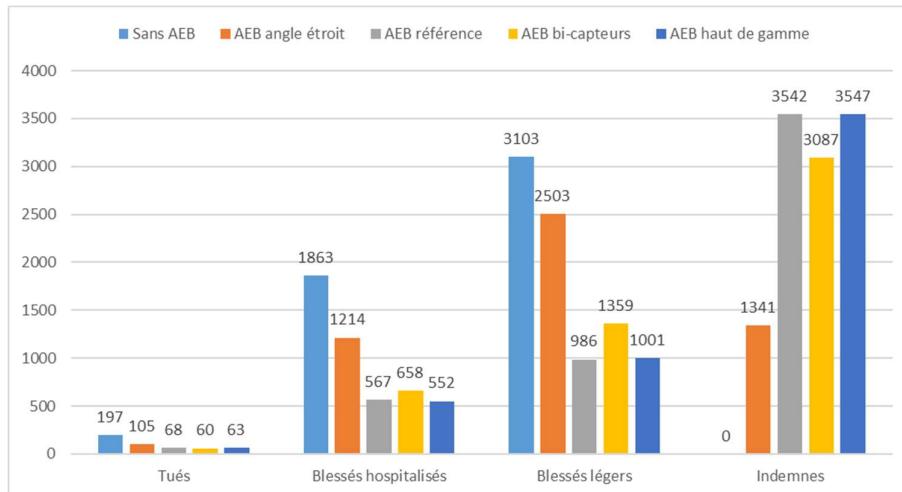


Figure 19: Distribution des victimes piétons résiduelles

Tableau 11: Efficacité des systèmes évalués

Niveau de Blessure	Angle étroit	Référence	Bi-capteurs	Haut de gamme
Tués	46%	65%	70%	68%
Blessés Hospitalisés	35%	70%	65%	70%
Blessés Légers	19%	68%	56%	68%

Exemple de lecture : 46% des tués sont évités avec la configuration « Angle étroit ». Les indemnes ne sont pas impactés par le véhicule (vitesse d'impact nulle car le véhicule s'est arrêté à temps ou a évité le piéton).

1.2.4 Discussion

La littérature scientifique contient de nombreuses références concernant l'efficacité de l'AEB Piéton [10], parmi lesquelles les références [5] à [9] se distinguent particulièrement. A la connaissance des auteurs, les références [5],[8] et [9] sont les seules qui puissent être comparées avec le travail exposé dans le présent document, la référence [7] n'ayant pas utilisé de courbes de risque, n'ayant évalué qu'une seule technologie et n'ayant pas cherché la représentativité de sa base d'accidents réels. Ce biais lié à la représentativité est aussi présent dans [6]. Le caractère original de la présente étude réside aussi dans la comparaison de diverses architectures d'AEB, ainsi que dans l'étude de sensibilité, réalisée en utilisant un plan d'expériences numérique.

L'étude de sensibilité présentée ici permet de classer les différents paramètres par ordre d'influence et par type de blessure piéton. Ce type d'analyse n'est présent dans aucune des études mentionnées ci-dessus, car leurs auteurs se sont contentés d'évaluer un petit nombre de configurations existantes ou réalistes. Cependant, les influences bénéfiques du freinage maximal, du TTC maximal, de la distance latérale maximale ou de l'angle capteur apparaissent dans toutes les études.

La valeur du freinage maximal exerce une influence forte pour toutes les métriques de réponse utilisées dans cette étude. Cela rappelle que l'AEB n'est pas une solution miracle en toutes circonstances et qu'il faut qu'il travaille en complément d'autres contremesures (par exemple l'évitement automatique d'urgence – AES) pour une efficacité optimale. La variabilité de ce facteur vient principalement des conditions de roulage – valeurs basses sur routes mouillées ou verglacées – même si les constructeurs peuvent les réguler pour plus de sécurité et de confort conducteur.

Les résultats obtenus dépendent fortement du nombre et des types de capteurs évalués. Le TTC maximal est influent dans l'une des configurations bi-capteurs et son influence augmente à mesure que le niveau de blessure étudié décroît. Ceci s'explique par le fait que les accidents mortels sont souvent liés à une apparition très tardive du piéton devant le véhicule. Augmenter la valeur du TTC maximal ou celle de la distance latérale maximale serait sans doute bénéfique pour le piéton mais entraînerait un nombre plus élevé de faux positifs ou de freinages intempestifs – provoquant des situations d'inconfort pour le conducteur ou une augmentation d'autres types d'accidents comme les collisions fronto-arrières entre véhicules. Les constructeurs sont donc également amenés à restreindre la variabilité sur ces facteurs.

Les résultats d'efficacité obtenus dans cette étude sont comparables à ceux trouvés dans la littérature, bien que des échantillons d'accidents et des courbes de risque différents aient été utilisés ici et que les systèmes comparés aient des paramètres qui ne se correspondent pas. Par exemple, lorsque l'on compare le système « à freinage maximal » de [13] (efficacité de 82 % sur les tués, de 76 % sur les tués et blessés graves) au système haut de gamme de cette étude, l'écart d'efficacité s'explique aisément par l'emploi dans [13] de valeurs élevées de variables système telles que le TTC maximale et la distance latérale maximale au piéton. En se concentrant sur différentes architectures de capteurs et en

définissant les paramètres restants sur des valeurs nominales optimistes, le nombre de capteurs semble avoir moins d'influence sur l'efficacité que la conception du champ de vision. En comparant les quatre systèmes illustrés dans cette étude, le système à angle étroit s'est avéré être, comme prévu, le système le moins efficace, en particulier pour les blessés légers et hospitalisés pour lesquels son efficacité est vraiment faible par rapport aux autres systèmes. Ceci est corroboré par la figure 3 (a), qui montre que de nombreux piétons qui se trouvent à une faible distance longitudinale du véhicule à $TTC = 1$ s (cas de faible vitesse du véhicule) ne sont pas détectés à $TTC = 1$ s. Inversement, de nombreux piétons qui se trouvent à une distance longitudinale élevée du véhicule à $TTC = 1$ s (cas de vitesse élevée du véhicule) sont détectés en raison de la portée élevée du champ de vision de ce système. Les résultats montrent également que les réglages optimisés d'un seul capteur, par exemple le système de référence, donnent des résultats très comparables en termes d'efficacité par rapport aux réglages de plusieurs capteurs combinant des capteurs à courte et à longue portée. Le fait que le système haut de gamme utilise un capteur à grand angle de vue n'améliore pas son efficacité sur les blessés hospitalisés et légers. Le système bi-capteur frontaux est également moins efficace sur les blessés légers que le système de référence. Cela pourrait être lié au fait que des piétons se trouvent près du milieu de l'avant de la voiture et sont donc trop proches pour une détection complète par l'un ou l'autre des deux capteurs de la configuration à deux capteurs frontaux.

Les auteurs rappellent que cette étude n'a pas pris en compte les éventuels effets secondaires non désirés des AEB. Des exemples de ceux-ci incluent plus de collisions fronto-arrières causées par un freinage AEB inattendu (en particulier en cas de freinage d'urgence intempestif) et une confiance excessive du conducteur dans des systèmes qui ne sont pas efficaces à 100 % dans toutes les situations critiques.

1.2.5 Conclusions

Cette étude évalue l'efficacité des systèmes AEB-Piéton à partir de situations accidentelles réelles sélectionnées dans une base de données d'accidents représentative de la France. Elle montre que les systèmes AEB-Piéton ont un bon potentiel de réduction des blessures car leur efficacité varie de 46 % à 70 % pour les tués, de 35 % à 70 % pour les blessés hospitalisés et de 19 % à 68 % pour les blessés légers. Cependant, il est important de mentionner que cette analyse prospective utilise un modèle AEB "nominal" supposant un fonctionnement parfait du système dans toutes les situations (capteurs qui fonctionnent dans toutes les conditions d'éclairage, force de freinage qui ne dépend pas des conditions de la route, etc.). Une liste de problèmes potentiels pouvant réduire l'efficacité de l'AEB est donnée dans [20]. Ainsi, les valeurs d'efficacité données dans cette étude doivent être interprétées comme un **potentiel maximal** (sans doute **inatteignable**) des systèmes AEB-Piéton.

Les avantages pour la sécurité routière de l'utilisation de plusieurs combinaisons de capteurs au lieu d'un seul capteur optimisé n'ont pas pu être déterminés. Les capteurs à longue portée / faible angle de vue sont largement utilisés dans l'industrie en raison de leur rentabilité, car ils peuvent être utilisés pour une variété de systèmes avancés d'aide à la conduite, comme le maintien dans la voie ou le régulateur de vitesse adaptatif. Le présent travail montre que ce type de capteur permet une réduction modérée du nombre de blessures mortelles chez les piétons alors que son efficacité pour éviter ou atténuer les blessures non mortelles reste faible.

Les résultats de l'analyse de sensibilité ont permis de classer les facteurs les plus influents par type de blessure chez les piétons. Certains d'entre eux dépendent presque uniquement de l'état de la route, d'autres exercent une influence sur le confort du conducteur et doivent être soigneusement réglés.

Ceci rappelle que l’AEB ne peut à lui seul éviter tous les accidents dans toutes les configurations et qu'il doit être complété par d'autres systèmes de sécurité active ou passive pour une meilleure efficacité. Rappelons également que l'analyse présentée dans ce chapitre ne traite que des accidents impliquant un véhicule particulier et un piéton, avec de surcroit certaines exclusions (voir section 1.2.2). Pour fixer les idées, la mortalité piéton décomposée par type d'adverse est donnée par la figure 20.

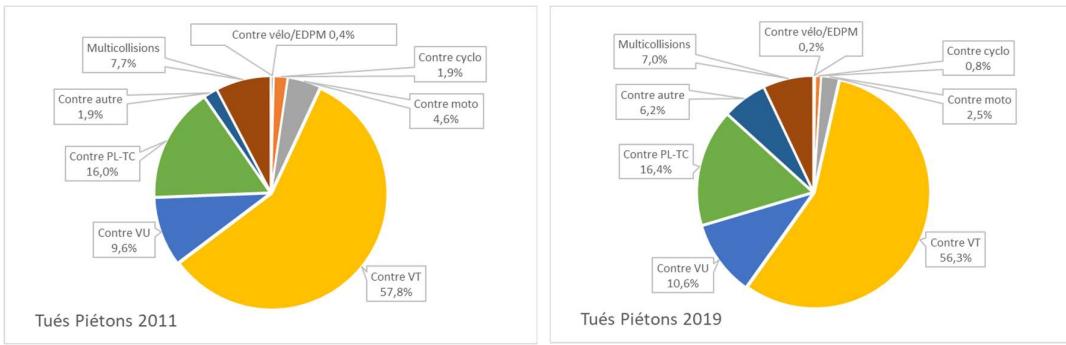


Figure 20 : Mortalité Piéton par type d'adverse en France (2011 [21], 2019 [22])

Le potentiel maximal de réduction du nombre de tués piéton par les AEB considérés dans notre étude serait ainsi de l'ordre de 27% des piétons tués (en supposant une efficacité de 70%) et ceci en supposant de surcroit l'ensemble du parc de véhicules particuliers équipé d'une fonction AEB idéalisée.

1.2.6 Références

- [1] World Health Organization, “Global status report on road safety 2018” Internet: http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2018/en/, Acc. March 2019.
- [2] European Road Safety Observatory, “Traffic Safety Basic Facts 2018” Internet: http://ec.europa.eu/transport/road_safety/sites/roadsafety/files/pdf/statistics/dacota/bfs2018_infographics.pdf, Acc. March 2019.
- [3] European Road Safety Observatory, “Annual Accident Report 2018” Internet: http://ec.europa.eu/transport/road_safety/sites/roadsafety/files/pdf/statistics/dacota/asr2018.pdf, Acc. March 2019.
- [4] Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière (ONISR), “La sécurité routière en France, Bilan de l'accidentalité de l'année 2017”, Internet: <https://www.onisr.securite-routiere.interieur.gouv.fr/contenus/sites/default/files/2019-02/Bilan%202017%20de%20la%20s%C3%A9curit%C3%A9%20routi%C3%A8re%20avec%20couverture.pdf>, Acc. March 2019.
- [5] Edwards M, Nathanson A, Wisch M. 2014. “Estimate of Potential Benefit for Europe of Fitting Autonomous Emergency Braking (AEB) Systems for Pedestrian Protection to Passenger Cars”. *Traffic Injury Prevention*, Volume 15: pp.173–182.
- [6] Lindman M. et al. 2010. “Benefit Estimation Model for Pedestrian Auto Brake Functionality.” *Proceedings of 4th Expert Symposium on Accident Research (ESAR)*, 2010, Hanover (Germany).
- [7] Paez FJ et al. 2015. “Benefits Assessment of Autonomous Emergency Braking Pedestrian Systems Based on Real World Accidents Reconstruction.” *Proceedings of 24th ESV Conference*, Gothenburg (Sweden).
- [8] Rosén E. 2013. “Autonomous Emergency Braking for Vulnerable Road Users.” *Proceedings of the International Research Council on the Biomechanics of Injury (IRCOBI) Conference*, Gothenburg (Sweden).

- [9] Rosén E. et al. 2010. "Pedestrian Injury Mitigation by Autonomous Braking." *Accident Analysis and Prevention*, **Volume 42** (issue 6): pp.1949–57.
- [10] Saadé J. 2017. "Autonomous Emergency Braking AEB (pedestrians & cyclists)". European Road Safety Support System developed by the H2020 project SafetyCube. Internet: https://www.roadsafety-dss.eu/assets/data/pdf/synopses/Autonomous_Emergency_Braking_AEB_pedestrians_cyclists_2_0112017.pdf, Acc. March 2019.
- [11] Lesire P. et al. 2015. "Implication of children in road accidents in France in 2011." *Proceedings of 24th ESV Conference*, Gothenburg (Sweden).
- [12] Amoros E, Lardy A, Martin JL, Wu D, Viallon V. 2015. "Méthodologie redressement et extrapolation." L3 Deliverable VOIESUR Project. ANR-11-VPTT-0007. Internet: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01212490v2/>, Acc. March 2019.
- [13] Cuny S. et al. 2018. "A Tool to Assess Pedestrian Safety: Risk Curves by Injury Severity and their Confidence Intervals for Car-to-Pedestrian Front Collision." *Proceedings of the International Research Council on the Biomechanics of Injury (IRCOBI) Conference, 2018, Athens (Greece)*.
- [14] Efron B, Tibshirani RJ. 1986. "Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measures of statistical accuracy." *Statistical Science*, **Volume 1** (issue 1): pp.54-77
- [15] Rau, H., Otte, D., Schulz, B. 2000. "Pkw-Fußgänger Kollisionen im hohen Geschwindigkeitsbereich - Ergebnisse von Dummyversuchen mit Kollisionsgeschwindigkeiten zwischen 70 und 90 km/h". *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, **Volume 12**: pp.341–350.
- [16] Toor, A. Araszewski, M. 2003. "Theoretical vs. Empirical Solutions for Vehicle/Pedestrian Collisions." *SAE Technical Paper 2003-01-0883*
- [17] Fugger, T. et al. 2000. "Comparison of pedestrian accident reconstruction models to experimental test data for wrap trajectories." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,, London (UK)*.
- [18] Karna K, Sahai R. 2012. "An Overview on Taguchi Method". *International Journal of Engineering and Mathematical Sciences*, **Volume 1**: pp.11-18.
- [19] Martin O. et al. "Economic evaluation of vehicle related measures". Deliverable 6.3 of H2020 project SafetyCube. Internet: <https://www.safetycube-project.eu/wp-content/uploads/SafetyCube-D6.3-EconomicEvaluationOfVehicleRelatedMeasures.pdf>, Acc. February 2019.
- [20] Kinoshita Y. 2018. "Analysis of the results of reducing rear-end collision accidents via AEB." *ITARDA 21st Workshop Report*. Internet: www.itarda.or.jp/ws/pdf/english/h30/21_01aeb_e.pdf, Acc. June 2019.
- [21] Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière (ONISR), "La sécurité routière en France, Bilan de l'accidentalité de l'année 2011", Internet: <https://www.onisr.securite-routiere.gouv.fr/sites/default/files/2019-03/Bilan%2Bde%2Bla%2Bs%C3%A9curit%C3%A9%2Brouti%C3%A8re%2B2011.pdf>, May 2022.
- [22] Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière (ONISR), "La sécurité routière en France, Bilan de l'accidentalité de l'année 2019", Internet: https://www.onisr.securite-routiere.gouv.fr/sites/default/files/2020-09/Bilan_2019_version_site_internet_24_sept.pdf, May 2022.
- [23] Saadé J. et al. 2019. "Prospective evaluation of the Effectiveness of Autonomous Emergency Braking Systems in Increasing Pedestrian Safety in France" . . ." *Proceedings of the International Research Council on the Biomechanics of Injury (IRCOBI) Conference, 2019, Florence (Italy)*.

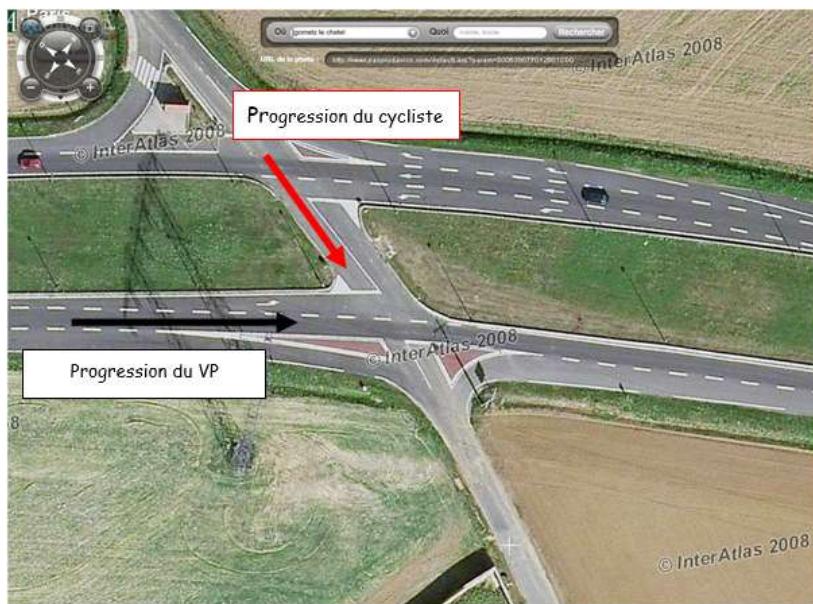
2 INTERACTIONS VÉHICULE AUTONOME-CYCLISTES

2.1 Études détaillées d'accident

Interaction en intersection

Il s'agit d'un accident mettant en cause un véhicule particulier conduit par un homme de 19 ans et un cycliste de 68 ans. Le choc s'est produit en intersection. Le cycliste se présente à un stop qu'il franchit sans s'arrêter. Il est violemment percuté par le véhicule qui malgré un freinage et un évitement par la droite ne peut éviter le choc. La vitesse maximum autorisée sur les lieux de l'accident est de 70 km/h. Le cycliste décède peu de temps après l'impact.

Nous avons constaté que dans la progression du cycliste, il y avait sans doute une incompréhension de sa part concernant le franchissant de ce stop. Même s'il est avéré que le cycliste n'a pas marqué le stop, la configuration de l'infrastructure a peut-être contribué à la genèse de cet accident. En effet en nous plaçant à la place du cycliste, lorsque nous sommes arrêtés au stop, nous avons une voie de tourne à gauche et ensuite la voie de progression du véhicule particulier. Plusieurs accidents sont à déplorer sur cette intersection, destinée à être remplacée par un rond-point.



2.2 Simulation de l'efficacité du freinage automatisé (AEB)

2.2.1 Introduction

Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS 2019), environ 3% des 1,35 million de tués sur la route annuels sont des cyclistes. En 2016, 2 064 cyclistes ont été tués sur les routes de l'Union européenne (UE), soit un total de 8 % (contre 6 % en 2006) de tous les décès sur les routes de l'UE, les Pays-Bas affichant la plus forte proportion de cyclistes (30 %) parmi les décès sur les routes. Les décès de cyclistes dans l'UE ont diminué de 24 % entre 2006 et 2016, mais le taux de réduction pour la plupart des groupes d'usagers de la route est bien plus élevé (ERSO 2018) et aucun progrès significatif n'a été réalisé depuis 2010. Cette tendance est également observée en France, où 173 décès de cyclistes ont

été enregistrés en 2017 (ONISR 2018), soit une augmentation de 6,8 % par rapport à 2016 et de 22 % par rapport à 2011.

Pour augmenter la sécurité des cyclistes, une solution consiste à équiper les voitures de systèmes avancés d'assistance à la conduite (ADAS). Le freinage d'urgence autonome pour cyclistes (AEB-Cycliste) est l'un de ceux-ci et il peut soit éviter les accidents, soit atténuer leurs conséquences, en appliquant automatiquement les freins du véhicule. Selon la définition technique, le système peut avertir le conducteur et n'appliquer les freins que dans le cas où il ne réagit pas.

La littérature scientifique ne contient qu'une poignée d'études portant sur l'efficacité de l'AEB-Cycliste (Saadé 2017). Une seule (Rosén 2013) fournit des résultats prospectifs, utilisant des courbes de risque de blessures mortelles et mortelles ou graves, sur la base d'un échantillon d'accidents issus de la base de données allemande GIDAS. En combinant les réductions de vitesse dues à l'AEB-Cycliste et les courbes de risque de blessure, l'auteur a évalué l'efficacité d'un éventail de solutions techniques.

Dans la présente étude, un ensemble complet de courbes de risque de blessures permettant d'évaluer l'efficacité de l'AEB-Cycliste en termes de vies sauvées et de blessures atténuées a été construit à partir de données d'accidents françaises. Ces courbes de risque de blessure ont été utilisées en combinaison avec des re-simulations d'accidents à l'aide d'un modèle cinématique de voiture auquel des capteurs d'AEB-Cycliste avec des stratégies de détection et de freinage réalistes ont été adaptés. Des métriques synthétisant l'efficacité ont été construites et utilisées dans un plan d'expérience numérique basé sur des matrices de Taguchi, ce qui a permis de mettre en évidence les paramètres de conception critiques de l'AEB-Cycliste au moyen d'une analyse de variance.

2.2.2 Méthode

Principes généraux

Le processus d'évaluation de l'efficacité par simulation présenté ici comprend quatre étapes :

Étape 1 : Sélection des accidents pertinents à l'AEB-Cycliste (accidents véhicule particulier-cycliste, frontaux pour le véhicule particulier). Ceux-ci sont extraits d'une base de données d'accidents française représentative.

Étape 2 : Utilisation des données de l'étape 1 pour créer des courbes de risque de blessures mortelles, graves et légères en fonction de la vitesse d'impact.

Étape 3 : Utilisation d'un outil de simulation pour calculer la nouvelle vitesse d'impact (virtuelle) pour chaque cas d'accident de l'étape 1, si la voiture impactante avait été équipée d'AEB-Cycliste. Le modèle de simulation comprend :

- Une dynamique de véhicule simple (masse ponctuelle) pour le véhicule et le cycliste
 - Des modèles simples de l'environnement, tels que les obstacles à la visibilité
 - Un algorithme de détection et d'action basés sur le temps (TTC) et la distance (DTC) avant collision.
- et utilise les caractéristiques du capteur AEB-Cycliste définies par l'utilisateur.

Étape 4 : Combinaison de la distribution virtuelle de vitesse d'impact de l'étape 3 avec les courbes de risque de blessure de l'étape 2 pour calculer le nombre de tués et de blessés graves et légers résiduels après application de l'AEB-Cycliste

Les résultats de l'étape 4 peuvent être comparés aux résultats d'origine, afin d'évaluer l'efficacité de l'AEB-Cycliste. Cela permet en retour de mettre en évidence l'influence des caractéristiques de conception de l'AEB-Cycliste sur son efficacité, à travers une analyse de sensibilité.

Données d'entrée

La base de données VOIESUR (Lesire et al. 2015) - voir aussi section 1.2.2 - a été utilisée. Les cas pertinents à l'AEB-Cycliste (collisions frontales pour le VP) ont été sélectionnés parmi les accidents impliquant un véhicule particulier et un cycliste. Ont été exclus les pertes de contrôle véhicule avant la collision, les glissements latéraux ou les impacts latéraux et les voitures rebondissant après un premier impact.

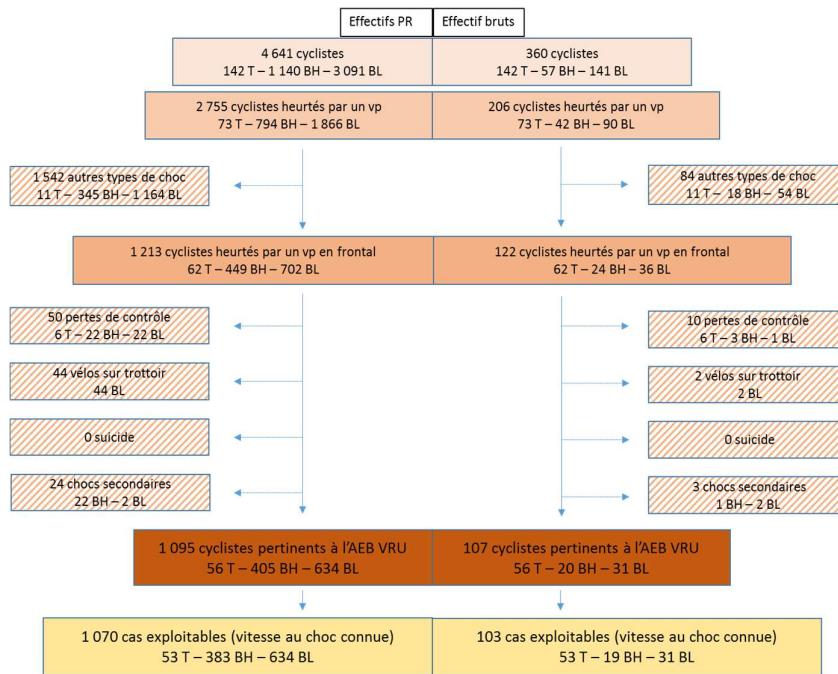


Figure 21: Processus de sélection des cas pertinents

L'échantillon final de cas pertinents d'AEB-Cycliste se compose de 101 accidents impliquant 103 cyclistes. Lorsqu'ils sont pondérés, ces cas représentent 1070 cyclistes blessés dont 53 mortellement, 383 gravement et 634 légèrement. La gravité des blessures est celle attribuée par la police, et n'est pas liée à un codage AIS. Les tués décèdent dans les 30 jours suivant l'accident, les blessés graves restent hospitalisés plus de 24h et les blessés légers restent hospitalisés moins de 24h ou pas du tout.

Courbes de risque

L'évaluation de l'efficacité de l'AEB-Cycliste implique l'évaluation de l'atténuation des blessures ainsi que celle de la prévention des accidents. Cela nécessite des courbes de risque de blessures pour les niveaux de blessures mortelles, graves et légères (tels que définis dans la section « Données d'entrée »). Ainsi, une régression polytomique a été utilisée à la place d'une régression binaire (Cuny et al. 2018). Une régression log-log polytomique complémentaire (CLOGLOG) utilisant la vitesse d'impact au carré comme variable indépendante a été utilisée pour construire les courbes de risque de blessure. Leurs intervalles de confiance ont été estimés à l'aide d'une méthodologie de bootstrap (Efron et Tibshirani 1986).

Reconstruction des accidents

Les derniers mètres des trajectoires des véhicules avant l'accident ont été modélisés, remontant aussi loin dans le temps que les données disponibles le permettaient, et les types de trajectoires ont été limités à des portions de cercles ou de lignes droites. L'accélération ou la décélération de la voiture en phase de pré-collision a été supposée constante. L'évaluation des vitesses de pré-collision des cyclistes, rarement enregistrées, a été réalisée à partir d'estimations issues d'études naturalistiques (Schleinitz et al. 2017) donnant des vitesses de cyclistes par groupe d'âge, contexte et type de route.

Finalement, les vitesses et les angles d'impact, les vitesses initiales et les accélérations/décélérations possibles avant la collision, les rayons de courbure de la trajectoire et si la voiture tournait à droite, à gauche ou restait en ligne droite, ont été reconstruits pour tous les accidents pertinents. Les obstacles à la visibilité (fixes ou non) ont également été codés.

Simulation du système AEB-Cycliste

Dans le but de simuler la réponse des véhicules équipés d'AEB-Cycliste dans des situations accidentielles réelles et de comparer les résultats simulés et réels, un outil de simulation a été développé dans Matlab.

Les entrées de cet outil sont :

1. Scénarios d'accidents décrits par les trajectoires des véhicules et des cyclistes au cours d'une durée (TTC maximal) définie par l'utilisateur.
2. Caractéristiques du capteur telles que portée, angle de vision, limites latérales du champ de vision, position longitudinale et latérale sur le véhicule, délai de détection, type de détection du cycliste (« complet » ou « partiel »).
3. Caractéristiques du freinage telles que délai de transmission, valeur maximale de freinage et la pente de montée en freinage.

Les sorties de cet outil sont :

1. Trajectoires des véhicules et des cyclistes. Celles-ci sont déterminés à l'aide d'un modèle de véhicule qui calcule la réponse cinématique à l'entrée du contrôleur AEB-Cycliste, qui à son tour dépend du profil de freinage.
2. TTC à la détection du cycliste par le système AEB-Cycliste.

3. Répartition des vitesses d'impact (d'origine et avec AEB-Cycliste). Les cas où le véhicule traverse la trajectoire du cycliste sans impact et les cas où le véhicule s'arrête avant de traverser la trajectoire du cycliste ont été distingués – bien que les deux types se voient attribuer une vitesse d'impact nulle.
4. Distribution des niveaux de gravité (fatales, blessés hospitalisés et légers) à la fois originales et avec AEB-Cycliste.

Pour que le freinage soit déclenché, toutes les conditions suivantes doivent être remplies.

- a. Le cycliste est entièrement resté dans le champ de vision du capteur pendant une durée de détection et de suivi (défini par l'utilisateur).
- b. La distance latérale du cycliste, par rapport à la direction de déplacement du véhicule, a été inférieure à une distance (définie par l'utilisateur) pendant toute la durée de détection.
- c. Le temps restant avant collision (TTC) instantané est inférieur au TTC maximal (défini par l'utilisateur).
- d. La distance instantanée jusqu'à la collision (DTC) du véhicule est inférieure au seuil (défini par l'utilisateur).

Une fois la « décision » de freiner prise, le freinage démarre après un délai de transmission d'informations (défini par l'utilisateur). La valeur de freinage maximale définie par l'utilisateur (décélération maximale en m/s²) est alors atteinte après une durée de montée linéaire en freinage (définie par l'utilisateur). La chronologie complète du freinage est illustrée à la figure 15 et est similaire à ce qui a été utilisé dans (Rosén 2013) - la principale différence étant que, dans le contexte de la présente étude, les manœuvres de freinage pré-collision des conducteurs d'origine (le cas échéant) ont été combinées - non remplacées – avec les freinages de l'AEB-Cycliste, afin de rendre les simulations plus réalistes.

Calcul d'efficacité

L'évaluation de l'efficacité de l'AEB-Cycliste consiste à comparer les conséquences de la population originale d'accidents aux conséquences de leur simulation avec AEB-Cycliste en fonctionnement. Une métrique possible pour cela est :

$$E_{inj} = 100 * \frac{N_{injini} - N_{injAEB}}{N_{injini}} \quad (1)$$

avec E_{inj} l'efficacité pour un niveau de gravité de blessure donné, N_{injini} le nombre initial de cyclistes à ce niveau de gravité de blessure, et N_{injAEB} le nombre de cyclistes restant à ce niveau de gravité de blessure après simulation.

L'évaluation du nombre prévu de victimes repose sur la combinaison des courbes de risque de blessure avec les distributions de vitesse d'impact, à la fois pour la population d'accidents d'origine et la population resimulée. Seuls ces derniers peuvent inclure des accidents évités, entraînant une vitesse d'impact de « 0 km/h » et une probabilité de blessure nulle.

Pour chaque accident individuel, une probabilité de blessure est calculée en utilisant les courbes de risque de blessure et la nouvelle vitesse d'impact simulée (avec AEB-Cycliste). Cette probabilité est

ensuite multipliée par le poids statistique du cycliste et la somme de ces produits donne le nombre de tués ou de blessés résultant des nouvelles vitesses d'impact.

Configurations évaluées

Trois configurations de système ont été évaluées dans cette étude, ne différant que par le nombre, l'angle et la portée de leurs capteurs. Ils sont appelés système « angle étroit » (angle total : 18° et portée : 40 m), système « référence » (60°, 20 m) et système « haut de gamme » (90°, 30 m et 20°, 70 m) dans la suite de cette section. Pour le système « haut de gamme », un cycliste était considéré comme détecté s'il se trouvait entièrement dans le champ de vision de *l'un* des capteurs. Pour les trois systèmes, le délai de détection a été fixé à 0,2 s, le délai de transmission à 0,05 s, le TTC maximal à 1 s, le DTC maximal à 15 m et la distance latérale maximale à 2 m. La décélération maximale a été fixée à 0,9 g, à atteindre linéairement sur un délai de freinage complet de 0,3 s.

Analyse de sensibilité

Le principe est le même que celui développé à la section 1.2.2. (voir Karna 2012).

Facteurs : Deux analyses de sensibilité ont été réalisées, l'une en configuration deux capteurs (un capteur Longue Portée / Angle Etroit, un capteur Faible Portée / Angle Large) l'autre en configuration un seul capteur.

Dans l'analyse de la configuration à deux capteurs, les facteurs (13) et les valeurs possibles (3 pour chaque facteur) étaient :

- Capteur Longue Portée :
 - Position Longitudinale (m): 0, -1 et -1.3
 - Délai de détection (s): 0.1, 0.2 et 0.3
 - Portée (m): 60, 100 et 140
 - Angle (degrés): 20, 30 et 40
- Capteur Courte Portée :
 - Délai de détection (s): 0.1, 0.2 et 0.3
 - Portée (m): 10, 30 et 50
 - Angle (degrés) : 40, 60 et 90
- Délai de mise en freinage (s) : 0.1, 0.15 et 0.2
- Valeur de Freinage Maximal (m/s^2) : 4, 7 et 9.8
- Temps de Montée en Freinage (s) : 0.1, 0.2 et 0.3
- Distance Latérale Maximale (m) : 1, 2 et 5
- DTC Maximale (m) : 10, 20 et 30
- TTC Maximal (s) : 0.8, 1 et 1.5

Dans l'analyse à un seul capteur, les facteurs (4) et leurs valeurs possibles (3 pour chaque facteur) étaient :

- Capteur Seul :
 - Position Longitudinale (m) : 0, -1 et -1.3
 - Position Latérale (m) : -0.7, 0 et 0.7
 - Portée (m) : 10, 60 et 110
 - Angle (degrés) : 20, 60 and 90

Les autres paramètres (7) étant alloués à des valeurs fixes (tableau 12).

Facteurs	TTC Maximal	Délai de Détection	Distance Latérale Maximale	Délai de mise en freinage	Valeur de Freinage Maximal	Temps de Montée en Freinage	DTC Maximale
Value	1	0.2	2	0.05	9	0.3	15

Tableau 12: Paramètres utilisés

L'équation (2) donne le nombre minimal (N) d'expériences numériques requises par la méthode de Taguchi si N_f est le nombre de facteurs avec L_i niveaux possibles :

$$N = 1 + \sum_{i=1}^{N_f} (L_i - 1) \quad (2)$$

L36 – une matrice de 36 expériences, l'équation (2) donnant un minimum de 27 – a été choisie pour les deux configurations de capteurs. Le tableau 13 illustre le plan d'expérience deux capteurs.

Facteurs	Position Longitudinale du Capteur Longue Portée	TTC Maximal	Délai de détection du Capteur Longue Portée	Délai de détection du Capteur Courte Portée	Distance Latérale Maximale	Délai de Mise en Freinage	Valeur de Freinage Maximal	Temps de Montée en Freinage	Portée du Capteur Longue Portée	Portée du Capteur Courte Portée	Angle du Capteur Longue Portée	Angle du Capteur Courte Portée	DTC Maximale
1	0	0.8	0.1	0.1	1	0.1	4	0.1	60	10	20	40	10
2	0	1	0.2	0.2	2	0.15	7	0.2	100	30	30	60	20
3	0	1.5	0.3	0.3	5	0.2	9.8	0.3	140	50	40	90	30
4	0	0.8	0.1	0.1	1	0.15	7	0.2	100	50	40	90	30
5	0	1	0.2	0.2	2	0.2	9.8	0.3	140	10	20	40	10
6	0	1.5	0.3	0.3	5	0.1	4	0.1	60	30	30	60	20
7	0	0.8	0.1	0.2	5	0.1	7	0.3	140	10	30	60	30
8	0	1	0.2	0.3	1	0.15	9.8	0.1	60	30	40	90	10
9	0	1.5	0.3	0.1	2	0.2	4	0.2	100	50	20	40	20
10	0	0.8	0.1	0.3	2	0.1	9.8	0.2	140	30	20	90	20
11	0	1	0.2	0.1	5	0.15	4	0.3	60	50	30	40	30
12	0	1.5	0.3	0.2	1	0.2	7	0.1	100	10	40	60	10
13	-1	0.8	0.2	0.3	1	0.2	7	0.1	140	50	30	40	20
14	-1	1	0.3	0.1	2	0.1	9.8	0.2	60	10	40	60	30
15	-1	1.5	0.1	0.2	5	0.15	4	0.3	100	30	20	90	10
16	-1	0.8	0.2	0.3	2	0.1	4	0.3	100	50	40	60	10
17	-1	1	0.3	0.1	5	0.15	7	0.1	140	10	20	90	20
18	-1	1.5	0.1	0.2	1	0.2	9.8	0.2	60	30	30	40	30
19	-1	0.8	0.2	0.1	5	0.2	9.8	0.1	100	30	20	60	30
20	-1	1	0.3	0.2	1	0.1	4	0.2	140	50	30	90	10
21	-1	1.5	0.1	0.3	2	0.15	7	0.3	60	10	40	40	20

22	-1	0.8	0.2	0.2	5	0.2	4	0.2	60	10	40	90	20
23	-1	1	0.3	0.3	1	0.1	7	0.3	100	30	20	40	30
24	-1	1.5	0.1	0.1	2	0.15	9.8	0.1	140	50	30	60	10
25	-1.3	0.8	0.3	0.2	1	0.15	9.8	0.3	60	50	20	60	20
26	-1.3	1	0.1	0.3	2	0.2	4	0.1	100	10	30	90	30
27	-1.3	1.5	0.2	0.1	5	0.1	7	0.2	140	30	40	40	10
28	-1.3	0.8	0.3	0.2	2	0.15	4	0.1	140	30	40	40	30
29	-1.3	1	0.1	0.3	5	0.2	7	0.2	60	50	20	60	10
30	-1.3	1.5	0.2	0.1	1	0.1	9.8	0.3	100	10	30	90	20
31	-1.3	0.8	0.3	0.3	5	0.15	9.8	0.2	100	10	30	40	10
32	-1.3	1	0.1	0.1	1	0.2	4	0.3	140	30	40	60	20
33	-1.3	1.5	0.2	0.2	2	0.1	7	0.1	60	50	20	90	30
34	-1.3	0.8	0.3	0.1	2	0.2	7	0.3	60	30	30	90	10
35	-1.3	1	0.1	0.2	5	0.1	9.8	0.1	100	50	40	40	20
36	-1.3	1.5	0.2	0.3	1	0.15	4	0.2	140	10	20	60	30

Tableau 13: Plan d'expériences en configuration deux capteurs

Réponses Les métriques de réponse sont les mêmes qu'à la section 1.2.2.

Contributions des facteurs - Les formules utilisées sont les mêmes que celles de la section 1.2.2. Nous ne les reprenons pas ici.

2.2.3 Résultats

Courbes de risque

Les équations finales donnant les probabilités pour le cycliste d'être tué (équation (8)) et tué ou blessé hospitalisé (équation (9)) – sont les suivantes :

$$P(K) = 1 - \exp(-\exp(-4.6998 + 0.000799 * \text{vitesse_au_choc}^2)) \quad (8)$$

$$P(KSI) = 1 - \exp(-\exp(-1.6296 + 0.000799 * \text{vitesse_au_choc}^2)) \quad (9)$$

où *vitesse_au_choc* est la vitesse au choc (ou vitesse d'impact) du véhicule, en km/h. Une courbe de risque pour les blessés hospitalisés a été créée en soustrayant l'équation (9) de l'équation (8), et une courbe de risque pour les blessés légers en soustrayant l'équation (9) de la constante 1. Les trois courbes de risque et leurs courbes IC 95% sont représentées Figure 22.

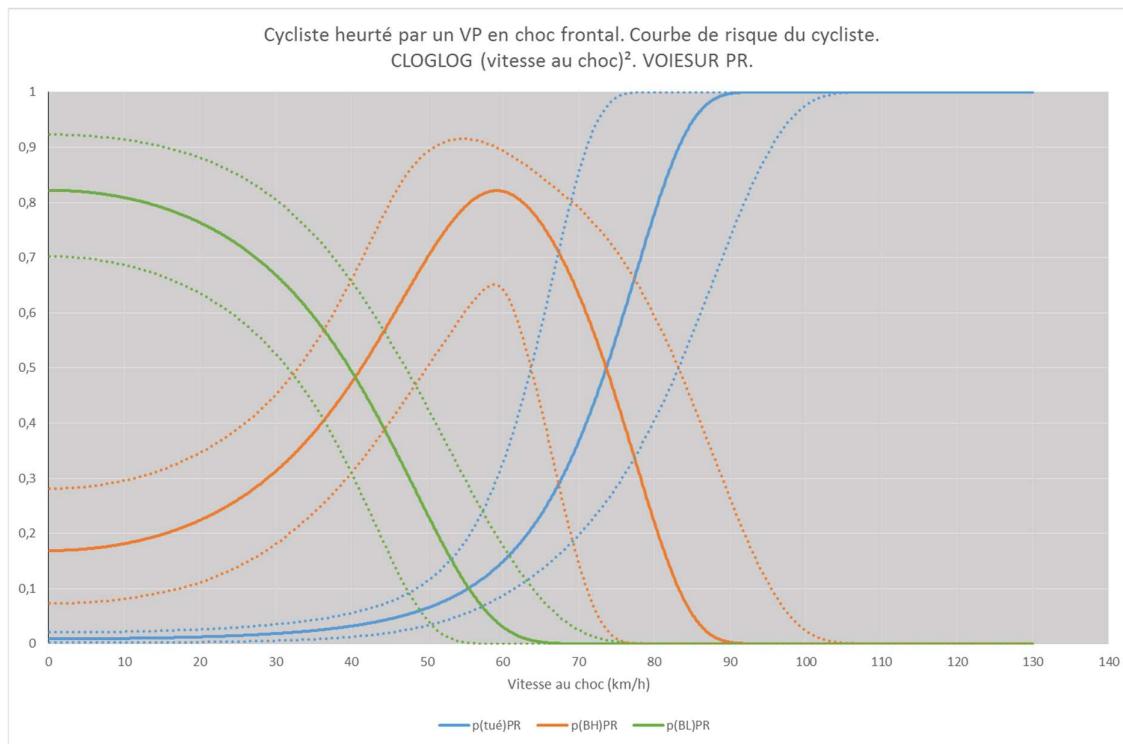


Figure 22: Courbes de risque cycliste

Analyse d'efficacité

L'une des sorties de l'outil de simulation est le positionnement des cyclistes dans un repère lié au véhicule, illustré par la figure 23.

On y trouve le véhicule (rectangle en trait épais), le champ de vision du capteur (lignes et arc de cercle en pointillé) et les positions de l'échantillon complet des cyclistes (103 cyclistes) à TTC = 1 sec. Les astérisques – masqués par des carrés lorsque le cycliste est caché par un masque à la visibilité – correspondent à l'avant du vélo (dans le sens de marche).

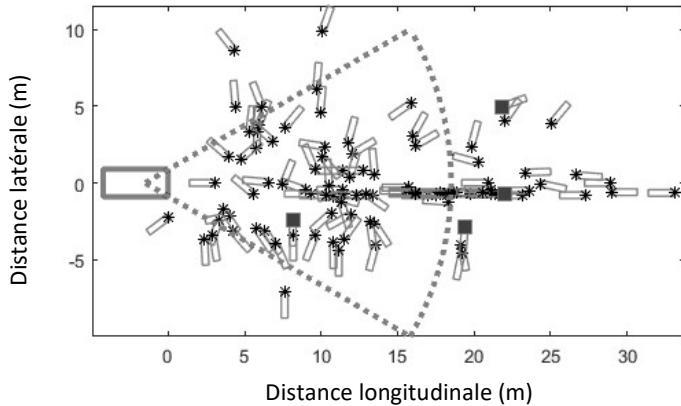


Figure 23: Champ de vision de référence et positions relatives à TTC=1s

A TTC=1s, on peut ainsi visualiser le fait que 90% de notre échantillon brut se trouve dans un cône de demi-angle 30° degrés et de portée 40 m, avec une origine en haut de pare-brise. Mais ce n'est qu'une analyse de tout premier niveau.

En ce qui concerne les vitesses d'impact véhicule avant et après simulation, la moyenne de l'échantillon original pondéré est passée de 31 km/h à 26 km/h, 16 km/h et 14 km/h respectivement après simulation des systèmes « angle étroit », « référence » et « haut de gamme ».

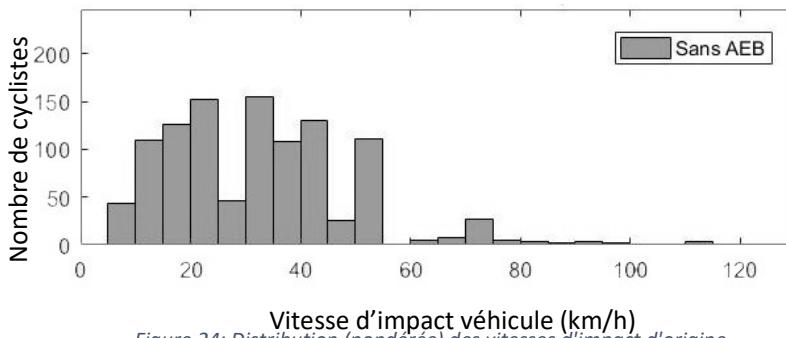


Figure 24: Distribution (pondérée) des vitesses d'impact d'origine

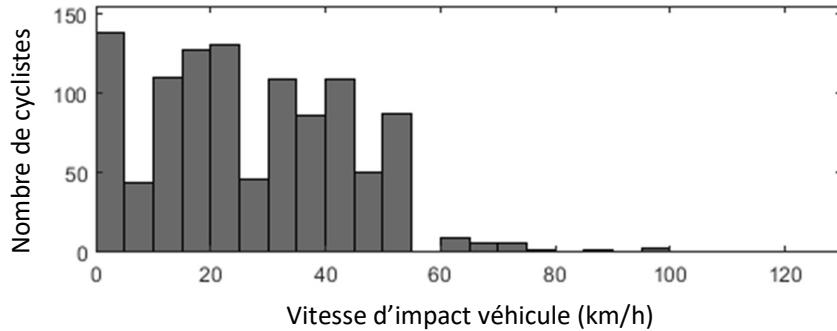


Figure 25: Distribution (pondérée) des vitesses d'impact avec AEB « angle étroit »

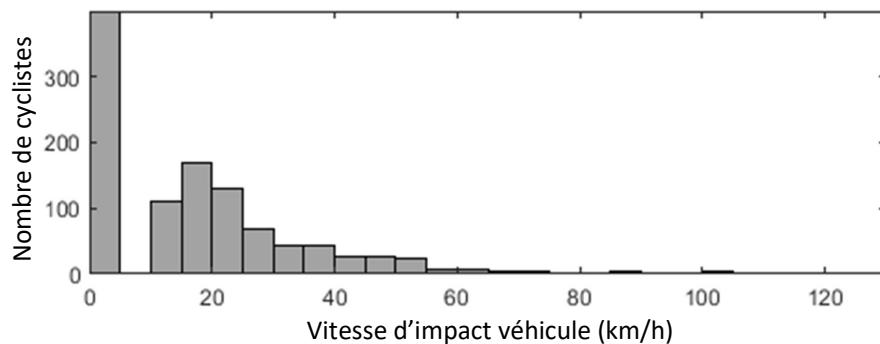


Figure 26: Distribution (pondérée) des vitesses d'impact avec AEB « référence »

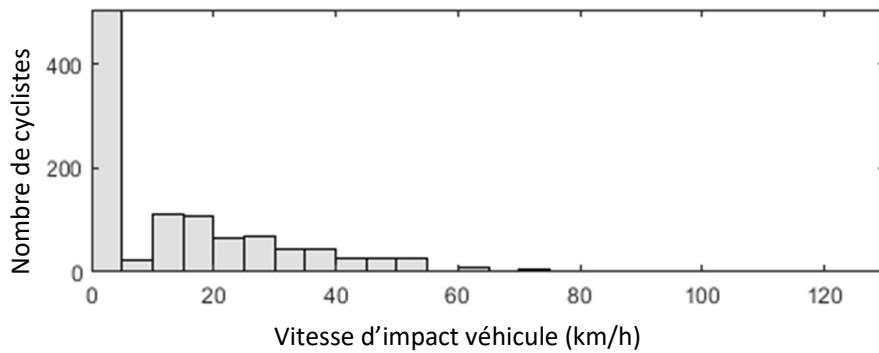


Figure 27: Distribution (pondérée) des vitesses d'impact avec AEB « haut de gamme »

Sur la base de ces distributions de vitesses d'impact véhicule, l'efficacité de l'AEB Cycliste varie entre 35% et 59% pour les tués, 14% et 54% pour les blessés hospitalisés et 11% et 42% pour les blessés légers. Les systèmes « angle étroit » et « haut de gamme » exhibent les efficacités respectivement les plus basses et les plus hautes (tableau 14), alors que l'écart d'efficacité entre les systèmes « référence » et « haut de gamme » est modéré, spécialement en ce qui concerne les tués et blessés hospitalisés.

Niveau de Blessure	Angle étroit	Référence	Haut de gamme
Tués	35%	54%	59%
Blessés Hospitalisés	14%	47%	54%
Blessés Légers	11%	30%	42%

Tableau 14: Efficacité des différents systèmes suivant les catégories de blessure

Exemple de lecture : 35% des tués sont évités avec le système « Angle étroit ».

Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité fournit des images très différentes selon la métrique considérée. Le tableau 15 illustre ce fait en montrant les principaux facteurs de l'analyse bi-capteur dans l'ordre décroissant des contributions à la métrique globale.

PARAMÈTRE/MÉTRIQUE	GLOBALE	TUÉS	BLESSÉS HOSPITALISÉS	BLESSÉS LÉGERS
Valeur de freinage maximal	37,53	45,6	31,6	30,29
Distance latérale maximale	20,4	13,6	24,26	9,33
Angle capteur court	12,23	2,8	16,13	29,01
TTC Maximal	10,1	8,1	10,11	11,43
DTC Maximale	5,97	19,6	2,75	1,64
Temps de montée en freinage	3,37	2,75	3,63	3,25
Délai d'application du freinage	1,95	1,97	1,96	0,77
Angle capteur long	1,91	0,55	2,37	4,97
Portée capteur court	0,79	0,55	0,99	1,04
Durée identification capteur long	0,64	0,21	0,76	1,88
Portée capteur long	0,49	0,2	0,59	1,23
Durée identification capteur court	0,32	0,36	0,27	1,24
Position longitudinale capteur long	0,1	0,01	0,18	0,04
Résidu	4,2	3,7	4,4	3,88

Tableau 15: Contribution des différents paramètres bi-capteur à la variance, pour les 4 métriques d'efficacité

Il est complété par l'annexe 2.3.1, donnant toutes les contributions des facteurs, et les figures 29 à 32 dans lesquelles l'influence des facteurs sur les réponses est représentée par niveau.

La valeur du freinage maximal est le facteur le plus influent, quelle que soit la métrique, avec des contributions allant d'environ 30 % (légèrement blessés) à plus de 45 % (tués). D'autres facteurs influents à mentionner sont la distance latérale maximale par rapport au véhicule (les cyclistes circulant au-delà de cette limite de distance ne sont pas détectés), le TTC maximal et la DTC maximale (aucune action de freinage du véhicule n'est entreprise si le temps ou la distance restants jusqu'à la collision dépasse ces limites). La distance latérale a le plus d'influence sur les blessés hospitalisés (contribution supérieure à 24 %) tandis que la contribution du TTC maximal augmente de 8 % à 11 % à mesure que le niveau de blessure diminue. La DTC maximale ne se classe qu'au cinquième rang pour la métrique globale, mais c'est l'un des facteurs les plus efficaces pour réduire le nombre de tués. Pour tous ces facteurs, des valeurs élevées favorisent l'efficacité de l'AEB-Cycliste.

Le tableau 16 illustre l'analyse d'une configuration à seul capteur et montre une contribution équilibrée de l'angle (plus de 59 %) et de la portée (plus de 38 %) dans la métrique globale. Les mesures détaillées offrent une vue plus contrastée, car une portée accrue apparaît comme le facteur le plus bénéfique pour les tués, tandis qu'un angle accru semble le plus bénéfique pour les blessures.

PARAMÈTRE/MÉTRIQUE	GLOBALE	TUÉS	BLESSÉS HOSPITALISÉS	BLESSÉS LÉGERS
Position longitudinale capteur	0,14	0,01	0,21	2,09
Position latérale capteur	0,18	0,07	0,17	0,23
Portée capteur	38,73	87,45	13,97	4,19
Angle capteur	59,35	11,75	83,81	90,55
Résidu	1,6	0,72	1,84	2,94

Tableau 16: Contribution des différents paramètres mono-capteur à la variance, pour les 4 métriques d'efficacité

2.2.4 Discussion

La littérature scientifique contient très peu d'études portant sur l'efficacité de l'AEB-Cycliste. Une étude (Ohlin et al. 2017) contient une analyse rétrospective de l'efficacité de l'AEB, dans laquelle l'AEB avec détection des piétons s'est avérée efficace à 70 % pour réduire le nombre d'accidents entre cyclistes et véhicules. Cependant, le résultat n'est pas statistiquement significatif puisque le petit

nombre d'accidents impliquant un AEB peut être lié au petit nombre de ces véhicules équipés en circulation. D'autres études consistaient en des analyses prospectives de l'efficacité des AEB piétons et cyclistes (Edwards et al. 2014; Lindman et al. 2010; Paez et al. 2015; Rosén 2013; Rosén et al. 2010) alors que seul (Rosén 2013) – auquel nous pouvons nous comparer ici - a donné des résultats spécifiques pour l'AEB-Cycliste.

Les courbes de risque de blessure de (Rosén 2013) sont modélisées par une régression logistique et montrent une évaluation des risques plus optimiste, par ex. 37 % de risque de blessure mortelle à une vitesse d'impact de 70 km/h dans notre étude, contre 13 % pour (Rosén 2013), et également 100 % de risque de blessure mortelle jamais atteint pour (Rosén 2013) - même à une vitesse d'impact de 110 km/h. Les raisons en sont les différences dans le processus de sélection des accidents, ayant pour conséquence très peu d'accidents mortels ou graves chez les cyclistes dans l'échantillon - (Liers 2016) donne une tentative d'explication sur ce sujet.

Les courbes de risque présentées dans notre étude utilisent la vitesse d'impact comme variable indépendante, comme dans (Rosén 2013) et (Nie et al. 2012). L'utilisation de la vitesse de rapprochement en tant que variable indépendante a également été envisagée dans les premières étapes du présent travail, mais a finalement été rejetée car l'ajustement statistique rétrospectif (application des équations à la distribution de la vitesse d'impact dans le monde réel et comparaison des résultats avec les résultats originaux) s'est révélée de meilleure qualité avec la vitesse d'impact. Notre échantillon ne contient qu'une faible proportion de cas colinéaires (purs frontaux ou purs fronto-arrières) ce qui pourrait aussi expliquer ce fait. L'annexe 2.3.2 illustre cette problématique.

Les résultats de sensibilité présentés ici aident à classer les facteurs les plus influents par type de blessure. De faibles valeurs de résidu (entre 3 et 4% de la variance globale) montrent que les interactions entre facteurs peuvent être négligées dans un premier temps. (Rosén 2013) ne s'est pas engagé dans une analyse de sensibilité proprement dite, mais s'est concentré sur l'évaluation et la comparaison de quelques combinaisons de facteurs réalisistes ou existantes. Ses résultats de sensibilité ne peuvent donc pas être directement comparés à notre travail. Cependant, l'influence bénéfique de la valeur du freinage maximal, du TTC maximal, de la distance latérale maximale ou de l'angle du capteur est mise en évidence dans les deux études.

La valeur du freinage maximal est influente pour toutes les métriques. Ceci est un rappel que l'AEB-Cycliste ne fonctionnera pas comme une solution miracle dans toutes les configurations et qu'il doit être complété, par exemple par d'autres solutions en sécurité active (AES : évitement autonome d'urgence) ou passive, pour une meilleure efficacité. La variabilité du facteur freinage réside principalement dans les conditions routières - des valeurs plus faibles caractérisant les routes mouillées ou verglacées - même si les constructeurs peuvent réguler des valeurs de freinage maximales pour un meilleur confort et la sécurité du conducteur.

Les contributions du TTC maximal augmentent à mesure que le niveau de blessure diminue. Cela s'explique par le fait que les décès de cyclistes surviennent lorsque les cyclistes ne deviennent pleinement visibles par le conducteur du véhicule qu'immédiatement avant la collision. La définition de valeurs élevées pour ce facteur ainsi que pour la distance latérale maximale entraînerait davantage de situations de faux positifs ou de déclenchements intempestifs du freinage - provoquant une gêne pour le conducteur ou une augmentation d'autres types d'accidents, par exemple des collisions fronto-arrière à cause d'un freinage inutile. Cela amène à nouveau les fabricants à restreindre la variabilité de ces facteurs.

La DTC maximale est l'un des facteurs les plus efficaces pour réduire le nombre de tués. Des réglages plus élevés de ce facteur favorisent l'efficacité de l'AEB-Cycliste, mais la variabilité peut être limitée soit pour des raisons liées aux limitations techniques des composants, soit pour les mêmes raisons que ci-dessus.

Cette discussion fournit la justification de la section d'évaluation de l'efficacité, dans laquelle seules les variations de la plage et de l'angle du capteur ont été prises en compte.

2.2.5 Conclusions

L'AEB-Cycliste a un bon potentiel de réduction des tués cyclistes dans une confrontation avec un véhicule et son efficacité varie entre 35% et 59%. Malgré des différences importantes dans les données d'entrée, ces résultats se comparent à ceux trouvés dans (Rosén 2013) dont le système de référence présente une efficacité de 55% dans la réduction des tués cyclistes. La présente étude donne des estimations des bénéfices de l'AEB-Cycliste pour tous les niveaux de blessures, permettant ainsi une évaluation complète, alors que (Rosén 2013) n'a donné des estimations que pour les blessures mortelles et mortelles ou graves. C'est aussi la première du genre à évaluer un système AEB-Cycliste avec deux capteurs.

Les auteurs rappellent que la présente étude illustre les bénéfices prospectifs de l'AEB-Cycliste sans prendre en compte les effets secondaires tels que les accidents dus à un excès de confiance du conducteur dans le système ou davantage de collisions fronto-arrières entre véhicules équipés ou non de fonctions automatisées, dans un contexte de circulation mixte. Le modèle de simulation présenté dans cette étude ne prend pas non plus en compte le temps de réaction du conducteur à l'avertissement émis par les AEB-Cycliste réels, ce qui entraîne des évaluations optimistes.

Rappelons également que l'analyse présentée dans ce chapitre ne traite que des accidents impliquant un véhicule particulier et un cycliste, avec de surcroit certaines exclusions (voir section 1.2.2). Pour fixer les idées, la mortalité cycliste décomposée par type d'adverse est donnée par la figure 28.

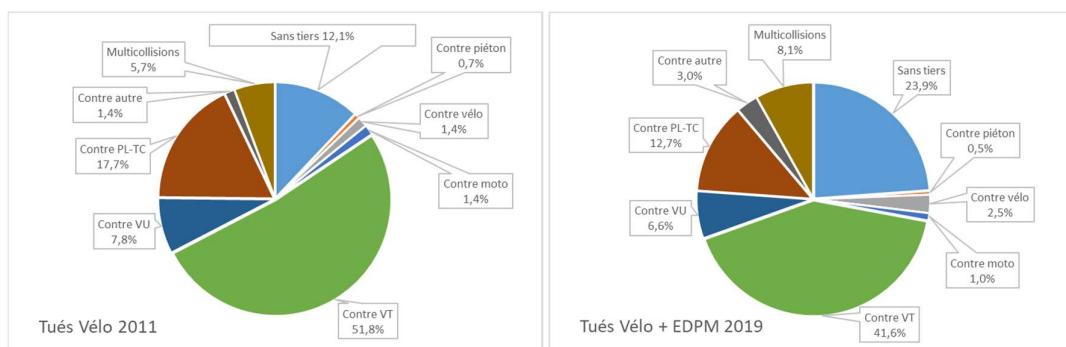


Figure 28 : Mortalité Cycliste par type d'adverse en France (2011, 2019)

A titre d'exemple, le potentiel maximal de réduction du nombre de tués cycliste par les AEB considérés dans notre étude serait de l'ordre de 22% des cyclistes tués (en supposant une efficacité de 59%) et ceci en supposant de surcroit l'ensemble du parc de véhicules particuliers équipé d'une fonction AEB idéalisée.

2.2.6 Références

- Amoros E et al. Méthodologie redressement et extrapolation. L3 Deliverable VOIESUR Project. ANR-11-VPTT-0007. 2015. Available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01212490v2/document>. Accessed February 8, 2019.
- Burg H, Moser A. Handbook of Accident Reconstruction. Viewg & Teubner, Kippenheim, Germany; 2013.
- Chajmowicz H, Saadé J, Cuny S. “Prospective assessment of the effectiveness of autonomous emergency braking in car-to-cyclist accidents in France”. Traffic Injury Prevention 20, 2019 – Issue sup2: Peer-Reviewed Journal for the 63rd Annual Scientific Conference of the Association for the Advancement Automotive Medicine (AAAM).
- Cuny S, Chajmowicz H, Yong K, Hermitte T, Lecuyer E, Bertholon N. A Tool to Assess Pedestrian Safety: Risk Curves by Injury Severity and their Confidence Intervals for Car-to-Pedestrian Front Collision. Paper presented at: International Research Council on the Biomechanics of Injury (IRCOBI); September 12-14, 2018; Athens, Greece.
- Edwards M et al. Estimate of Potential Benefit for Europe of Fitting Autonomous Emergency Braking (AEB) Systems for Pedestrian Protection to Passenger Cars. Traffic Injury Prevention. 2014;15: 173–182.
- Efron B, Tibshirani RJ. Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals and other measures of statistical accuracy. Statistical Science 1986;1(1): 54-77.
- European Road Safety Observatory. Traffic Safety Basic Facts. 2018. Available at: https://ec.europa.eu/transport/road_safety/sites/roadsafety/files/pdf/statistics/dacota/bfs2018_infographics.pdf. Accessed February 8, 2019.
- Karna K, Sahai R. An Overview on Taguchi Method. International Journal of Engineering and Mathematical Sciences. 2012;1: 11-18.
- Lesire P et al. Implication of Children in Road Accidents in France in 2011. Paper presented at: The 24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV); June 8-11, 2015; Gothenburg, Sweden.
- Liers H, Spitzhüttl F. Methods for the creation of injury risk functions based on real-world accident data. Berlin, Germany: Verband der Automobilindustrie; 2016.
- Lindman M et al. Benefit Estimation Model for Pedestrian Auto Brake Functionality. Paper presented at: The 4th Expert Symposium on Accident Research (ESAR); September 16-18, 2010; Hanover, Germany.
- Martin O et al. Economic evaluation of vehicle related measures. Deliverable 6.3 of the H2020 project SafetyCube. Available at: <https://www.safetycube-project.eu/wp-content/uploads/SafetyCube-D6.3-EconomicEvaluationOfVehicleRelatedMeasures.pdf>. Accessed February 8, 2019
- Nie J et al. A Study of Injury Risk of Bicyclist and Pedestrian in Traffic Accidents in Changsha of China. Paper presented at: The 5th Expert Symposium on Accident Research (ESAR); September 7-8, 2012; Hanover, Germany.
- Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière (ONISR). La sécurité routière en France, bilan de l'accidentalité de l'année 2017. 2018. Available at: <http://www.securite-routiere.fr/>

- routiere.gouv.fr/content/download/38258/364658/version/1/file/Bilan+2017+de+la+s%C3%A9curit%C3%A9+routi%C3%A8re%2A8re+VF+internet.pdf. Accessed February 8, 2019.
- Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière (ONISR), "La sécurité routière en France, Bilan de l'accidentalité de l'année 2011", Internet: <https://www.onisr.securite-routiere.gouv.fr/sites/default/files/2019-03/Bilan%2Bde%2Bla%2Bs%C3%A9curit%C3%A9%2Brouti%C3%A8re%2B2011.pdf>, Accessed May 2022.
- Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière (ONISR), "La sécurité routière en France, Bilan de l'accidentalité de l'année 2019", Internet: https://www.onisr.securite-routiere.gouv.fr/sites/default/files/2020-09/Bilan_2019_version_site_internet_24_sept.pdf, Accessed May 2022.
- Ohlin M et al. The Combined Effect of Vehicle Frontal Design, Speed Reduction, Autonomous Emergency Braking and Helmet Use in Reducing Real Life Bicycle Injuries. *Safety Science*. 2017;92: 338–44.
- Paez FJ et al. Benefits Assessment of Autonomous Emergency Braking Pedestrian Systems Based on Real World Accidents Reconstruction. Paper presented at: The 24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV); June 8-11, 2015; Gothenburg, Sweden.
- Rosén E. Autonomous Emergency Braking for Vulnerable Road Users. Paper presented at: International Research Council on the Biomechanics of Injury (IRCOBI); September 11-13, 2013; Gothenburg, Sweden.
- Rosén E et al. Pedestrian Injury Mitigation by Autonomous Braking. *Accident Analysis and Prevention*. 2010;42(6):1949–57.
- Saadé J. Autonomous Emergency Braking AEB (pedestrians & cyclists). H2020 project SafetyCube. Available at: https://www.roadsafety-dss.eu/assets/data/pdf/synopses/Autonomous_Emergency_Braking_AEB_pedestrians_cyclists_20112017.pdf. Accessed February 8, 2019.
- Schleinitz K et al. The German Naturalistic Cycling Study – Comparing cycling speeds of riders of different e-bikes and conventional bicycles. *Safety Science*. 2017;92: 290–297.
- World Health Organization (WHO). Global status report on road safety 2018. 2019. Available at: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/276462/9789241565684-eng.pdf?ua=1>. Accessed February 8, 2019.

2.3 Annexes

2.3.1 Analyse de sensibilité : Influence des paramètres (facteurs)

Cette section illustre l'influence des facteurs dans l'analyse de sensibilité bi-capteur.

- Le facteur A est la position longitudinale du capteur long (en m) avec les niveaux : A1 (0), A2 (-1) et A3 (-1.3)
 - Le facteur B est le TTC maximal (en s) avec les niveaux : B1 (0.8), B2 (1) et B3 (1.5)
 - Le facteur C est le délai de détection du capteur long (en s) avec les niveaux : 0.1, 0.2 et 0.3
 - Le facteur D est le délai de détection du capteur court (en s) avec les niveaux : 0.1, 0.2 et 0.3
 - Le facteur E est la distance latérale maximale (en m) avec les niveaux : 1, 2 et 5
 - Le facteur F est le temps de mise en freinage (en s) avec les niveaux : 0.1, 0.15 et 0.2
 - Le facteur G est la valeur de freinage maximal (en m/s^2) avec les niveaux : 4, 7 et 9.8
 - Le facteur H est le temps de montée en freinage (en s) avec les niveaux : 0.1, 0.2 et 0.3
 - Le facteur I est la portée du capteur long (en m) avec les niveaux : 60, 100 et 140
 - Le facteur J est la portée du capteur court (en m) avec les niveaux : 10, 30 et 50
 - Le facteur K est l'angle du capteur long (en °) avec les niveaux : 20, 30 et 40
 - Le facteur L est l'angle du capteur court (en °) avec les niveaux : 40, 60 et 90
 - Le facteur M est la DTC maximale (en m) avec les niveaux : 10, 20 et 30

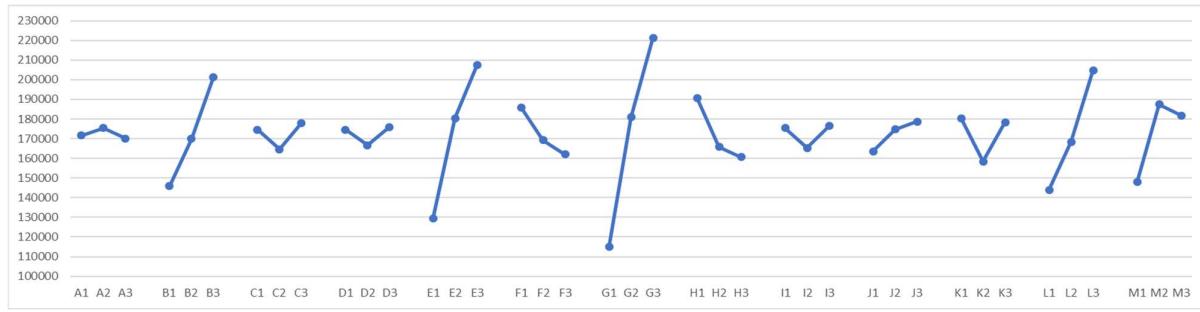


Figure 29: Influence des facteurs sur la métrique globale

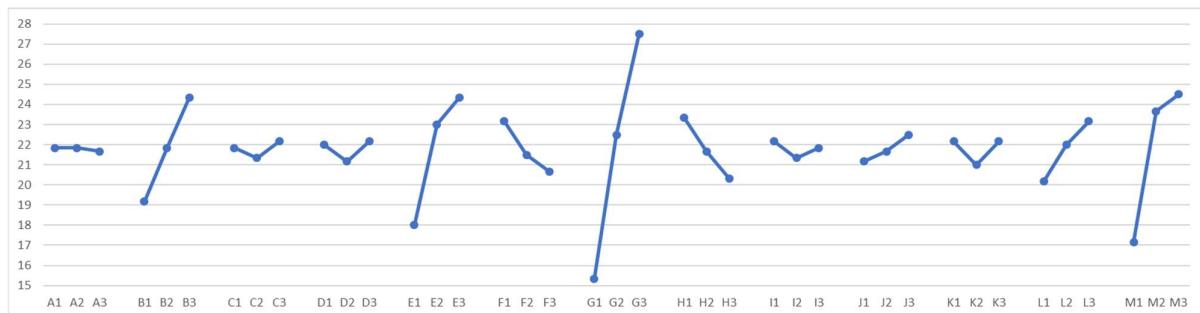


Figure 30: Influence des facteurs sur le nombre de tués évités (A_E)

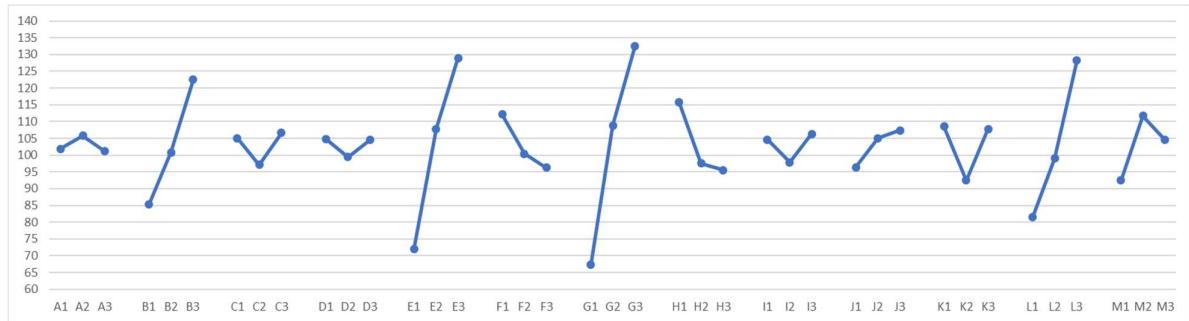


Figure 31: Influence des facteurs sur le nombre de blessés hospitalisés évités (A_{SI})

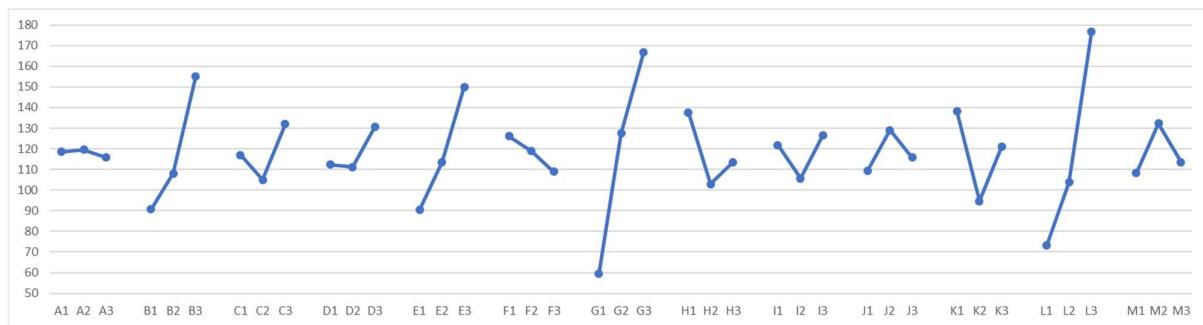


Figure 32: Influence des facteurs sur le nombre de blessés légers évités (A_{SLI})

Venant en complément du tableau 15, ces figures illustrent le sens de variation de l'influence des paramètres et leur importance relative.

A titre d'exemple, sur la figure 32, on peut lire :

- Le sens d'influence du temps de mise en freinage (facteur F) : des valeurs élevées sont **défavorables** à l'efficacité
- Le sens d'influence du temps de montée en freinage (facteur H) : des valeurs élevées sont **défavorables** à l'efficacité – mais ce constat ne vaut pas sur toute la plage du facteur
- Le sens d'influence de la valeur de freinage maximal (facteur G) : des valeurs élevées sont **favorables** à l'efficacité
- L'influence relative des facteurs (exemple : facteurs F et G) permettant de cerner les **facteurs les plus influents** (le facteur G dans l'exemple) sur les plages de niveaux considérées.

2.3.2 Choix de la variable indépendante pour les courbes de risque cycliste

La figure 33 illustre le fait que, bien que l'échantillon brut semble contenir une forte proportion d'accidents « colinéaires » - fronto-frontaux ou fronto-arrières - (43% des collisions, dont 38% en frontal véhicule / arrière cycliste et 5% en fronto-frontal), cette proportion est réduite à 13% par le processus de pondération. L'échantillon brut reflète la répartition illustrée par la figure 23 du texte principal.

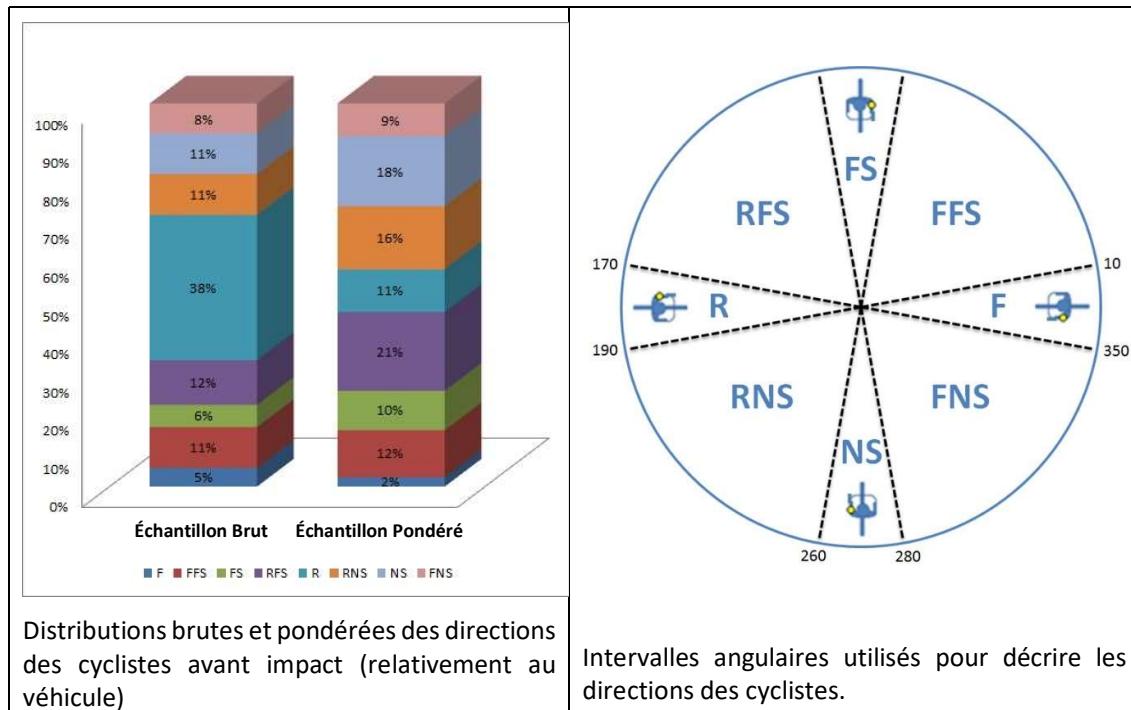


Figure 33: Directions des cyclistes avant impact (relativement au véhicule)

	Tués	Blessés Hospitalisés	Blessés légers	Total
Constat réel	53	383	634	1070
Recalculation avec CDR en vitesse d'impact véhicule au carré	55	379	630	1064
Recalculation avec CDR en vitesse de rapprochement au carré	49	391	636	1076

Tableau 17: Nombre de victimes réel et recalculé à l'aide des courbes de risque (CDR)

Le tableau 17 illustre la qualité de l'ajustement statistique obtenu en utilisant des courbes de risque basées sur la vitesse d'impact véhicule et sur la vitesse de rapprochement respectivement. La moins bonne qualité d'ajustement des courbes en vitesse de rapprochement est consistante avec le large éventail de directions relatives en pré-collision, en particulier avec la faible proportion d'accidents colinéaires dans l'échantillon pondéré (figure 33).

3 RECONSTITUTION SUR PISTE DE DEUX CAS D'ACCIDENTS AVEC DES VEHICULES EQUIPES D'UN SYSTEME AUTONOME D'AIDE A L'EVITEMENT DE COLLISION AVEC DES PIETONS (AEB)

3.1 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 difficiles, 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 qui vont 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 prémisses de ces automates existent déjà dans certains véhicules contemporains équipés d'aides à la conduite conçus pour assister le conducteur dans certaines situations. Les travaux présentés dans ce livrable s'intéressent aux systèmes d'aide à l'évitement de collision avec des piétons généralement dénommés AEB (pour Automatic Emergency Braking). Examiner l'efficacité réelle de ces systèmes peut en effet être riche d'enseignements pour la conception des futurs automates qui équiperont le véhicule autonome.

Le principe d'un système autonome d'aide à l'évitement de collision avec un piéton n'est pas nouveau puisque dès les années 50 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 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 significativement plus ou moins impliqués dans les accidents avec un piéton, toutes choses égales par ailleurs (voir par exemple HDI, 2017 ou Cicchino, sous presse). Cicchino (sous presse) 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.

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 piéton et à examiner l'efficacité de l'AEB dans ces situations (voir par exemple American Automobile Association, 2019 ; HDI, 2019 ; Mahdinia, Khattak et Haque, 2022). Les travaux de Mahdinia, Khattak et Haque (2022) ont par exemple porté sur 91 véhicules équipés de l'AEB qui ont été confrontés à trois scénarios différents (deux scénarios de traversée d'un piéton, 1 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 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 rendons compte ci-après d'un travail exploratoire 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 à ces situations de piétons traversant et d'examiner l'influence de certains paramètres sur le taux d'évitement.

Nous commençons par présenter ci-après 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 présentés. Le protocole expérimental est ensuite exposé. Sont ensuite présentés les résultats obtenus, dans un premier temps globalement puis pour chacun des deux scénarios d'accident. Une conclusion reprend les principaux résultats et les met en perspective avec les résultats obtenus dans le cadre d'autres travaux.

3.2 Méthode

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

L'étude de l'efficacité des automates de conduite et plus particulièrement l'AEB dans les situations d'accidents de 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 sur des échantillons de cas représentatifs des accidents recensés par les forces de l'ordre en France métropolitaine, et 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 du livrable 2.5B du présent projet SURCA (voir Clabaux et Brenac, 2022). L'objectif de ce travail de réévaluation était tout d'abord d'examiner l'évolution des parts respectives des différents scénarios types depuis leur description en 2003 et le cas échéant de mettre en évidence de nouveaux scénarios types. Ensuite, il s'agissait d'estimer le nombre annuel d'accidents correspondant à chaque scénario type en appliquant la répartition observée parmi l'ensemble des scénarios au volume d'accidents corporels du fichier BAAC de l'année 2018. Dans la mesure où l'AEB et plus généralement l'automatisation de la conduite ne semble pas devoir, dans un premier temps, concerter les véhicules à deux-roues, l'enjeu correspondant à chaque scénario type a été estimé hors cas de collisions entre deux-roues et piétons. Nous empruntons à Clabaux et Brenac (2022) le Tableau 18 qui présente les enjeux correspondant à chacun des 21 scénarios types d'accidents de piétons, en pourcentage du nombre total d'accidents de piétons et en nombre annuel d'accidents (pour l'année 2018).

Les scénarios types 8 et 9 apparaissent comme étant les scénarios types les plus représentés. Ils représentent respectivement 13,8 % et 11 % des cas, soit environ 1160 et 920 cas par an en France métropolitaine. La description détaillée de ces deux scénarios types est présentée figure 34.

Le scénario type 8 correspond à des accidents se produisant en carrefour entre un véhicule tournant depuis une voie principale vers une rue secondaire et heurtant en sortie de carrefour un piéton traversant, non détecté. 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. Ces accidents semblent augmenter au cours de la période récente (Clabaux et Brenac, 2022). Cela pourrait tenir à l'augmentation du trafic urbain et de sa diversité (automobiles, deux-roues et autres engins de déplacement) engendrant une complexité croissante des processus de prise d'information et de décision. L'évolution de la conception des véhicules contemporains dont les montants de parebrises plus épais et plus avancés peuvent entraver la perception d'un piéton traversant, pourrait également expliquer cette tendance (même référence).

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 davantage traverser 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 réservée à l'automobile, ce qui se traduit souvent par des attentes inappropriées de la part du conducteur sur l'éventuelle présence 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 correspondent à un enjeu fort en termes d'accidentalité et qui d'autre part sont des situations a priori difficiles pour l'automate (mauvaises conditions de visibilité, véhicule en train d'effectuer une manœuvre tournante).

Tableau 18 : Récapitulatif des enjeux correspondants aux différents scénarios types d'accidents de piétons

	Proportion représentée par le scénario type		Estimation de l'enjeu annuel moyen, en nombre de cas ^a (France métropolitaine, hors collisions deux-roues / piétons)
	Parmi les accidents corporels impliquant des piétons	Parmi les accidents corporels impliquant des piétons <i>hors collisions deux-roues / piétons</i>	
Scénario type	Proportion (et i. c. à 95 %)	Proportion (et i. c. à 95 %)	Nombre de cas par an
1	6,8 % (4,8 % à 9,7 %)	5,9 % (3,9 % à 8,9 %)	500 (330 à 750)
2	6,8 % (4,8 % à 9,7 %)	8,2 % (5,8 % à 11,5 %)	690 (480 à 970)
3	3,5 % (2,2 % à 5,8 %)	1,1 % (0,4 % à 2,9 %)	100 (40 à 240)
4	2,8 % (1,6 % à 4,9 %)	2,3 % (1,1 % à 4,4 %)	190 (100 à 370)
5	6,1 % (4,2 % à 8,8 %)	6,2 % (4,1 % à 9,2 %)	520 (350 à 770)
6	4,7 % (3,1 % à 7,2 %)	4,0 % (2,4 % à 6,5 %)	330 (200 à 550)
7	5,7 % (3,8 % à 8,3 %)	6,5 % (4,4 à 9,6 %)	540 (370 à 800)
8	12,5 % (9,7 % à 16,0 %)	13,8 % (10,6 % à 17,8 %)	1160 (890 à 1490)
8 bis	3,5 % (2,2 % à 5,8 %)	4,0 % (2,4 % à 6,5 %)	330 (200 à 550)
9	10,4 % (7,8 % à 13,6 %)	11,0 % (8,2 % à 14,7 %)	920 (680 à 1230)
10	1,4 % (0,7 % à 3,1 %)	0,8 % (0,3 % à 2,5 %)	70 (25 à 210)
11	1,9 % (1,0 % à 3,7 %)	2,3 % (1,1 % à 4,4 %)	190 (100 à 370)
12	0,2 % (0,0 % à 1,3 %)	0,3 % (0,0 % à 1,6 %)	25 (5 à 130)
13	0,2 % (0,0 % à 1,3 %)	0,3 % (0,0 % à 1,6 %)	25 (5 à 130)
14	0,7 % (0,2 % à 2,1 %)	0,8 % (0,3 % à 2,5 %)	70 (25 à 210)
15	8,0 % (5,8 % à 11,0 %)	9,6 % (7,0 % à 13,1 %)	810 (580 à 1100)
16	2,1 % (1,1 % à 4,0 %)	2,3 % (1,1 % à 4,4 %)	190 (100 à 370)
17	0,7 % (0,2 % à 2,1 %)	0,8 % (0,3 % à 2,5 %)	70 (25 à 210)
18	0,2 % (0,0 % à 1,3 %)	0,3 % (0,0 % à 1,6 %)	25 (5 à 130)
19	1,7 % (0,8 % à 3,4 %)	0,0 % (0,0 % à 1,1 %)	— ^b (0 à 90)
20	0,2 % (0,0 % à 1,3 %)	0,3 % (0,0 % à 1,6 %)	25 (5 à 130)
(Hors sc. type)	(19,9 %)	(19,2 %)	(1600)
Total	100 %	100 %	8380

Notes :

a. Estimé sur la base du total de 8380 accidents corporels impliquant des piétons (hors collisions entre deux-roues et piétons) survenus en 2018 en France métropolitaine.

b. Ce scénario type 19, concernant quasi-exclusivement des accidents entre deux-roues et piétons, correspond logiquement à un enjeu nul pour les accidents touchant des piétons sans implication de deux-roues.

Source : Clabaux et Brenac, 2022

Figure 34 : Description des scénarios type 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 pas 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.¶

Source: Clabaux et Brenac, 2022

L'étape suivante a ensuite consisté à identifier un cas d'accident ayant fait l'objet d'une étude détaillée d'accident par les équipes d'enquêteurs du laboratoire Mécanismes d'Accidents de l'Université Gustave Eiffel pour chacun de ces deux scénarios types. Les informations recueillies par les équipes d'enquêteurs permettent en effet souvent d'accéder à une très bonne compréhension du cas et de pouvoir réaliser une reconstruction cinématique du cas (pour plus de détails sur les Études Détaillées d'Accidents conduites à l'Université Gustave Eiffel, se reporter à la référence Ragot et Van Eslande (2011). Parmi les différents cas possibles de la base de données EDA correspondant aux scénarios types 8 et 9, nous avons retenu les deux cas suivants.

3.2.1.1 Accident 1 Toyota Starlet contre piéton

Cet accident s'apparente au scénario type 8. Il implique une conductrice d'une trentaine d'année 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 qui se situe alors au niveau de l'axe médian et le projette 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 impliqués, il ressort que la conductrice était arrêtée au niveau d'une zone de stockage réservée aux véhicules tournant à gauche et qu'elle 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. Elle semble également avoir été en partie distraite par une connaissance située dans un véhicule en attente au stop à qui elle a fait un signe de la main. Le piéton est un homme d'une soixantaine d'année qui a bien détecté la Toyota avant d'engager sa traversée mais qui 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 la conductrice. La figure 35 présente succinctement le lieu de l'accident, le véhicule impliqué ainsi qu'un schéma de l'accident.

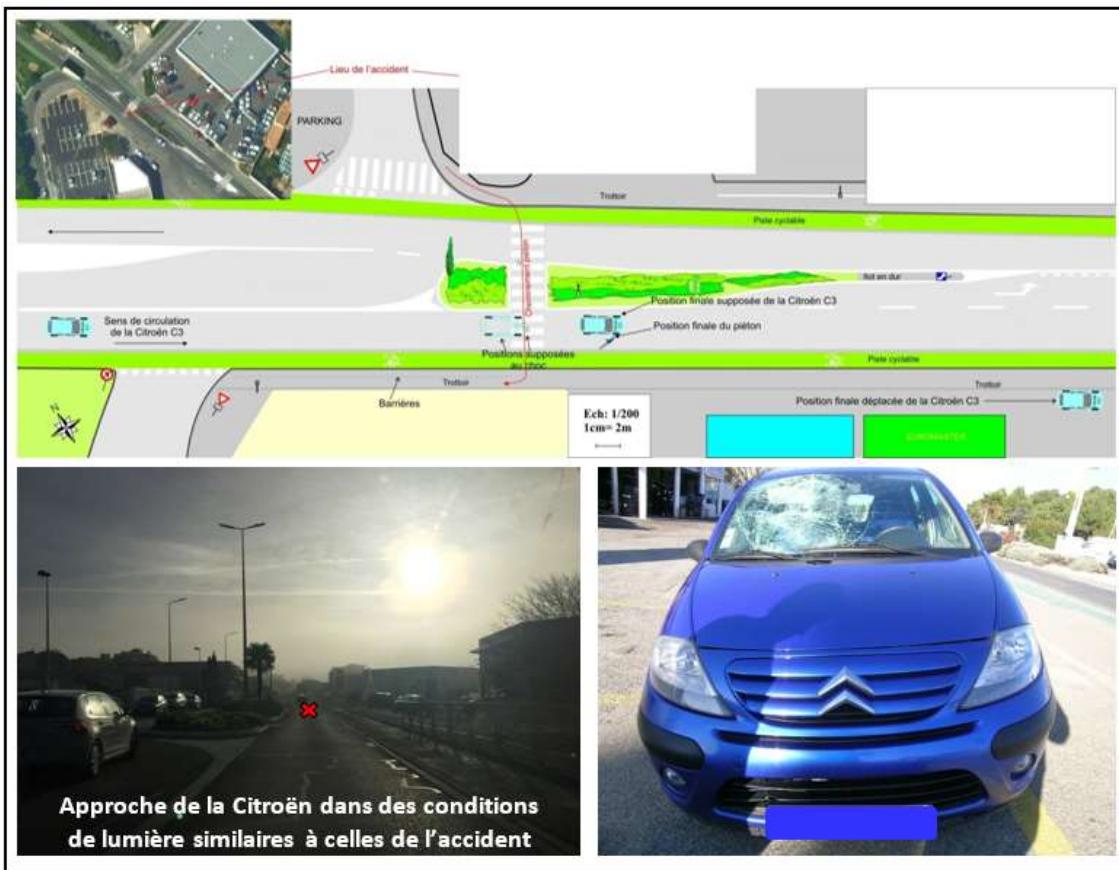
Figure 35 : Schéma de l'accident (Toyota Starlet contre piéton)



3.2.1.2 Accident 2 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 (concessionnaires et garages automobiles situés 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 et 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 avec le conducteur, 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 (hauteur du soleil de l'ordre de 15 degrés par rapport à l'horizon). Il déclare à la psychologue être gêné par le soleil et mettre le pare-soleil et regarder au 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 30kmh. Concernant le piéton, il s'agit d'un homme d'environ 80 ans. Le trajet qu'il effectue est 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 fois. 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 qui suivent l'accident. La figure 36 présente succinctement le lieu de l'accident, le véhicule impliqué ainsi qu'un schéma de l'accident.

Figure 36 : Schéma de l'accident (Citroën C3 contre piéton)



3.2.2 Protocole expérimental

Les deux accidents retenus ont été reconstitués avec l'appui de la société Transpolis. Une première étape a consisté à sélectionner sur leur centre d'essais *Les Fromentaux*, les sites les mieux adaptés aux deux accidents (figure 37). Les critères d'aménagement, d'infrastructure et d'orientation par rapport au soleil ont été prépondérants. Les deux sites retenus étaient dans la partie *Ville*. 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" et du temps d'expérimentateurs pour la préparation des essais, pour le pilotage de la plateforme et des véhicules de tests. La prestation demandée n'incluait pas de mesures spécifiques (position, vitesse, accélération), ni d'asservissement (position, vitesse).

Figure 37 : Choix des deux sites pour les reconstitutions d'accident



Source : TRANSPOLIS

Le banc de test "piéton" utilisé est de marque AB Dynamics. Il comprend un mannequin impactable (fourni par Transpolis) une plateforme mobile pilotée (fournie par l'Université Gustave Eiffel). Cet équipement est conçu pour la mise au point des AEB et leurs évaluations type Euro NCAP. Pour plus de renseignements on pourra consulter ACEA (2016).

Les deux véhicules de tests ont été fournis par l'Université Gustave Eiffel. Le premier est une automobile de type *Citadine polyvalente*, elle appartient au segment B (ou B2), et sa mise en circulation est d'octobre 2020. Nous l'appellerons par la suite *Citadine*. Ce véhicule est équipé d'un AEB utilisant uniquement une caméra implantée sur le parebrise derrière le rétroviseur intérieur, ainsi qu'une alerte sonore.

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

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 imposée. 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) à déclenchement synchronisé ont filmé tous les essais, une était positionnée à l'intérieur du véhicule test (dirigé vers le volant et l'avant du véhicule), une sur le toit (dirigée vers l'avant) et une sur trépieds filmait la scène dans l'axe de la trajectoire du piéton.

Nous avons sommairement équipé les véhicules de test d'un système d'acquisition basé sur une application smartphone qui enregistre principalement sur les 3 axes les accélérations et vitesses de rotation à une fréquence de 50Hz et les positions via un capteur externe GPS/GLONAS à une fréquence d'acquisition de 10Hz. 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*.

3.2.2.1 Scénario 8 - Tourne à gauche

La reconstruction cinématique de l'accident est présentée figure 38. Le véhicule était arrêté en attendant de pouvoir réaliser sa manœuvre de tourne à gauche. Il démarre avec une accélération relativement faible, il a 10m à parcourir jusqu'au point de choc et heurte le piéton avec une vitesse d'environ 15km/h. Ce mouvement correspond à une accélération moyenne d'environ 0.9 m/s^2 correspondant globalement aux résultats des travaux de Happer et al., (2009). Le piéton a 4 mètres à parcourir, il marche à environ 5km/h. Il est heurté par la voiture au niveau du phare avant gauche (figure 39).

La figure 40 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 fait un VL et la remorque de pilotage du banc de test Usager Vulnérable). Des photographies des deux sites, celui de l'accident EDA et celui de la reconstitution sont présentées figure 41.

Figure 38 : Reconstruction cinématique du cas EDA retenu pour le scénario 8 - Tourne à gauche

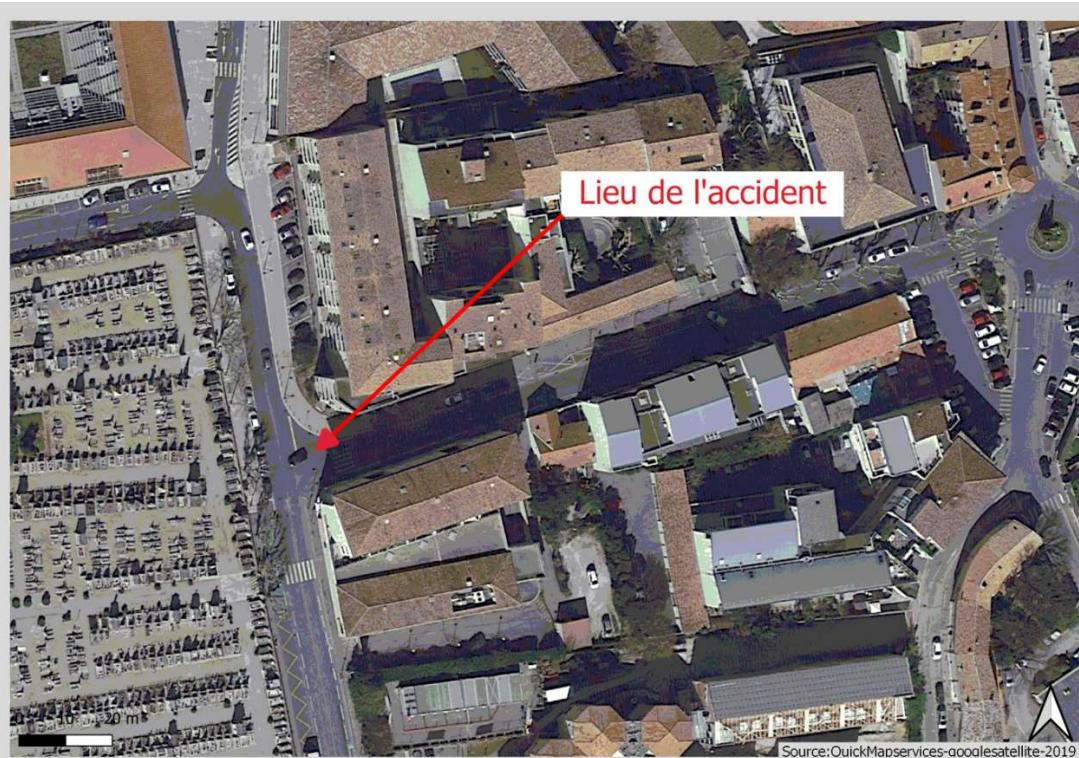


Figure 39 : Légère déformation du véhicule accidenté (accident Scénario 8 - Tourne à gauche)



Figure 40 : Reconstitution de l'accident EDA Scénario 8 Tourne à gauche - Site de TRANSPOLIS

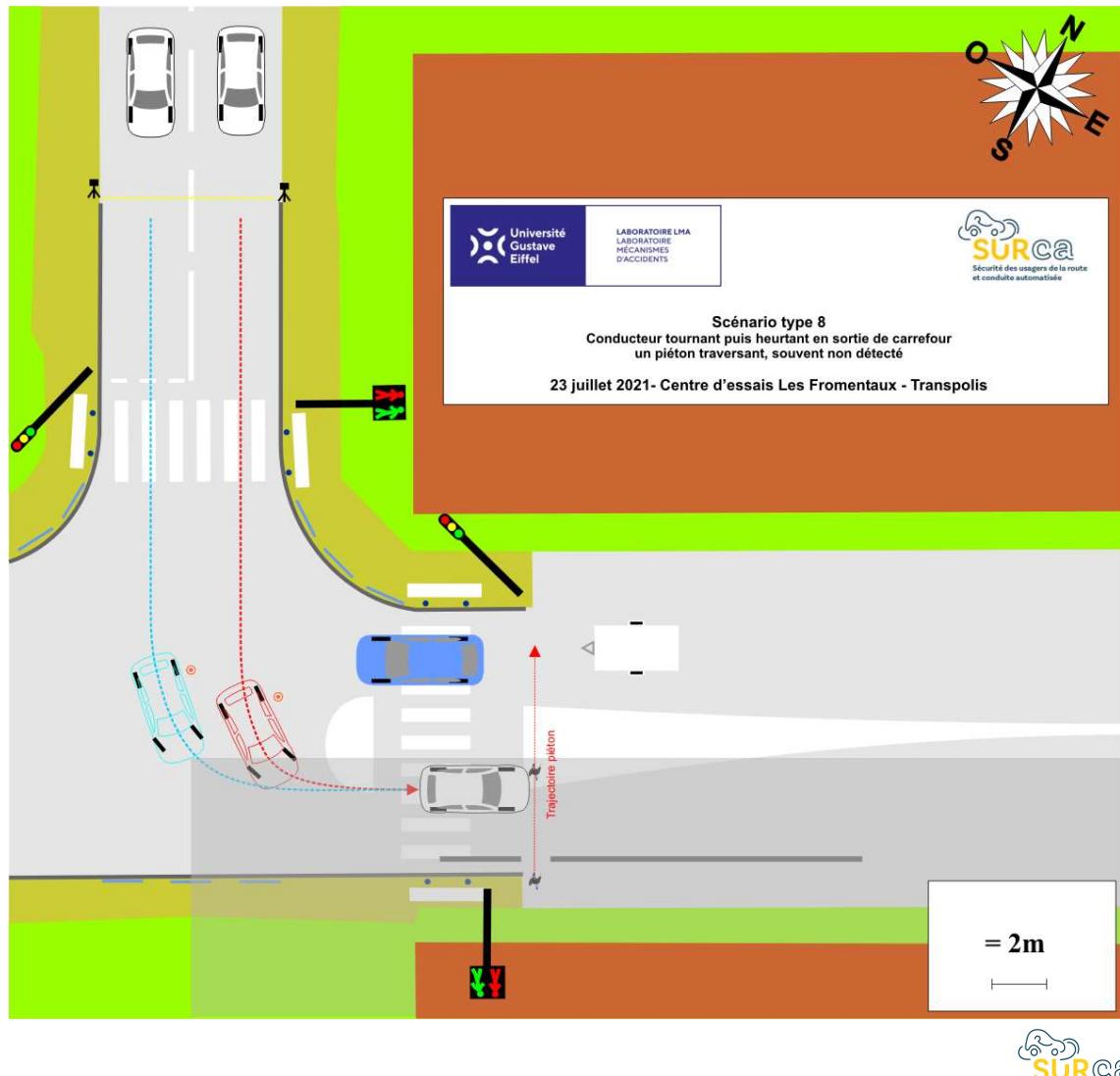


Figure 41 : Comparaison des sites Accident / Reconstitution, Scénario 8 - Tourne à gauche



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 10m 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 préféré pour les reconstitutions un mouvement à vitesse constante correspondant à la vitesse d'impact de 15km/h. Des essais ont également été réalisés à une vitesse plus élevée (20km/h).

Dans ce cas d'accident, 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'éloigner" la trajectoire de traversée du piéton afin d'augmenter le temps entre 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 (cf. Figure 40). 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 avons 11m dans les conditions de l'accident. Nous avons également réalisé des essais avec une distance de 14m ce qui équivaut à reculer la trajectoire de traversée du piéton de 3m.

Le pilote essayeur de la voiture de test avait donc une trajectoire et une vitesse imposée. Le mouvement du piéton (4m à parcourir à 5km/h) était déclenché par le passage du véhicule de test devant une cellule optique, décalé dans le temps d'un délai adéquat (cf. tableau 19). 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 19 : Cinématiques utilisées pour les reconstitutions - Scénario 8 Tourne à Gauche

CONFIGURATION DE L'ACCIDENT REEL Vitesse d'approche 15km/h $d(\text{AppVL/trajPiét}) = 11 \text{ m}$	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)	
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	

Configuration Vitesse d'approche 20 km/h $d(\text{AppVL/trajPiét}) = 11 \text{ m}$	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)	
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	

Configuration Vitesse d'approche 15 km/h $d(\text{AppVL/trajPiét}) = 14 \text{ m}$	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)	
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	

Configuration Vitesse d'approche 20 km/h $d(\text{AppVL/trajPiét}) = 14 \text{ m}$	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)	
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	

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 $d(\text{AppVL/trajPiét})$

A priori, le niveau de sensibilité, réglable par configuration des paramètres d'assistance des deux véhicules, n'intervient que sur l'alerte et pas sur l'AEB lui-même, nous avons toutefois fait varier ce paramètre selon différentes valeurs (voir le récapitulatif du plan d'expérience présentés ci-après).

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 : 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 : 11m - 14m.

Au total, 24 essais ont été réalisés.

3.2.2.2 Scénario 9 Ligne droite

La reconstruction cinématique de l'accident (figure 42) et les déformations du véhicule impliqué (figure 43) indiquent les positions et vitesses de chacun des deux mobiles au moment du choc : la vitesse du piéton âgé a été estimée à 4km/h et celle de l'automobile à 30km/h, le choc est légèrement décalé sur la droite du véhicule (2/3 de voie environ).

Figure 42 : Reconstruction cinématique du cas EDA retenu pour le scénario 9 - Ligne droite

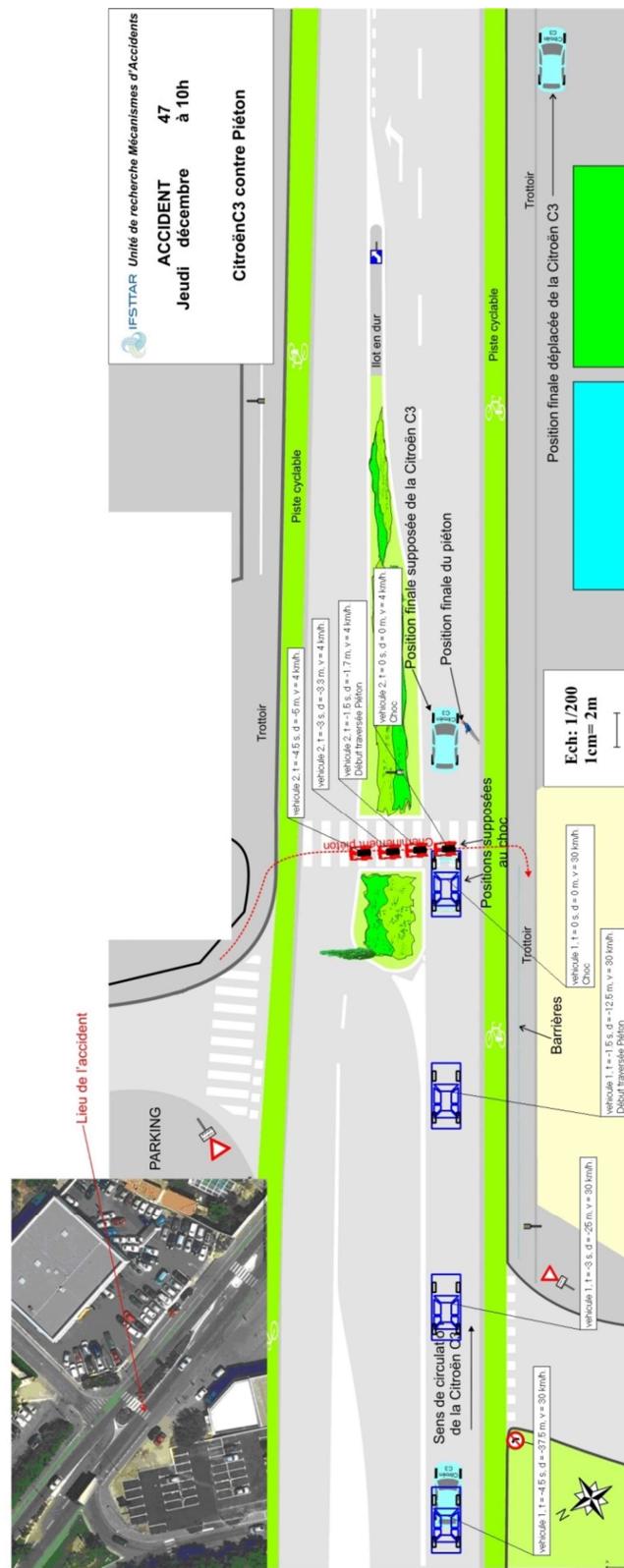


Figure 43 : Déformations du véhicule accidenté (accident EDA Scénario 9 Ligne droite)

Pour la reconstitution, la figure 44 présente le plan du site aménagé pour s'approcher "au mieux" du site de l'accident. Des marquages au sol ont été réalisés, des bordures de trottoir positionnées, ainsi qu'un VL en stationnement et un arbre pouvant éventuellement perturber la perception du piéton, voir également figure 45.

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

Tableau 20 : Cinématiques utilisées pour les reconstitutions

Configuration Vitesse d'approche 40 km/h	VL			Piéton	
	Distance (m)	Vitesse (km/h)	TEMPS (s)	Distance (m)	Vitesse (km/h)
Passage VL devant Cellule optique	-60	40	-5.4	-5.5	0
Départ Piéton					
Choc théorique	0	40	0	0	4

CONFIGURATION DE L'ACCIDENT REEL 30km/h	VL			Piéton	
	Distance (m)	Vitesse (km/h)	TEMPS (s)	Distance (m)	Vitesse (km/h)
Passage VL devant Cellule optique	-60	30	-7.2	-5.5	0
Départ Piéton	-45	30	-5.4	-5.5	0
Choc théorique	0	30	0	0	4

Configuration Vitesse d'approche 20 km/h	VL			Piéton	
	Distance (m)	Vitesse (km/h)	TEMPS (s)	Distance (m)	Vitesse (km/h)
Passage VL devant Cellule optique	-60	20	-10.8	-5.5	0
Départ Piéton	-30	20	-5.4	-5.5	0
Choc théorique	0	20	0	0	4

Figure 44 : Plan du site de reconstitution de l'accident EDA - Scénario 9 Ligne droite



Figure 45 : Comparaison des sites Accident / Reconstitution, Scénario 9 - Ligne droite



Site Accident EDA



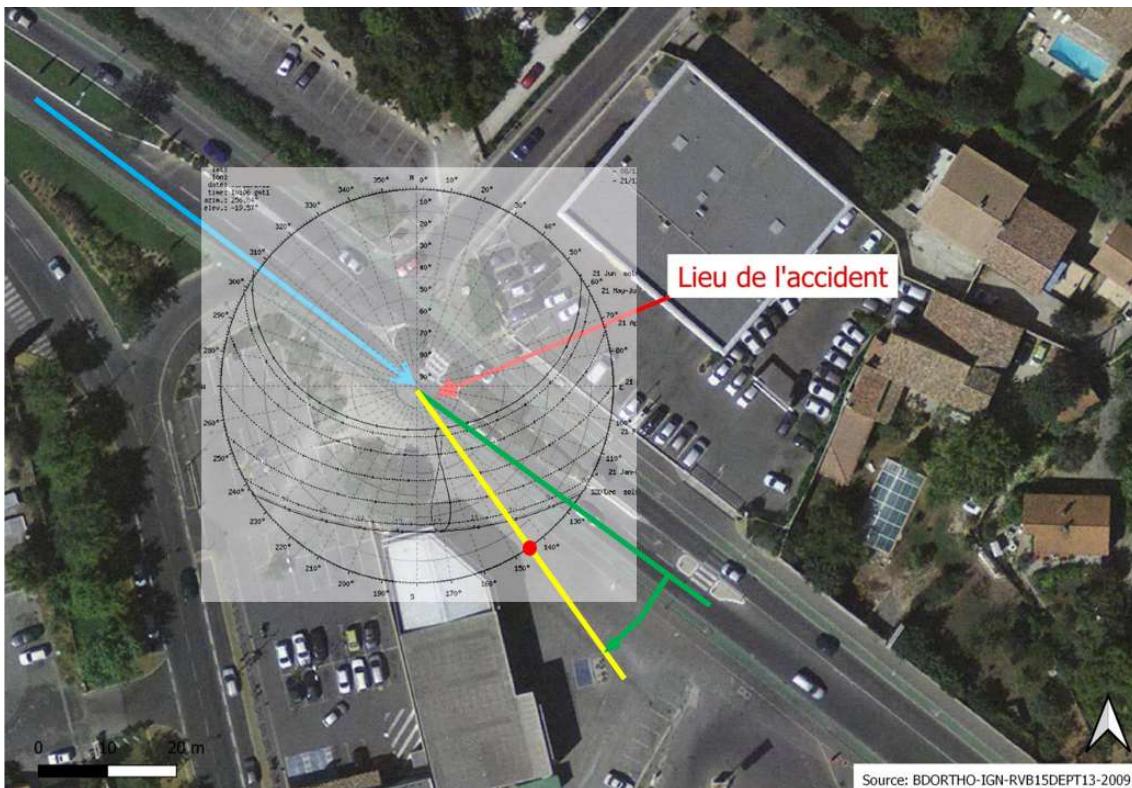
Site Reconstitution TRANSPOLIS

Pour cet accident, les conditions de luminosité, avec un soleil rasant et éblouissant ont été identifiées comme 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 46).

Figure 46 : Angle entre la trajectoire du VL et l'azimut du soleil - Accident EDA Scénario 9 Ligne droite



Source: BDORTHO-IGN-RVB15DEPT13-2009

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>)

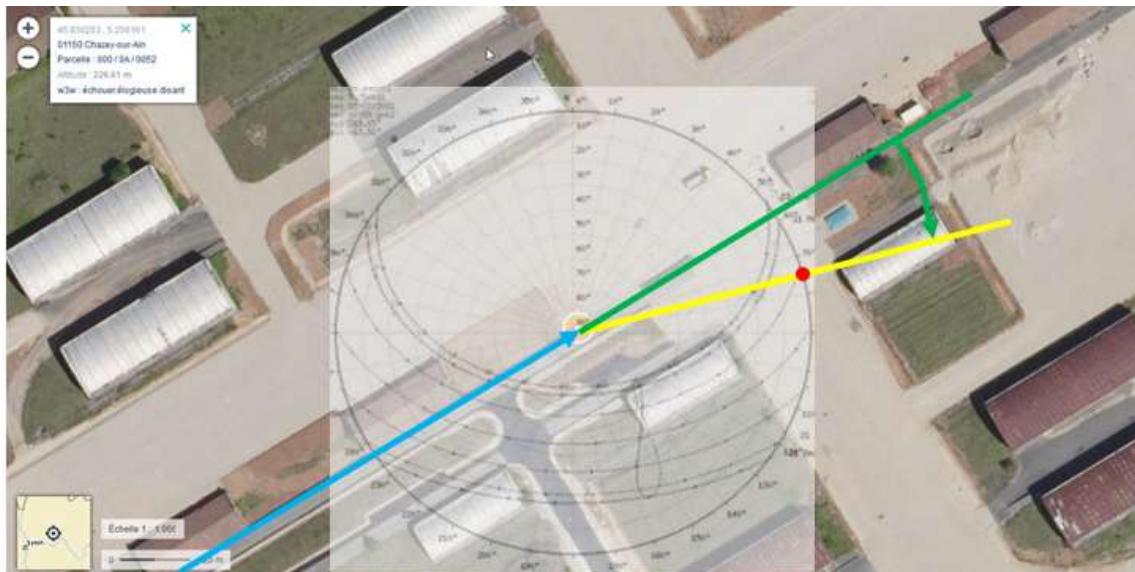
Les coordonnées du site choisi pour la reconstitution sont 45.930253° N et 5.256161° E. À cet endroit, le matin du 22 juillet 2021, d'après l'observatoire de Paris, l'élévation du soleil la plus proche de celle de l'accident (15°48) était à 7h55 (cf. tableau 21) avec une valeur de 15°59. À cette heure l'azimut était de 77°14.

Tableau 21 : Éphémérides de position des corps du Système solaire

Soleil (Étoile)																		
Date	TSL h	α h	δ deg	HA h	Az deg	H deg	AM	d_{obs} au	m_{v} mag	$\Delta \cos \delta$ arcsec/min	$\Delta \delta$ arcsec/min	v_r 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°13'11.329"	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	-0.4911498	-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> (note : l'heure indiquée correspond à l'heure UTC)

Figure 47 : Angle entre la trajectoire du VL et l'azimut du soleil - Site Transpolis - Scénario 9 Ligne droite



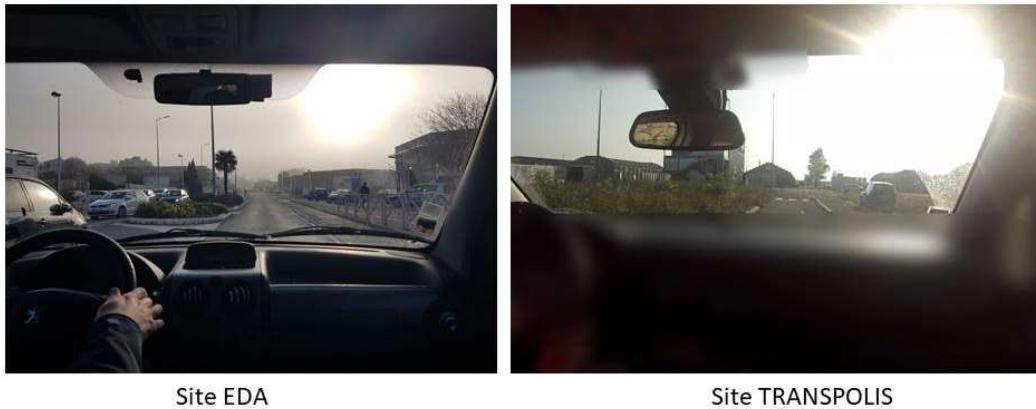
Source : <https://ssp.imcce.fr> et <http://www.geoportail.fr>

La figure 47 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 22 présente un récapitulatif des conditions de luminosité "soleil éblouissant" entre l'accident réel et sa reconstitution sur le site de Transpolis et la figure 48 illustre le résultat en présentant deux photos prises de l'intérieur d'un véhicule sur les deux lieux, aux dates et heures correspondantes.

Tableau 22 : 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 48 : Condition d'éblouissement, comparaison accident EDA / reconstitution

Site EDA

Site TRANSPOLIS

Le niveau de sensibilité de l'assistance 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 : basse - normale - élevée,
- Position du soleil, Élévation et Azimut : le premier essai a eu lieu vers 7h50 (les conditions les plus proches de celles de l'accident étaient estimées à 7h55), l'élévation et l'azimut n'ont donc cessé d'évoluer au fil de l'heure des essais.

Au total 31 essais ont été réalisés, entre 7h51 et 10h49.

3.3 Résultats

3.3.1 Résultats généraux

Parmi les 55 essais réalisés (24 pour le scénario 8 Tourne à gauche et 31 pour le scénario 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) et dont les travaux ont porté sur un nombre considérablement plus élevé d'essais (n=3095 essais) et qui observent un taux d'évitement de 70 %.

L'AEB a également permis de réduire significativement la vitesse d'impact sur le piéton dans trois cas supplémentaires. Globalement le système a donc permis d'éviter ou d'atténuer les conséquences de l'accident dans 21 cas sur 55. En ce qui concerne l'alerte (FCW), le signal sonore a été effectif dans 36 cas sur 55 (voir tableau 23)

Tableau 23 : 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.

3.3.2 Résultats pour le scénario 8 Tourne à gauche

Le tableau 24 présente les valeurs prises par les différentes variables pour chacun des 24 essais. On observe que quel que soit 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 17m). Tous les essais (5 essais par véhicule, soit 20 essais) ont été réalisés à la vitesse de 15mph. 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 informations que nous avons pu obtenir dans le cadre de la préparation des essais, 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 scénarios. C'est pourquoi, nous fournissons les valeurs approximatives de l'angle au volant à différents temps à l'impact pour chacun des 24 essais. 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 5 cas où l'alerte a retenti concernent tous des essais à 13 km/h réalisés avec le véhicule "compacte".

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

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

3.3.3 Résultats pour le scénario 9 Ligne droite

Le tableau 27 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, observe un taux d'évitement de 45 %. Dans un travail plus récent portant sur davantage de scénarios et des véhicules, pour certains, plus récents, Mahdinia, Khattak et Haque (2022) observent un taux d'évitement supérieur, de l'ordre de 70 %.

À ces 18 cas d'évitement s'ajoutent 3 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 avoir une incidence, voir tableau 25, 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 sur la compacte d'un radar, en plus de la caméra, contrairement à la citadine qui ne dispose que d'une caméra. C'est ce que suggère les travaux de Combs et al. (2019) qui observant qu'une caméra seule donne lieu à plus de collisions que lorsqu'elle couplée à d'autres systèmes (radar, LIDAR).

Tableau 25 : Impact, évitement, selon les véhicules (2 véhicules - 31 essais)

	Impact	Évitement
Citadine	10	6
Compacte	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 la vitesse de 30 km/h, voir tableau 26, 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 40km/h et à 30km/h ($\chi^2=0,08$, $p=0,78$).

Tableau 26 : Impact, évitement, selon la vitesse de consigne (2 véhicules - 25 essais)

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

Concernant les autres variables, il n'est pas ressorti d'autres variables ayant 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 avoir d'effet sur l'efficacité de l'automate, même si cela mériterait d'être confirmé sur la base d'un plus grand nombre d'essais (Test de rang de Mann-Withney, $p=0,78$).

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

Tableau 27 : 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
											freine puis relâche, freinage en deux fois		
08:34	8	Compacte	30	30,293	4	83°52'00.120"	22°40'18.480"	basse	ok	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

SURCA L6.3.1 – Evaluation des gains accidentologiques attendus chez les piétons et les cyclistes avec les véhicules autonomes

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"	élévée	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"	élévée	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	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

3.4 Conclusion

L'objectif des investigations conduites dans le cadre de cette tâche 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 et d'examiner le comportement des véhicules dans ces situations. Il s'agit d'une démarche, parmi d'autres, pour étudier l'efficacité de ces systèmes. L'originalité du travail présenté dans ce livrable est 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 choisis parce qu'ils représentent un enjeu important en matière d'accidentalité d'après les travaux définissant les principaux scénarios types d'accidents de piétons (voir Clabaux et 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 correspondait à un véhicule circulant en ligne droite et percutant un piéton non détecté. Ces deux scénarios représentent à eux seuls, de l'ordre d'un accident sur 4 parmi l'ensemble des accidents de piétons recensés chaque année en France métropolitaine (même référence). 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, puisque dans le premier cas le véhicule effectuait une manœuvre tournante tandis que dans le second il circulait face à un soleil rasant.

Deux véhicules, une "citadine" et une "compacte", ont été confrontés à ces situations sur les pistes de TRANSPOLIS. 55 essais, 24 pour le scénario de tourne à gauche et 31 pour le scénario ligne droite, ont été réalisés. Au-delà du nombre d'évitements ou d'impacts sur le piéton, 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, le type de véhicule, l'éloignement du piéton par rapport à l'intersection (pour le scénario tourne à gauche uniquement), la position du soleil (pour le scénario ligne droite).

Avant de revenir sur les principaux résultats obtenus, rappelons ici que cette étude était avant tout exploratoire. Elle comporte en outre de nombreuses limites. Elle s'appuie tout d'abord sur un nombre très faible d'essais pour chaque configuration. Les essais ont d'autre part étaient réalisés avec l'aide d'un pilote essayeur et non d'un robot de conduite asservi. La répétabilité des essais n'était de fait pas parfaite. Enfin, la rapidité des évolutions technologiques dans le domaine des aides à la conduite rend la portée des résultats encore un peu plus limitée. À ce titre les travaux conduits par Mahdinia, Khattak et Haque (2022) sur plus de 3000 essais suggèrent une forte amélioration des systèmes anti-collision avec des piétons au fil du temps. Par exemple, pour les essais réalisés à 40km/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 17m de rayon environ). Au cours des 20 essais, les 4 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. D'après les informations que nous avons pu obtenir dans le cadre de la préparation de cette étude, 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 ce scénario. Cicchino (sous presse) 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 depuis 2020, en Europe, l'organisme Euro NCAP prévoit dans son protocole de test pour la protection des usagers vulnérables, un scénario de traversée d'un piéton en virage (voir Euro NCAP, 2020, p.22). Certains véhicules très récents sont d'ailleurs désormais 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 éblouissantes. 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 3 cas dans lesquels la vitesse a significativement été 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%). Il est probable que cela provienne du fait que la compacte soit équipée à la fois d'une caméra et d'un radar alors que la citadine ne dispose que d'une caméra seule. C'est aussi ce que suggèrent les travaux de Combs et al. (2019) qui observent qu'une caméra seule donne lieu à plus de collisions que lorsqu'elle est couplée à d'autres systèmes (radar, lidar). Concernant les autres variables étudiées, la vitesse d'approche semblerait également avoir une incidence, même si cela mériterait d'être confirmé sur un plus grand nombre d'essais. Les essais à 20km/h semblent en effet donner lieu à plus d'évitement que les essais à 30km/h. C'est aussi ce que suggèrent Mahdinia, Khattak et Haque (2022) en s'appuyant sur plus de 3000 essais. La position du soleil et le réglage de la sensibilité de l'alerte (FCW) ne semblent en revanche pas avoir eu d'impact sur l'efficacité de l'AEB.

D'un point de vue plus méthodologique, les travaux réalisés dans le cadre de cette tâche ont aussi montré toute la difficulté de reproduire sur piste des scénarios d'accidents réels qui soient fidèles et reproductibles d'un point de vue écologique. Une autre voie pourrait être de réaliser des essais similaires sur le site même des accidents afin de pouvoir étudier l'influence de certains facteurs environnementaux sur l'efficacité des systèmes. La diffusion progressive de l'AEB dans le parc automobile rend également désormais possible l'évaluation de cette aide sur le risque final d'accident.

3.5 Références bibliographiques

- ACEA (2016) , Articulated Pedestrian Target Specifications, document disponible sur le site : <https://www.acea.auto/publication/articulated-pedestrian-target-acea-specifications/> Accès le 18 mai 2022.
- American Automobile Association (2019). Automatic emergency braking with pedestrian detection. American Automobile Association Inc, 48p.
- Brenac, T., Nachtergaelle 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, 207p.
- Chauvel, C., Page, Y., Fildes, B., Lahausse, 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, 9p.
- Cicchino, J.B., (in press). Effects of automatic emergency braking systems on pedestrian crash risk. *Accident Analysis and Prevention*, In press.
- 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, 47pages.
- 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, 47p.
- 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, <https://doi.org/10.4271/2009-01-0107>
- 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, 7p.
- Highway Loss Data Institute (HLDI), (2019). Crash avoidance system pedestrian tests. *Accident Reconstruction Journal*, vol. March-April2019, 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, 10p.
- Ragot, I., Van Elslande, P., (dir) (2011). Les comportements et leurs déterminants dans l'accidentalité des deux-roues motorisés? Rapport final IFSTTAR/DSCR, Convention de subvention n° 0007202, 198p.
- 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.