Aix Marseille Université

NNT : 0000AIXM0000

THÈSE DE DOCTORAT

Soutenue à Aix-Marseille Université
Le 18 Juin 2025 par

Abdelkarim AIT-MOULA

Effet des systèmes d'aides à la conduite sur l'accidentalité des deux-roues motorisés

Discipline

Sciences du Mouvement Humain

École doctorale 463

SCIENCES DU MOUVEMENT HUMAIN

Laboratoire de recherche
Laboratoire Mécanismes d'Accidents

Composition du jury

Said MAMMAR *Professeur des universités* *Université d'Evry Paris-Saclay*	Président du jury
Abderrahmane BOUBEZOUL *Chargé de recherche, SATIE* *Université de Gustave Eiffel*	Rapporteur
Michel BASSET *Professeur des Universités* *Université de Haute-Alsace*	Rapporteur
Lydie NOUVELIERE *Maître-de-Conférences HDR* *Université d'Evry-Paris Saclay*	Examinatrice
Thierry Serre *Directeur de recherche,* *Laboratoire mécanises d'accidents,* *Université Gustave Eiffel*	Directeur de thèse
Ebrahim RIAHI *Chargé de recherche,* *Laboratoire mécanises d'accidents,* *Université Gustave Eiffel*	Co-directeur de thèse

Université Gustave Eiffel — LABORATOIRE LMA LABORATOIRE MÉCANISMES D'ACCIDENTS

Université Gustave Eiffel

ECOLE DOCTORALE Sciences du Mouvement Humain

Affidavit

Je soussigné, Abdelkarim AIT-MOULA, déclare par la présente que le travail présenté dans ce manuscrit est mon propre travail, réalisé sous la direction scientifique de Thierry SERRE et Ebrahim RIAHI dans le respect des principes d'honnêteté, d'intégrité et de responsabilité inhérents à la mission de recherche. Les travaux de recherche et la rédaction de ce manuscrit ont été réalisés dans le respect à la fois de la charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et de la charte d'Aix-Marseille Université relative à la lutte contre le plagiat.

Ce travail n'a pas été précédemment soumis en France ou à l'étranger dans une version identique ou similaire à un organisme examinateur.

Fait à Bordeaux , le 2 mars 2025

Cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

"*Life is like riding a bicycle. To keep your balance, you must keep moving*"

Albert Einstein

Liste de publications et participation aux conférences

1) Liste des publications réalisées dans le cadre de la thèse :

    1. **Ait-Moula A**, Naude C, Riahi E, Serre T. Enhancing motorcycle safety: Quantifying the effects of Autonomous Emergency Braking and Adaptive Cruise Control in crashes reduction. *Traffic Injury Prevention*. 2025.
    2. **Ait-Moula A**, Riahi E, Serre T. Effect of advanced rider assistance system on powered two wheelers crashes. *Heliyon*. 2024;10(4):e26031.

2) Participation aux conférences au cours de la période de thèse :
    1. **Ait-Moula, A.**, Riahi, E., Serre, T., 2023. Analyse qualitative et quantitative de 3 systèmes d'aides à la conduite sur l'accidentalité des 2RM. Presented at the JM RST 2023 : Journées Mobilités du Réseau Scientifique et Technique, Metz. (Présentation orale)
    2. **Ait-Moula, A.**, Riahi, E., Serre, T., 2022a. Effet des systèmes d'aide à la conduite (ADAS) sur l'accidentalité des deux roues motorisées. Presented at the COnnaissances Scientifiques sur les MOtocycleS (COSMOS), Paris, p. 11. (Présentation orale avec publications des actes)
    3. **Ait-Moula, A.**, Riahi, E., Serre, T., 2022b. Effet qualitatif des systèmes d'aide à la conduite sur les accidents de deux roues motorisées de la base de données des EDA. Presented at the SaNuit-Maghreb : 2ème Colloque International de Sécurité Routière au Maghreb, Mohammedia, p. 11. (Présentation orale avec publications des actes).
    4. **Ait-Moula, A.**, Riahi, E., Serre, T., 2022c. Benefit estimation of the Power Two Wheelers Advanced Rider Assistance System on accidentology. Presented at the 14th International Motorcycle Conference, Institute for Motorcycle Safety, Cologne, p. 15. (Présentation orale avec publications des actes)



Obtention du 1er prix du jeune chercheur européen, délivré par Fim Europe - European Motorcycling Union.

    5. Riahi, E., **Ait-Moula, A.**, Serre, T., 2023. Analyzing the Impact of Adaptive Cruise Control on Motorcycle Safety. Presented at the FAST-zero'23 (Future Active Safety Technology toward zero traffic accidents), Japan, p. 5. (Co-auteur)
    6. **Ait-Moula, A.,** Riahi, E., Serre, T., 2024. Analyse de trois aides à la conduite pour la sécurité des deux-roues motorisés : Méthodes et Résultats. Presented at the COnnaissances Scientifiques sur les MOtocycleS (COSMOS), Paris, p. 14. (Présentation orale avec publications des actes).
    7. **Ait-Moula, A.,** Riahi, E., Serre, T., 2022d. Effet des systèmes d'aides à la conduite sur l'accidentalité des 2RM. Journée École Doctorale SMH N°463. (Présentation d'un poster).

Résumé

L’essor des transports a considérablement amélioré la mobilité, mais la sécurité des usagers de la route demeure un enjeu majeur, notamment pour les motocyclistes, dont la mortalité reste préoccupante. Contrairement aux automobilistes, qui ont bénéficié de nombreuses avancées technologiques en matière de sécurité, les conducteurs de deux-roues motorisés (2RM) restent particulièrement vulnérables aux accidents. Les systèmes avancés d'aide à la conduite, appelés ADAS, ont contribué à réduire l’accidentalité pour les voitures. Pour les 2RM, des systèmes équivalents nommés ARAS ont été développés. Toutefois, cela soulève plusieurs questions essentielles : **quels sont les ARAS spécifiquement conçus pour les 2RM ?** et **quel est leur impact sur l'accidentalité des motocyclistes ?** Ces interrogations sont au cœur de cette thèse. Pour y répondre, cette thèse a suivi une approche en plusieurs étapes. Tout d’abord, une revue de la littérature a été réalisée pour recenser les ARAS déjà développés ou en cours de développement pour les 2RM. Ensuite, cinq études distinctes ont été menées afin d'évaluer l'efficacité de ces technologies sur les accidents de la route. Ces études s'appuient sur des méthodologies variées, basées sur l'analyse de cas d'accidents réels extraits de plusieurs bases de données. Elles couvrent à la fois des aspects qualitatifs, en examinant les défaillances des motocyclistes juste avant l’impact, et des aspects quantitatifs en simulant l’effet des ARAS sur des accidents réels reconstitués. Les résultats obtenus fournissent des estimations sur les bénéfices potentiels des ARAS en termes de réduction de l'accidentalité des 2RM. Enfin, cette thèse propose plusieurs perspectives et recommandations pour contribuer à l'amélioration de la sécurité des usagers de 2RM.

Mots clés : Deux roues motorisées, ARAS, Accident, Sécurité routière.

Abstract

The rise of transportation has improved mobility, but road user safety remains a major concern, particularly for motorcyclists, whose mortality rate remains alarming. Unlike drivers, who have benefited from numerous technological advancements in safety, motorcyclists remain particularly vulnerable to accidents. Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) have helped reduce accident rates for cars. For PTWs, equivalent systems called Advanced Rider Assistance Systems (ARAS) have been developed. However, this raises several questions: which ARAS are specifically designed for PTWs, and what is their impact on motorcycle accident rates? These questions are at the core of this thesis. To address them, this research follows a multi-step approach. First, a literature review was conducted to identify ARAS already developed or under development for PTWs. Then, five distinct studies were carried out to assess the effectiveness of these technologies in reducing road accidents. These studies rely on various methodologies, including the analysis of real accident cases extracted from multiple databases. They cover both qualitative aspects, by examining motorcyclist failures just before impact, and quantitative aspects, by simulating the effect of ARAS on reconstructed real-life accidents. The results provide estimates of the potential benefits of ARAS in reducing motorcycle accident rates. Finally, this thesis offers several perspectives and recommendations to improve PTW rider safety.

Keywords: Power two wheelers, ARAS, Crashes, Road safety.

Remerciements

« Nous devons trouver le temps de nous arrêter et de remercier les personnes qui font une différence dans nos vies » **John F. Kennedy**

Tout d'abord je tiens à remercier mes directeurs de thèse, Thierry SERRE, directeur de recherche au LMA, Ebrahim RIAHI, chargé de recherche au LMA, pour la confiance qu'ils m'ont accordée pour mener à bien cette aventure scientifique. Ils ont toujours été à mes côtés pour m'encadrer, partager leur expertise, et approfondir des sujets lorsque cela était nécessaire. Je leur suis infiniment reconnaissant pour l'ambiance de travail conviviale qu'ils ont instaurée, ainsi que pour leurs encouragements et leur soutien tout au long des différentes étapes de ce parcours, qui m'ont permis d'évoluer tant sur le plan académique que personnel.

Je tiens également à remercier tous les membres du LMA pour leur soutien, de près ou de loin, pour l'aboutissement de ces travaux de thèse. Je remercie Claire NAUDE pour les travaux que nous avons menés ensemble, ainsi que pour ses nombreuses relectures. J'exprime ma gratitude à Frédérique HERNANDEZ, directrice du laboratoire, pour ces conseils et ces encouragements. Je remercie ceux avec qui j'ai partagé mon bureau, en particulier Selim. J'ai vécu l'une des plus belles périodes de ma vie au sein du LMA, entre les moments de partage et de convivialité organisés par APIO, et les discussions autour du café de 16h, les parties de ping-pong et de pétanque… Pour tout cela, je remercie chaleureusement : JYF, PVE, Nicolas, Christophe, Zoé, Adrien, Cécile, Bastien, Céline, Aurélie, Hugo, PJP, Luis, Yanis, Jean-Philipe, Martin, Fitahiana, Jennifer, Marie-Claude, Christine, Isabelle R-C, Isabelle Aillerie, Daniel, Dominique, Lucas et Fanny. Un remerciement particulier au personnel administratif, notamment Christelle, Anne-Laure (Paix à son âme), Matthieu, Sébastien, Christophe et Philippe, Daniele et Marie. Je souhaite également remercier le directeur du campus Méditerranée, Jean-Paul MIZZI.

Mes remerciements vont aussi à M. Abderrahmane BOUBZOUL et M. Michel BASSET pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse. J'exprime également ma gratitude à Mme Lydie NOUVELIERE et M. Said MAMMAR d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Enfin, je termine mes remerciements par les personnes qui, par leur soutien indéfectible et leur amour inconditionnel ont été une source précieuse de motivation et de réconfort : Ma famille.

À mes parents, qui m'ont appris la valeur du travail, de la persévérance et de l'humilité. Votre présence et vos encouragements ont été une source de motivation inestimable. Vous avez toujours été un modèle de sagesse, de soutien et d'amour inconditionnel, et grâce à vous, je sais que chaque effort en vaut la peine. Les valeurs que vous m'avez inculquées ont éclairé mon chemin vers la réussite.

À mon frère Said et ma belle-sœur Wassila, ainsi qu'à mes anges : Islam, Nada, Mohammed-Mehdi et la dernière arrivée en 2025, Kenza. À ma sœur Nadira et son mari Nadjim, ainsi qu'à mes chérubins : Sara et Amina. À ma sœur Hanane et son mari Mohammed, ainsi qu'à mes petits trésors : Adel et Myriam. Chacun de vous a eu une touche particulière dans mon parcours, apportant une énergie unique et une source d'inspiration qui m'ont poussé à aller toujours plus loin. Merci à vous tous !!!

Je ne peux pas terminer ces remerciements sans adresser mes plus sincères mots à ma chère épouse Wissem. Tu as été à mes côtés pour m'épauler avec amour et bienveillance, tendresse et compassion. Ta présence et ton soutien ont été ma plus grande force. Merci infiniment !

Table des matières

Affidavit **2**

Liste de publications et participation aux conférences **4**

Chapitre I

Contexte, motivations et objectifs de la thèse

I.1 Introduction à l'accidentologie routière **3**

I.2 L'accidentalité en chiffre **5**

I.3 Spécificités des risques liés aux 2RM **14**

I.4 Objectifs et enjeux de la thèse **16**

I.5 Organisation du manuscrit **23**

Chapitre II

Les systèmes d'aides à la conduite pour les 2RM (ARAS)

II.1 Définition des systèmes d'aide à la conduite **28**

II.2 Evaluations des ARAS pour les 2RM **38**

Chapitre III

Outils & Méthodologie générale

III.1 Les outils utilisés **43**

III.2 Méthodologie générale de la thèse **62**

III.3 Conclusion **64**

Chapitre IV

Analyse qualitative des effets des ARAS

IV.1 Revue de littérature des analyses globales des ARAS **67**

IV.2 Matériel et méthodes **69**

IV.3 Résultats et discussions **86**

IV.4 Conclusion **97**

Chapitre V

Analyse de l'effet d'un Active Cruise Control sur les accidents des 2RM

V.1 Revue de littérature 101

V.2 Matériel et méthodes 103

V.3 Résultats de l'étude 113

V.4 Discussions 127

V.5 Conclusion 131

Chapitre VI

Analyse de l'effet d'un Motorcycle Stability Control

VI.1 Revue de littérature 135

VI.2 Matériels et méthodes 137

VI.3 Résultats de l'étude 142

VI.4 Discussion et conclusion 146

Chapitre VII

Analyse de la technologie de détection de collision pour les 2RM

VII.1 Revue de littérature 150

VII.2 Matériel et méthodes 154

VII.3 Résultats de l'étude 157

VII.4 Discussions 164

VII.5 Conclusion 167

Chapitre VIII

Analyse de l'effet d'un Autonomous Emergency Braking

VIII.1 Revue de littérature 171

VIII.2 Matériels et méthodes 175

VIII.3 Résultats de l'étude 182

VIII.4 Discussions 195

VIII.5 Conclusion 197

Chapitre IX

Conclusions, Perspectives et Recommandation

IX.1 Principaux résultats et limites 202

IX.2 Perspectives et recommandations 205

IX.3 Conclusion générale 210

Références bibliographiques 229

Annexes 238

Table des figures

Chapitre I

Figure I. 1. Évolution du nombre de décès routiers par catégorie d'usagers : comparaison entre 2022 et 2012 (ITF, 2023) 5
Figure I. 2. Évolution de la mortalité en France selon le mode de déplacement (ONISR 2024). 6
Figure I. 3. Statistique de mortalité et de blessés graves sur les routes françaises en 2023 (ONISR 2024) 7
Figure I. 4. Statistique d'accidentalité des 2RM en fonction du type des lieux 8
Figure I. 5. Statistiques d'accidentalité des 2RM en fonction du type de facteurs liés à l'usager 9
Figure I. 6. Statistique d'accidentalité des 2RM en fonction du type de manœuvres avant le choc 10
Figure I. 7. Statistique d'accidentalité des 2RM en fonction du type de 2RM..... 11
Figure I. 8. Statistique d'accidentalité des 2RM en fonction du type de de la route 12
Figure I. 9. Statistique d'accidentalité des 2RM en fonction de la vitesse maximum autorisée 13
Figure I. 10. Statistique d'accidentalité des 2RM en fonction de la vitesse maximum autorisée 13
Figure I. 11. Premier prototype d'une moto 20

Chapitre II

Figure II. 1. Niveaux d'automatisation des véhicules 29
Figure II. 2. Architecture des systèmes ADAS 32

Chapitre III

Figure III. 1. Méthodologie des EDA 44
Figure III. 2. Schéma d'un accident 48
Figure III. 3. Exemple d'accident 2RM 49
Figure III. 4. Situation de conduite 49
Figure III. 5. Moment de rupture 49
Figure III. 6. Situation d'urgence 50
Figure III. 7. Phase de collision 50
Figure III. 8. Aperçu du logiciel ANAC 55
Figure III. 9. Fréquence cumulée en fonction de la vitesse d'impact (en jaune), avec la régression logistique (en rouge) 59
Figure III. 10. Distribution des cas d'accidents en fonction des la vitesse d'impact dans les bases locales EDA +IGLAD 60
Figure III. 11. Distribution des vitesses d'impact sur la base de données nationale..... 61
Figure III. 12. Distribution des accidents en fonction de la vitesse d'impact avec régression gaussienne 62
Figure III. 13. Méthodologie générale 64

Chapitre IV

Figure IV. 1. Modèle de fonctionnement de l'opérateur humain (Van Elslande et al., 2023) 72
Figure IV. 1. Modèle de fonctionnement de l'opérateur humain (Van Elslande et al., 2023) 72
Figure IV. 2. Grille d'analyse des défaillances fonctionnelles des opérateurs de conduite 76
Figure IV. 3. Modèles méthodologiques pour créer un lien entre les ARAS, les besoins et les défaillances. 82
Figure IV. 4. Exemple explicatif de la méthodologie d'analyse des accidents 84
Figure IV. 5. Distribution des types de défaillances fonctionnelles dans les accidents analysés 86
Figure IV. 6. Matrice de liens entre défaillances fonctionnelles, besoins des conducteurs et systèmes ARAS 91
Figure IV. 7. Effet des ARAS sur les accidents 93
Figure IV. 8. Fréquence d'intervention de chaque ARAS 95

Chapitre V

Figure V. 1. Les paramètres de l'ACC 104
Figure V. 2. Diagramme d'accident avec et sans freinage du motard 106
Figure V. 3. Étapes de calcul 109
Figure V. 5. Répartition statistique des vitesses d'impact : 49 cas 110
Figure V. 6. Proportion des accidents et risque de blessure en fonction de la vitesse d'impact 111
Figure V. 7. Multiplication de la courbe de risque avec les proportions des accidents sans ACC 111
Figure V. 8. Calcul des proportions des accidents avec ACC confortable 112
Figure V. 9. Répartitions accidents sans ACC et avec ACC Confortable, courbe de risque, et répartition des blessés graves avec et sans ACC Confortable 112
Figure V. 10. Proportions de blessés graves avec et sans ACC. 113
Figure V. 11. Estimation des bénéfices de l'ACC à 30 m pour tous les cas d'accident 116
Figure V. 13. Estimation des bénéfices de l'ACC en mode dynamique à 30 m pour les cas d'accidents inévitables. 117
Figure V. 12. Estimation des bénéfices de l'ACC en mode confortable à 30 m pour les cas d'accidents inévitables. 117
Figure V. 14. Estimation des bénéfices de l'ACC à 40 m pour tous les cas d'accident 118
Figure V. 15. Estimation des bénéfices de l'ACC en mode confortable à 40 m pour les cas d'accidents inévitables. 119
Figure V. 16. Estimation des bénéfices de l'ACC en mode dynamique à 40 m pour les cas d'accidents inévitables. 120
Figure V. 18. Répartition des accidents en fonction de la vitesse d'impact dans les différents modes : Sans ACC (173 cas) - ACC Confortable (103 cas) - ACC Dynamique (88 cas), distance de déclenchement 30 m. 122
Figure V. 19. Les trois courbes de distribution des accidents en fonction des vitesses d'impact avec et sans ACC, distance de déclenchement 30 m. 123
Figure V. 20. Répartition des accidents en fonction de la vitesse d'impact dans les différents modes : Sans ACC (173 cas) - ACC Confortable (96 cas) - ACC Dynamique (77 cas), distance de déclenchement à 40 m 123
Figure V. 21. Les trois courbes de distribution des accidents en fonction des vitesses d'impact avec et sans ACC pour une distance de déclenchement de 40 m. 124
Figure V. 22. Bénéfice de l'ACC en mode confortable à 30 m 125
Figure V. 23. Bénéfice de l'ACC en mode dynamique à 30 m 125
Figure V. 24. Bénéfice de l'ACC en mode confortable à 40 m 126

Figure V. 25. Bénéfice de l'ACC en mode dynamique à 40m 127

Chapitre VI

Figure VI. 1. Distance de freinage 139
Figure VI. 2. Dynamique d'une moto en virage 140
Figure VI. 3. Cercle de Kamm 141
Figure VI. 4. Effet du MSC 144
Figure VI. 5. Effets potentiels du MSC en virage à droite et en virage à gauche 145

Chapitre VII

Figure VII. 1. Méthodologie de changement de repère pour les reconstitutions des accidents 156
Figure VII. 2. Évolution de la distance d'approche des véhicules adverses par rapport au 2RM. Données globales = 90 cas. 157
Figure VII. 3. Évolution de la position des véhicules adverses par rapport au 2RM. Données globales = 90 cas 159
Figure VII. 4. Évolution de la distance d'approche des véhicules adverses par rapport au 2RM. Données en agglomération = 55 cas. 160
Figure VII. 5. Évolution de la position des véhicules adverses par rapport au 2RM. Données en agglomération = 55 cas. 161
Figure VII. 6. Évolution de la distance d'approche des véhicules adverses par rapport au 2RM. Données hors agglomération = 35 cas. 162
Figure VII. 7. Évolution de la position des véhicules adverses par rapport au 2RM. Données hors agglomération = 35 cas. 163

Chapitre VIII

Figure VIII. 1. Algorithme de l'AEB (Naude et al., 2022) 177
Figure VIII. 2. Application de l'analyse de l'AEB 180
Figure VIII. 3. Graphique méthodologique du calcul de l'influence de l'AEB sur les blessés graves 181
Figure VIII. 4. Bénéfice de l'AEB sur les blessés graves 182
Figure VIII. 5. Influence des paramètres AEB sur la réduction de la vitesse d'impact médiane pour 82 accidents 184
Figure VIII. 6. Bénéfices estimés des 12 configurations AEB sélectionnées pour tous les cas d'accident. 185
Figure VIII. 7. Bénéfice estimé de la configuration la plus pessimiste pour tous les accidents. Nombre de cas = 82 cas. 187
Figure VIII. 8. Répartition des cas d'accidents non évitables avec une configuration pessimiste de l'AEB, en fonction de leur vitesse d'impact, comparée à la répartition sans AEB. Nombre de cas = 75 cas. 188
Figure VIII. 9. Bénéfice estimé de la configuration la plus optimiste pour tous les accidents. Nombre de cas = 82 cas. 189
Figure VIII. 10. Répartition des cas d'accidents non évitables avec une configuration optimiste de l'AEB, en fonction de leur vitesse d'impact, comparée à la répartition sans AEB. Nombre de cas = 30 cas. 190

Figure VIII. 11. Distribution des accidents en fonction de la vitesse d'impact sans AEB et avec AEB dans les configurations pessimistes et optimiste 192
Figure VIII. 12. Les trois courbes de distribution des accidents en fonction des vitesses d'impact avec et sans AEB..... 193
Figure VIII. 13. Bénéfice de l'AEB sur les blessés graves dans la configuration la plus pessimiste. 194
Figure VIII. 14. Bénéfice de l'AEB sur les blessés graves dans la configuration la plus optimiste 195

Liste des tableaux

Tableau II. 1. Classification des ARAS 37
Tableau II. 2. Liste des ARAS sélectionnés 40

Tableau III. 1. Niveaux de gravité des blessures 56

Tableau IV. 1. Répartition des besoins des conducteurs de motocyclettes dans les accidents étudiés 88
Tableau IV. 2. Analyse pondérée des scénarios d'accidents et des effets des ARAS sur la base de données nationale 97

Tableau V. 1. Médianes des réductions de la vitesse d'impact en fonction du mode et de la distance de déclenchement (49 accidents) 114
Tableau V. 2. Médianes des réductions de vitesse d'impact pour les cas où l'ACC a eu un effet 115

Tableau VI. 1. Analyse descriptive 144

Tableau VIII. 1. Les paramètres de l'AEB 179

Liste des abréviations

2RM	Deux roues motorisées
VL	Véhicule Légers
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
HVE	Humain-Véhicule-Environnement
IRTAD	International Road Traffic and Accident Database
ONISR	Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière
BAAC	Bases de données Annuelles des Accidents Corporels
ACEM	Association des Constructeur Européens de Motocycles
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économique
DISR	Délégation Interministérielle à la Sécurité Routière
DRAST	Direction de la Recherche, de l'Animation Scientifique et Technique
GPS	Global Positioning System
ABS	Anti-lock Braking System
ARAS	Advanced Rider Assistance Systems
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
SAE	Society of Automotive Engineers
CBS	Combined Braking System
AEB	Autonomous Emergency Braking
MAEB	Motorcycle Autonomous Emergency Braking
PCB	Pre-Crash Braking
ACC	Active Cruise Control
TC	Traction Control
A-W	Anti-Wheelie
S-C	Stoppie Control
L-C	Launch Control

MSC	Motorcycle Stability Control
A-D	Anti-Dérapage
CAT	Collision Aversion Technology
AVD	Avertissement Virage Dangereux
S-H	Smart Helmets
EDA	Étude Détaillée d'Accident
INRETS	Institut National de REcherche sur les Transports et leur Sécurité
PV	Procés-Verbal
IGLAD	Initiative for the Global Harmonization of Accident Data
SC	Scenario
EES	Energy Equivalent Speed
ETS	Equivalent Test Speed
LMA	Laboratoire Mécanismes d'Accident
AIS	Abbreviated Injury Scale
MAIS	Maximum Abbreviated Injury Scale
GIDAS	German In-Depth Accident Study
GLM	Generalized Linear Models
HFF	Human Functional Failures
DREAM	Driver Reliability and Error Analysis
ACASS	Accident Causation Analysis with Seven Steps
TTC	Time To Collision
CACC	Cooperative Adaptive Cruise Control
IDM	Intelligent Driver Model
MCA	Motorcycle Curve Assist
FARS	Fatality Analysis Reporting System
NASS-GES	National Automotive Sampling System – General Estimates System
CWS	Crash Warning System

CVT	Connected Vehicle Technologie
ANOVA	ANalysis Of VAriance
PRT	Perception Response Time
SSD	Safe Stopping sight Distance
RT	Reaction Times
BSD	Blind Spot Detection
PISa	Power Two-wheelers Safety
AB	Active Braking
ABC	Active Braking Control

Chapitre I

Contexte, motivations et objectifs de la thèse

Table des matières

Chapitre I

Contexte, motivations et objectifs de la thèse

I.1 Introduction à l'accidentologie routière 3

I.2 L'accidentalité en chiffre 5

I.2.1 Tendances mondiales de l'accidentalité 5

I.2.2 Panorama de l'accidentalité en France 6

I.3 Spécificités des risques liés aux 2RM 14

I.4 Objectifs et enjeux de la thèse 16

I.4.1 Identification des problématiques des 2RM 16

I.4.2 Approches de sécurité : primaire, secondaire et tertiaire 18

I.4.3 Aperçu historique de l'évolution des 2RM 20

I.4.4 Définition des objectifs de ce projet 21

I.5 Organisation du manuscrit 23

I.1 Introduction à l'accidentologie routière

Vingt-six secondes ! C'est, en moyenne, l'intervalle de temps entre deux morts dans un accident de la route dans le monde. Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), les accidents de la route entraînent chaque année près de 1,19 million de décès. L'OMS classe les accidents de la route comme la douzième cause de décès pour toutes les tranches d'âge et, de manière encore plus préoccupante, comme la première cause de mortalité pour les jeunes âgés de 5 à 29 ans. Ces victimes, en pleine force de l'âge et au moment où elles devraient être les plus productives, voient leur vie brisée, laissant derrière elles des familles endeuillées et une société marquée par des pertes humaines et économiques considérables. Sur le plan global, les conséquences sanitaires et socio-économiques sont alarmantes : les accidents de la route représentent un coût annuel moyen équivalent à 3% du produit intérieur brut (PIB) de chaque pays (OMS, 2023). Ces chiffres illustrent l'urgence d'agir pour réduire ce fléau mondial.

L'accidentologie est une discipline scientifique dédiée à l'étude approfondie des accidents de la route et des risques qui leur sont associés (Huguenin-Richard et al., 2000). Son objectif principal est d'identifier les causes profondes et les facteurs contributifs spécifiques à chaque accident, afin de développer des solutions visant à renforcer la sécurité des usagers de la route (Rivers, 1980). Contrairement aux objectifs de la police et de la gendarmerie, qui consistent à déterminer les responsabilités dans un accident, ou aux objectifs des politiques gouvernementales, souvent limités à des analyses statistiques globales pour alimenter des stratégies de gestion, l'accidentologie adopte une approche systémique et préventive.

Dans cette approche, l'accident est l'élément central et il est étudié de manière clinique. Le dictionnaire Larousse, par exemple, propose plusieurs définitions de ce terme. L'une d'entre elles est : « *Événement fortuit qui a des effets plus ou moins dommageables pour les personnes ou pour les choses* », que l'on peut qualifier, « *d'imprévisible* ». Une autre définition, « que l'on peut qualifier *d'imprévu* », décrit l'accident comme un « *événement inattendu, non conforme à ce qu'on pouvait raisonnablement prévoir, mais qui ne le modifie pas fondamentalement* ». On observe ici une certaine équivocité entre les termes « imprévisible » et « imprévu ». Cette nuance repose sur l'importance accordée à ces deux notions : alors que l'imprévisible renvoie à quelque chose d'inévitable par nature, l'imprévu résulte davantage d'un manque d'anticipation et pourrait donc, en théorie, être évité. Par ailleurs, dans le domaine scientifique, l'accident est considéré comme un dysfonctionnement du système de conduite, lequel a été décrit par Evans (1991) et Sweatman (2025) comme étant constitué des éléments suivants :

- L'humain : Il est au cœur du système de conduite, représentant l'élément le plus complexe et imprévisible. Ses capacités cognitives, ses compétences techniques et son état émotionnel influencent directement la sécurité routière. Des facteurs comme la fatigue, le stress, ou encore l'inattention jouent un rôle majeur dans les accidents, tout comme les comportements intentionnels tels que l'excès de vitesse ou l'utilisation du

téléphone. Par ailleurs, l'âge, l'expérience et l'état de santé déterminent la manière dont une personne perçoit et réagit aux risques (Reason, 1990).

- Le véhicule : Il constitue l'outil principal du système de conduite, et ses caractéristiques techniques influencent directement la sécurité. Les avancées technologiques visent à compenser les erreurs humaines et à améliorer la prévention des accidents. Cependant, des défaillances mécaniques ou électroniques, dues à un manque d'entretien ou à des problèmes de conception, peuvent représenter un danger important. En outre, les innovations récentes, telles que les aides à la conduite et les voitures autonomes, redéfinissent le rôle du véhicule, mais soulèvent également de nouveaux défis en matière de fiabilité.
- L'environnement : Il regroupe les conditions externes qui influencent la conduite, comme l'infrastructure routière, les conditions météorologiques et les interactions avec les autres usagers. Une route bien entretenue, dotée d'une signalisation et d'aménagements clairs et adaptés, contribue à prévenir les accidents, tandis que des facteurs tels que le verglas, le brouillard ou l'absence d'éclairage augmentent les risques. Les zones urbaines densément peuplées et les espaces partagés entre véhicules, piétons et cyclistes ajoutent une complexité supplémentaire au système.

Ces trois composantes « HVE » interagissent de manière dynamique pour former le système de conduite. Un accident est interprété comme une « histoire » unique, constituée de séquences d'évènements interconnectés. Il peut être décomposé en plusieurs phases, allant de la situation de conduite jusqu'à la situation de post-choc, en passant par la situation de rupture, et les situations d'urgence et de choc (Ferrandez et al., 1985). La situation de conduite dresse le décor et définit les acteurs. La phase de rupture confronte les participants à un problème qu'il faut résoudre, qui les pousse à une recherche hâtive de solution : c'est la situation d'urgence. Finalement, la situation de choc témoigne de l'échec de la solution (Ferrandez et al., 1985). La situation de post-choc est le résultat des dysfonctionnements survenus lors des étapes précédentes, et elle se termine lorsque les véhicules atteignent leurs positions finales. L'analyse de l'accident se fait en remontant dans le temps parce que cela permet de calculer les vitesses de choc et d'approche du véhicule. La phase de choc peut être traitée de manière numérique et expérimentale (crash-test) (Limpert, 2021). La phase de pré-choc, qui regroupe les situations de conduite, de rupture et d'urgence, est plus difficile à aborder car elle implique plusieurs hypothèses qu'il faut évaluer pour déterminer ce que le conducteur a réellement fait. Une section du chapitre III décrit plus en détails cette décomposition en phases de chaque accident, ainsi que les méthodologies de reconstitution des accidents.

En pratique, l'accidentologie mobilise des méthodes variées : analyses statistiques des données d'accidents, enquêtes de terrain, simulations comportementales et études expérimentales. Ces outils permettent d'explorer des questions importantes telles que l'influence de l'alcool, de la vitesse ou des conditions météorologiques sur le risque routier. Les connaissances issues de ces travaux sont ensuite utilisées pour orienter les politiques publiques, améliorer les infrastructures routières, développer des technologies de sécurité embarquées et sensibiliser les conducteurs à adopter des comportements responsables.

I.2 L’accidentalité en chiffres

I.2.1 Tendances mondiales de l'accidentalité

La sécurité routière demeure un enjeu mondial majeur, en particulier pour les usagers vulnérables tels que les motocyclistes. Les chiffres récents de l’International Traffic Safety Data and Analysis Group (IRTAD) soulignent les disparités frappantes dans l’évolution des accidents de la route selon les modes de déplacement (Figure I.1). En se basant sur les données fournies par 32 pays membres de l’IRTAD, une diminution globale de 14,1% des décès routiers a été enregistrée entre 2012 et 2022. Cependant, cette tendance générale masque des dynamiques très différentes selon les catégories d’usagers (ITF, 2023).

Les occupants de voitures particulières et les piétons ont bénéficié des plus fortes réductions de mortalité, avec des baisses respectives de 26,1% et 27,3%. Ces progrès peuvent être attribués à des avancées notables comme l’amélioration des systèmes de sécurité, une meilleure conception des infrastructures, la régulation de la vitesse ou plus récemment la généralisation des dispositifs d’assistance à la conduite. Les cyclistes, quant à eux, ont enregistré une baisse plus modeste de 8,3%, reflétant peut-être une attention accrue à leur sécurité mais également une augmentation de leur usage dans de nombreux pays (ITF, 2023).

En revanche, les motocyclistes se démarquent par une tendance inquiétante : les décès les concernant ont augmenté de 19,9% sur la même période. Cette hausse contraste fortement avec les progrès réalisés pour d’autres usagers et met en lumière la vulnérabilité persistante des 2RM sur les routes.

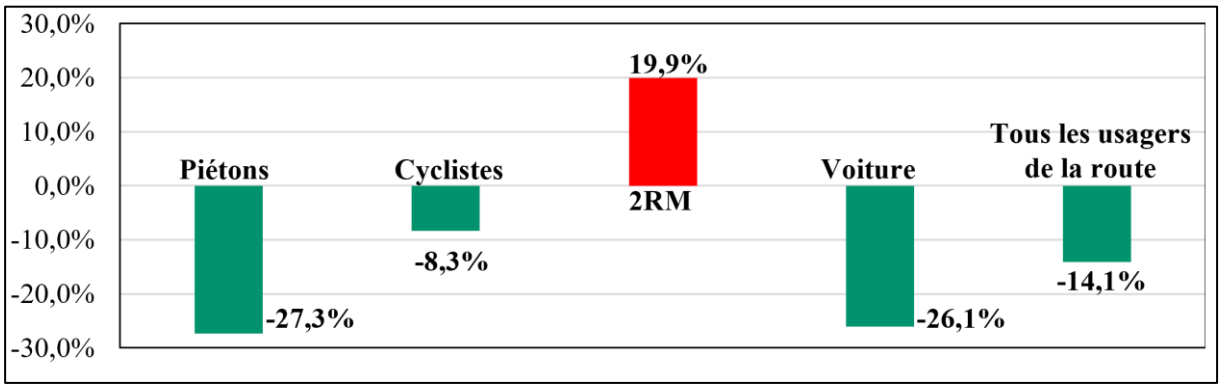


Figure I. 1. Évolution du nombre de décès routiers par catégorie d'usagers : comparaison entre 2022 et 2012 (ITF, 2023)

Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette situation préoccupante. Tout d’abord, l’augmentation du nombre de motocyclistes dans les zones urbaines et rurales, souvent motivée par leur accessibilité économique et leur capacité à éviter les congestions, a mécaniquement accru leur exposition au risque, notamment en raison de la vitesse, du problème de conspicuité etc. Par ailleurs, la faible adoption de technologies avancées de sécurité combinée à une sensibilisation insuffisante des usagers aux comportements sûrs, contribue à maintenir un niveau élevé d’accidentalité.

L’analyse des chiffres met également en évidence les défis spécifiques des 2RM. Contrairement aux voitures, ces véhicules offrent peu de protection intrinsèque en cas de collision. De plus, les conditions variées dans lesquelles ces accidents surviennent – que ce soit en zone urbaine, où les interactions avec d'autres usagers sont fréquentes, ou en zone rurale, où la vitesse est un facteur aggravant – nécessitent une approche globale pour améliorer leur sécurité. L'absence de dispositifs adaptés pour amortir les chocs latéraux ou frontaux, ainsi que le port irrégulier d’équipements de protection tels que le casque, amplifient la gravité des blessures subies par les motocyclistes.

Ces chiffres mettent également en lumière une disparité entre les efforts consentis pour protéger les différentes catégories d’usagers. Tandis que les voitures bénéficient de systèmes de sécurité avancés tels que les airbags multiples, les freins automatiques ou encore les structures déformables optimisées, les motocyclistes dépendent largement de leur propre vigilance et de dispositifs rudimentaires. L’introduction de nouvelles technologies pour 2RM reste inégale à travers le monde et souvent limitée aux modèles haut de gamme.

I.2.2 Panorama de l'accidentalité en France

L’analyse des données relatives à la mortalité et aux blessures graves sur les routes françaises met en évidence une position préoccupante des 2RM (ONISR, 2024). En ce qui concerne les décès (Figure I.2), la proportion de tués en 2RM est restée constante autour de 22-24% entre 2010 et 2023, dépassant largement celle d’autres modes de déplacement. En 2023, les usagers de 2RM représentaient 22,3% des tués sur la route, contre 13,9% pour les piétons et 7% pour les cyclistes. Les véhicules légers (VL), bien qu’ils enregistrent le plus grand nombre de décès, ont vu leur proportion de tués diminuer progressivement pour atteindre 47,7% en 2023, contre 53% en 2010.

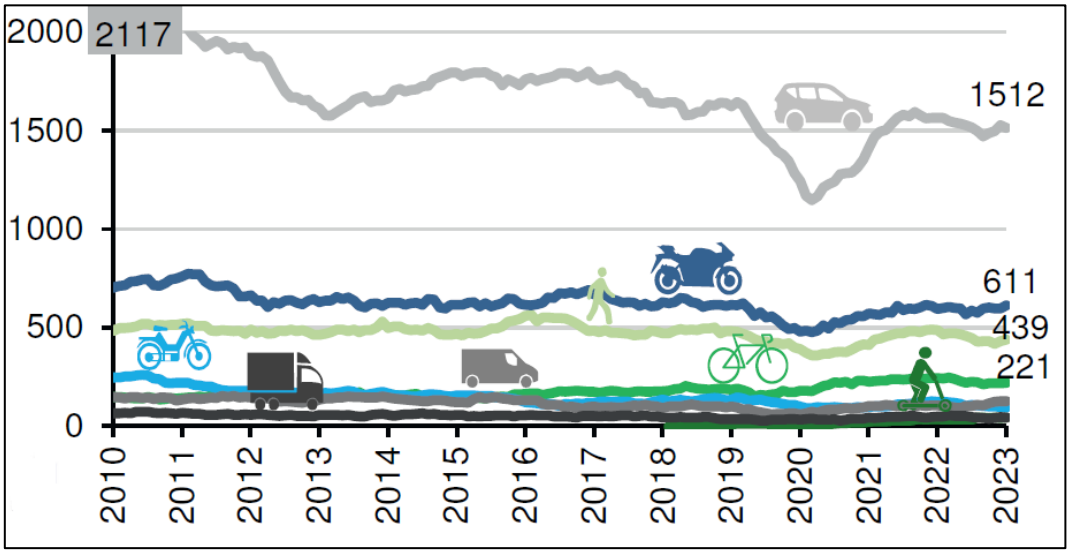


Figure I. 2. Évolution de la mortalité en France selon le mode de déplacement (ONISR 2024).

Une surreprésentation des 2RM similaire à celle des décès est également observée dans les statistiques des blessés graves. Les 2RM occupent systématiquement la première position en pourcentage de blessés graves. En 2023, les blessés graves en 2RM représentaient 34% de l'ensemble, contre 30% pour les occupants de voitures, 16% pour les cyclistes, et 13% pour les piétons (Figure I.3). Les utilisateurs de trottinettes électriques, bien que leur présence sur la route soit récente, ont représenté environ 4% des blessés graves sur la même période.

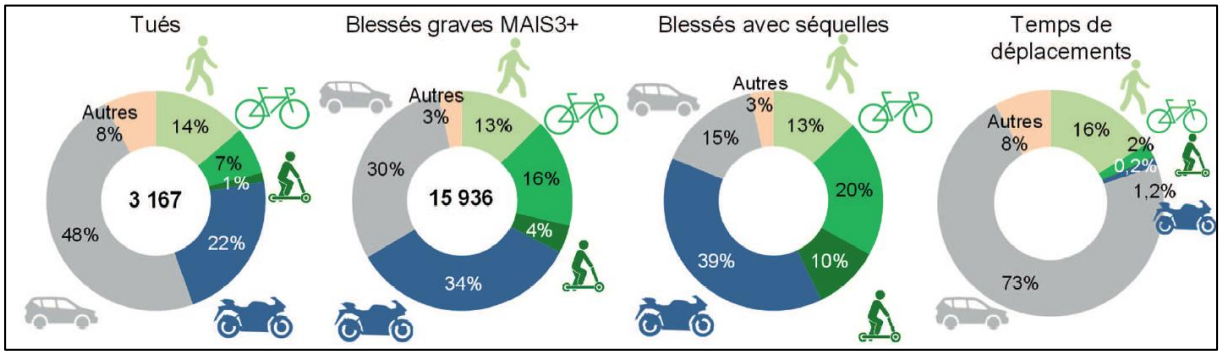


Figure I. 3. Statistique de mortalité et de blessés graves sur les routes françaises en 2023 (ONISR 2024)

Ces chiffres illustrent une vulnérabilité des usagers des 2RM, qui se traduit non seulement par une forte mortalité, mais aussi par un taux élevé de blessures graves. En comparaison avec d'autres modes de transport, les usagers de 2RM font face à des risques disproportionnés, malgré une part relativement faible du trafic routier. Cela justifie une attention particulière dans les recherches et initiatives visant à améliorer leur sécurité.

Par ailleurs l'étude des accidents impliquant des 2RM en France sur la période 2012-2022 révèle une diversité de facteurs influençant les taux de mortalité, de blessures graves, et de blessures légères.

Les données, issues de la base BAAC (Bulletin d'Analyse des Accidents de la Circulation), permettent de mieux comprendre les spécificités de l'accidentalité des 2RM selon plusieurs critères : localisation géographique, type de choc, manœuvre, type de véhicule, type de route et vitesse autorisée (ONISR, 2024). Nous donnons ici les principaux résultats qui vont nous permettre de définir les enjeux dans le cadre de cette thèse.

- Accidents en agglomération et hors agglomération (Figure I.4)

Afin d'approfondir ces statistiques et de mieux définir les enjeux, nous avons réalisé une analyse des BAAC sur les années 2012-2022 dans le cadre d'un stage que nous avons encadré. Ce travail a permis de déterminer quels sont les paramètres les plus prégnants concernant l'accidentologie des 2RM (Avignant and Serre, 2024). La majorité des accidents impliquant des 2RM survient en agglomération 71%, tandis que les zones hors agglomération représentent 29%. Cependant, les conséquences des accidents diffèrent. En agglomération, les accidents entraînent 2% de décès, 31% de blessures graves et 67% de blessures légères. À l'inverse, hors agglomération, les proportions de blessés graves et de tués sont les plus importantes, atteignant respectivement 52% et 8%, par rapport aux accidents survenus en agglomération. Ainsi, la proportion de blessés légers est moins élevée hors agglomération, avec 39 %. Cette répartition souligne le caractère plus fréquent des accidents en milieu urbain, bien que leur gravité soit souvent moindre.

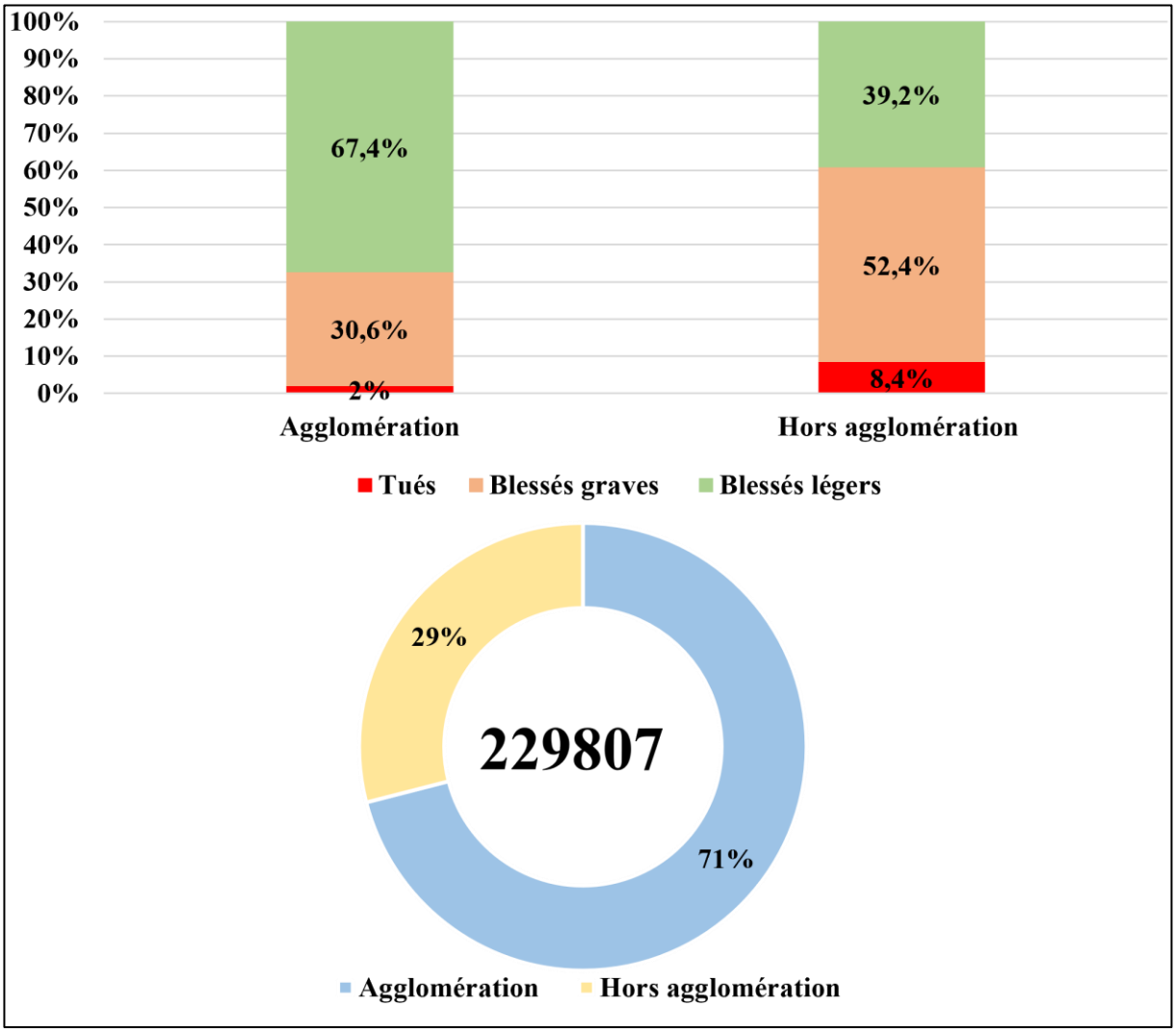


Figure I. 4. Statistique d'accidentalité des 2RM en fonction du type des lieux

- Répartition des facteurs liés à l'usager (Figure I.5)

L'analyse des facteurs d'accidents impliquant les 2RM met en évidence plusieurs éléments importants contribuant à ces accidents. Les données du BAAC présentent ces facteurs classés selon leur influence dans la survenue des accidents. Ils sont répartis en trois groupes principaux : Facteur 1, Facteur 2 et Facteur 3. Le Facteur 1, étant le plus influent, regroupe plusieurs causes majeures. Parmi elles, l'inattention représente la catégorie la plus importante avec 14,1%, suivie par la vitesse excessive 11,1% et l'alcoolémie 11%. Il est important de noter qu'un grand nombre de cas (32,5%) n'ont pas pu être renseignés et ont été classés comme "indéterminés".

De plus, la catégorie "Autres", qui regroupe plusieurs causes moins fréquentes (comme le contresens, l'éblouissement, le malaise, le suicide ou encore l'usage du téléphone), représente 14,6%. Le Facteur 2, deuxième en importance, met en évidence un impact marqué de la vitesse excessive 18,5 %, suivi de l'inattention 17,6% et du dépassement 12,4%. Enfin, le Facteur 3, bien que moins influent que les deux précédents, révèle une augmentation notable de l'impact du non-respect de la distance de sécurité 13,3%, classé en deuxième position après la vitesse excessive 18,3%. Le dépassement, quant à lui, reste un facteur important avec 12,2%.

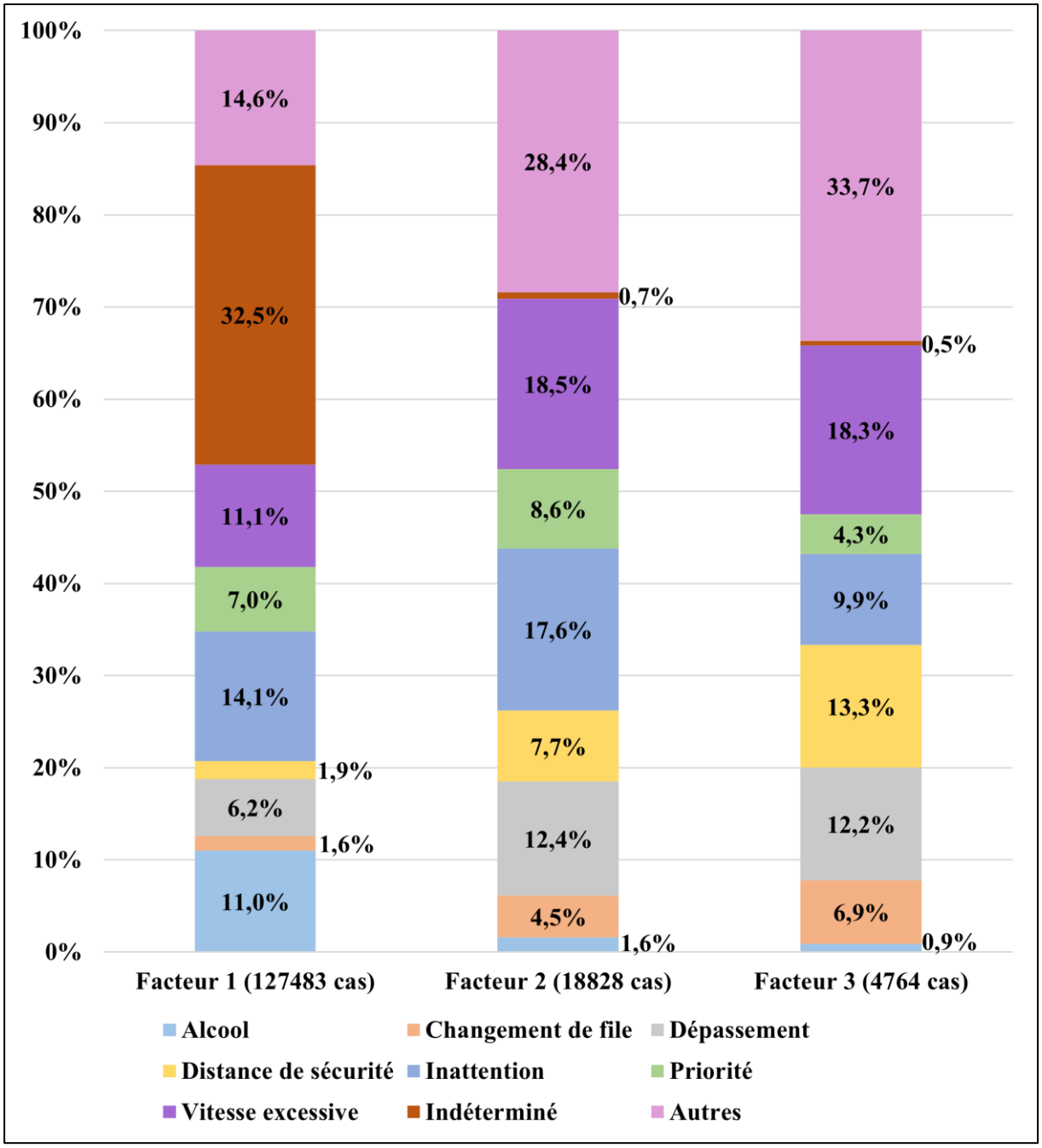


Figure I. 5. Statistiques d'accidentalité des 2RM en fonction du type de facteurs liés à l'usager

➢ Influence des manœuvres sur les accidents (Figure I.6)

Les manœuvres effectuées par les motocyclistes influencent fortement les conséquences des accidents. Les dépassements à gauche, qui représentent 10,1% des cas, conduisent à 4% de tués et 35,8% de blessés graves. Les déports à droite, bien que moins fréquents 1,9%, se révèlent particulièrement dangereux avec 8,8% de tués et 43,7% de blessés graves.

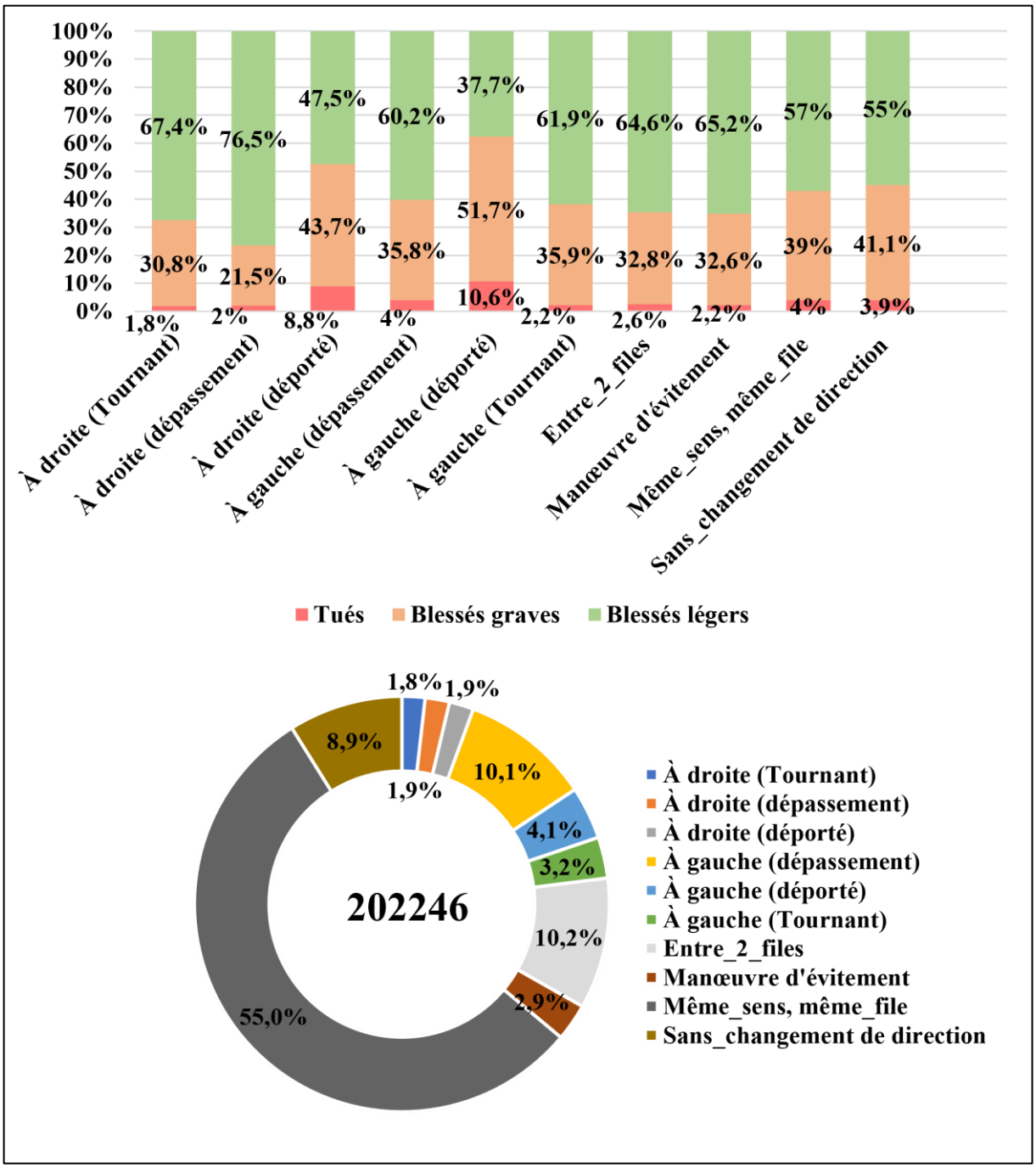


Figure I. 6. Statistique d'accidentalité des 2RM en fonction du type de manœuvres avant le choc

De manière similaire, les déports à gauche, avec 4,1% des accidents, affichent un taux élevé de mortalité 10,6% et de blessés graves 51,7%, faisant d'eux l'une des manœuvres les plus risquées. En revanche, les accidents survenant dans la même file et sans changement de direction, qui représentent respectivement 55% et 8,9% des cas, bien qu'abondants, présentent des proportions de mortalité inférieur (4% et 3,9%, respectivement). En outre, les manœuvres

telles que le tournant à droite, le tournant à gauche ou les manœuvres d'évitement présentent les taux de mortalité les plus faibles, variant de 1,8% pour les tournants à droite à 2,2% pour les tournants à gauche et les manœuvres d'évitement.

- Impact du type de véhicule (Figure I.7)

Le type de 2RM utilisé joue également un rôle essentiel. Les motocyclettes de plus de 125 cm³ sont impliquées dans 39,1% des accidents et enregistrent les proportions les plus élevées de tués 6,3 % et de blessés graves 43,5%. À l'opposé, les scooters de moins de 50 cm³, représentant 16,7% des accidents, présentent des taux plus faibles de mortalité 1,9% et de blessés graves 30%, mais une proportion élevée de blessés légers 68,1%.

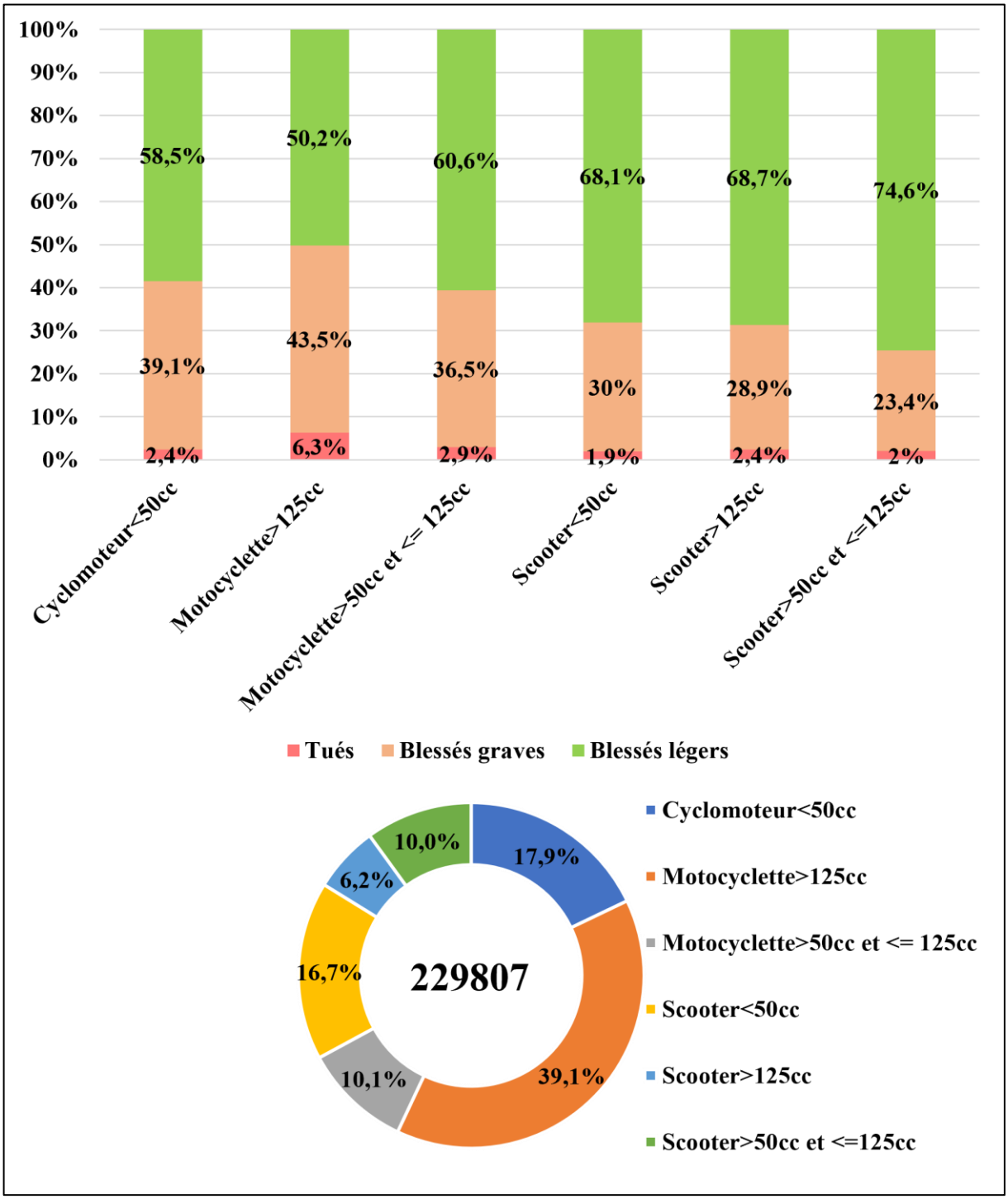


Figure I. 7. Statistique d'accidentalité des 2RM en fonction du type de 2RM

Les cyclomoteurs de moins de 50 cm³, bien qu'impliqués dans 17,9% des accidents, montrent une gravité intermédiaire avec 2,4% de tués et 39,1% de blessés graves.

- Influence du type de route (Figure I.8)

La gravité des accidents varie également en fonction du type de route. Les accidents sur routes départementales, qui représentent 34,8% des cas, affichent les taux les plus élevés de tués 6,8% et de blessés graves 51,9%, contrastant avec les voies communales, où les proportions sont de 1,6% pour les tués et 27,4% pour les blessés graves.

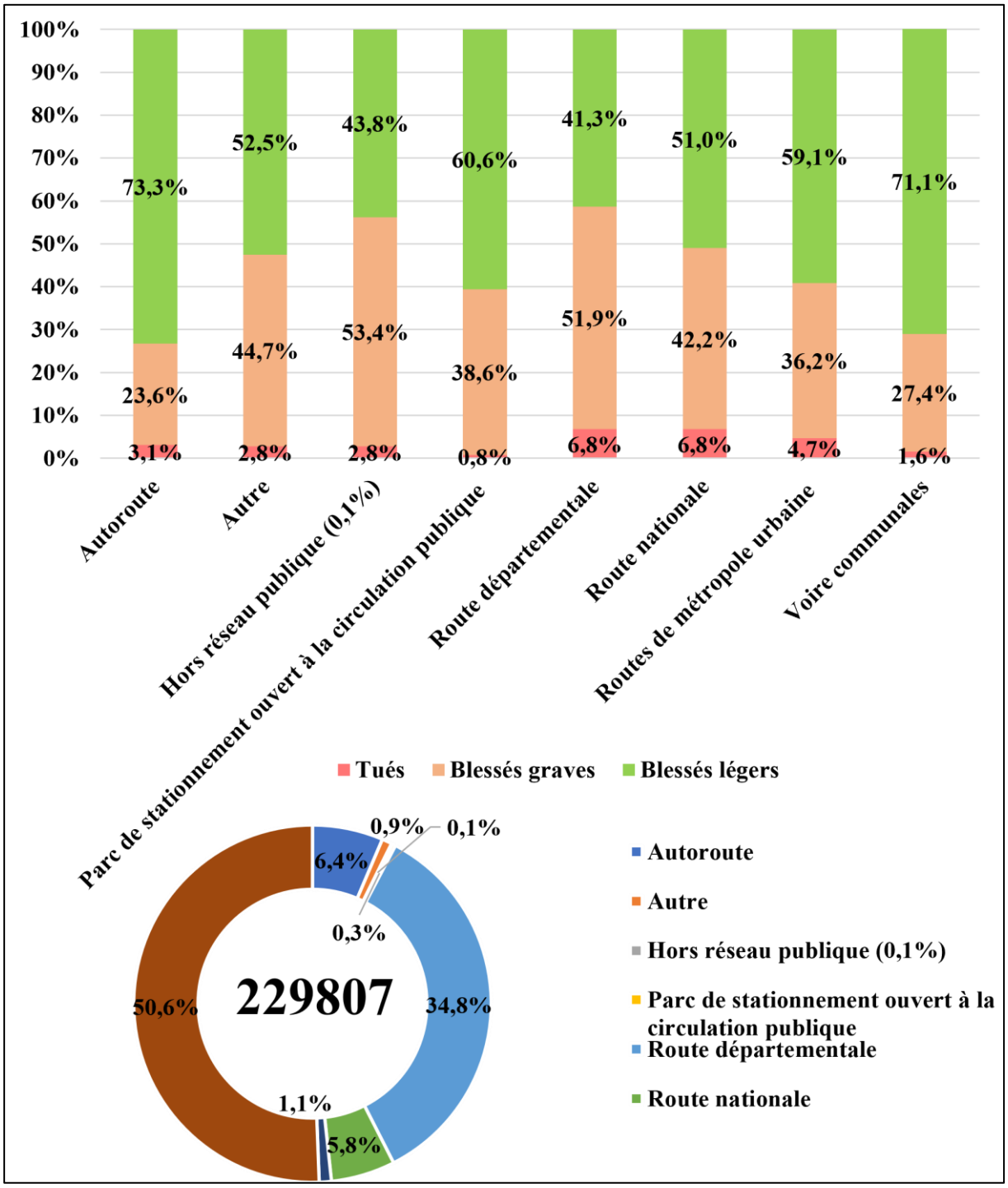


Figure I. 8. Statistique d'accidentalité des 2RM en fonction du type de de la route

Les autoroutes, bien qu'elles ne représentent que 6,4% des accidents, enregistrent un taux relativement élevé de blessés graves 23,6% et une faible proportion de tués 3,1%.

➢ Effet de la vitesse maximale autorisée (Figure I.9)

Enfin, la vitesse maximale autorisée est l'un des facteurs pris en compte dans les données du BAAC. Les zones à 80 km/h, qui concentrent 14,1% des accidents, enregistrent 10,3% de tués et 62,8% de blessés graves, ce qui en fait les plus graves parmi les limites étudiées. En comparaison, les zones à 50 km/h, représentant 59% des accidents, montrent des proportions moindres de tués 2,3% et de blessés graves 28,9%. Les limites de vitesse élevées, comme 130 km/h (0,4% des accidents), présentent un taux très élevé de mortalité 13%, bien que la fréquence des accidents y soit plus faible.

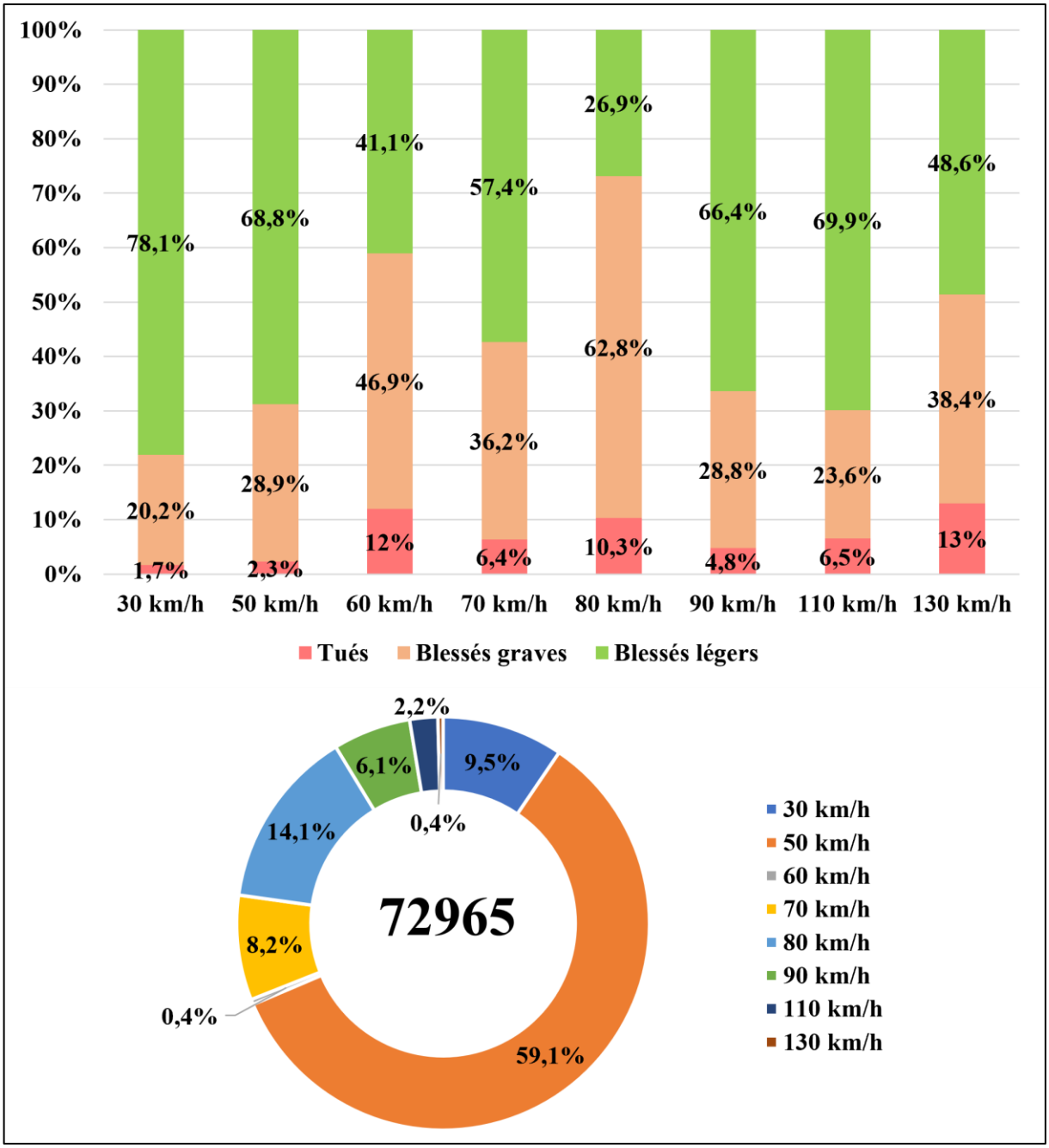


Figure I. 9. Statistique d'accidentalité des 2RM en fonction de la vitesse maximum autorisée

Cette analyse met en évidence la diversité des facteurs influençant la gravité des accidents impliquant des 2RM. Les résultats soulignent des vulnérabilités spécifiques liées au type de route, aux facteurs, aux manœuvres, et aux caractéristiques des véhicules. Ces informations fournissent des bases importantes pour identifier et comprendre les différentes

problématiques liées au 2RM, ainsi que pour développer des stratégies de prévention adaptées à leurs caractéristiques et aux contextes spécifiques de leur utilisation.

I.3 Spécificités des risques liés aux 2RM

Dans le projet mené par Sexton et al. (2004), les auteurs ont cherché à comprendre et quantifier les facteurs influençant les risques d'accidents et de blessures chez les motocyclistes. Une enquête a été réalisée auprès de 30000 motocyclistes, avec 11360 réponses exploitables. Ces données ont été analysées à l'aide de modélisations statistiques pour évaluer l'impact de variables telles que l'âge, l'expérience, le kilométrage et les comportements de conduite. Les principaux problèmes identifiés pour les 2RM sont les risques chez les jeunes conducteurs et les débutants, le lien entre les erreurs de perception ou de contrôle et les accidents, ainsi que l'influence des comportements risqués motivés par la recherche de sensations fortes.

De même, Hurst (2011) a réalisé une analyse statistique visant à comparer les collisions graves et mortelles entre deux catégories de 2RM : les motos de cylindrée inférieure à 125 cm^3 et celles de cylindrée supérieure à 125 cm^3. Cette analyse s'appuyait sur des données issues de la région des Cornouailles, extraites de la base de données STATs19. L'auteur a identifié que, pour les motos de cylindrée inférieure à 125 cm^3, l'excès de vitesse constituait le principal facteur des collisions mortelles, suivi par les défaillances de diagnostic et de perception. En revanche, pour les motos de cylindrée supérieure à 125 cm^3, l'inexpérience représentait le facteur prédominant, suivie par la vitesse excessive et les défaillances de diagnostic et de perception.

L'Association des Constructeurs Européens de Motocycles (ACEM) a mené un projet intitulé "MAIDS" (Motorcycle Accident In-Depth Study) dans le but d'explorer en profondeur les causes des accidents impliquant des 2RM et d'identifier les principaux facteurs de risque (ACEM, 2008). Cette étude, soutenue par la Commission Européenne, a analysé 921 accidents de cyclomoteurs et motos survenus entre 1999 et 2000 dans cinq pays européens : France, Allemagne, Italie, Pays-Bas, Espagne. La méthodologie utilisée, développée par l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques), consistait en une enquête approfondie sur les lieux des accidents. Pour chaque accident, une reconstitution complète a été réalisée, incluant l'inspection des véhicules, l'interrogation des témoins et la collecte de données médicales, dans le respect des lois sur la vie privée. Parallèlement, 923 cas-témoins de conducteurs de 2RM non impliqués dans des accidents ont été analysés pour évaluer les facteurs d'exposition au risque. Cette approche comparative a permis d'identifier les liens entre divers facteurs humains, environnementaux et techniques et la survenue des accidents. Les résultats ont révélé que les facteurs humains jouent un rôle prépondérant dans la majorité des accidents de 2RM, la défaillance de perception se distinguant comme la principale cause identifiée.

Une autre étude menée par Subirats (2011) visait à mieux comprendre le comportement des conducteurs de 2RM lors de leur passage dans des carrefours giratoires, en se concentrant sur les phases de décélération, de franchissement et de réaccélération. La méthodologie

employée consistait à analyser les vitesses, trajectoires, inclinaisons et cinématiques des motos instrumentées sur plusieurs sections du giratoire, tout en comparant ces comportements à ceux des véhicules légers. L'étude met en évidence les défis spécifiques de la maniabilité des motos dans les giratoires et les virages en général. Notamment, les motards sont réticents à freiner fortement lorsque leur véhicule est incliné, par crainte de perdre l'adhérence. De plus, contrairement aux véhicules légers qui réaccélèrent dès l'entrée dans le giratoire, les motards préfèrent attendre la sortie, une fois la moto redressée, pour réaccélérer fortement. Ces comportements reflètent la prudence des conducteurs de 2RM face aux contraintes dynamiques particulières des giratoires. L'étude souligne la nécessité de prendre en compte ces spécificités dans la recherche de solution pour améliorer la sécurité des 2RM.

Le rapport du préfet Guyot (Guyot, 2008), mandaté par la « *Délégation interministérielle à la sécurité routière* » (DISR) et la « *Direction de la recherche, de l'animation scientifique et technique* » (DRAST), a dressé un état des lieux des risques auxquels sont confrontés les usagers de 2RM et proposé des mesures pour améliorer leur sécurité en France. Ce rapport s'appuie sur une analyse approfondie de données statistiques recueillies sur une période de dix ans, permettant de mieux comprendre les facteurs contribuant aux accidents impliquant des 2RM en France.

Le rapport commence par identifier plusieurs problématiques liées à la sécurité des usagers de 2RM. Tout d'abord, un des principaux défis soulevés est le problème de la détectabilité des 2RM par les automobilistes. Ce point est particulièrement souligné par des associations comme la Fédération Française des Motards en Colère, qui réclament une meilleure visibilité des 2RM dans le trafic. Ce manque de visibilité peut être lié à des angles morts dans les rétroviseurs des automobilistes ou à une sous-estimation de la vitesse et de la position des motos sur la route. Un autre problème majeur identifié dans le rapport est la vitesse excessive et le comportement risqué des usagers de 2RM, qui seraient plus enclins à adopter des conduites dangereuses, telles que des dépassements dangereux ou l'absence de respect des limites de vitesse. Ce phénomène, souvent exacerbé par une recherche de sensation ou une mauvaise gestion des risques, entraîne un nombre élevé d'accidents graves et fatals. Le rapport met également en avant un problème d'infrastructures inadéquates pour les 2RM, comme l'absence de voies spécifiques, de bandes d'arrêt d'urgence adaptées, ou encore de dispositifs de sécurité comme des glissières adaptées aux motos. L'inadaptation des infrastructures aux spécificités du 2RM contribue largement à l'accroissement des risques d'accidents et à leur gravité, notamment dans des zones à forte densité de circulation. Un autre point soulevé dans le rapport est le manque de données spécifiques sur les accidents impliquant des 2RM. Le rapport soulève également l'insuffisance d'études scientifiques dédiées à la sécurité des usagers de 2RM, comparativement à celles consacrées aux automobilistes. Ce manque de données précises empêche une compréhension complète des facteurs de risque et ralentit l'élaboration de politiques publiques efficaces pour améliorer la sécurité des 2RM.

En réponse à ces problématiques, les auteurs du rapport formulent plusieurs recommandations pour améliorer la sécurité des usagers de 2RM en France. La limitation de la vitesse des 2RM figure parmi les mesures proposées, notamment en ville ou dans les zones particulièrement accidentogènes. Cette mesure vise à réduire les conséquences des accidents en cas de collision, en limitant la vitesse d'impact. Pour améliorer la visibilité des 2RM et réduire les risques de collisions, il est proposé l'installation de feux additionnels et de dispositifs

lumineux mieux adaptés sur les motos, afin de les rendre plus visibles pour les autres usagers de la route, en particulier dans des conditions de faible visibilité (nuit, brouillard, intempéries, etc.). L'adaptation des infrastructures routières est également une priorité, avec des recommandations pour installer des glissières de sécurité plus adaptées aux motos, qui réduiraient les blessures en cas de chute. Le rapport plaide aussi pour une meilleure prise en compte des spécificités des 2RM dans l'aménagement du territoire et la conception des routes. Des mesures de sécurité supplémentaires incluent l'obligation du port d'un casque intégral, l'amélioration des équipements de sécurité comme les vestes airbags, et un contrôle technique pour les motos âgées. En matière de formation, des propositions incluent la généralisation de la formation continue pour les acteurs concernés, et la mise en place d'un réseau de référents spécialisés dans les 2RM. En outre, le rapport propose de renforcer les études sur les blessures et le suivi médical des utilisateurs de 2RM, ainsi que d'améliorer les statistiques et la recherche pour mieux comprendre les risques liés à l'usage des 2RM. En conclusion, les auteurs du rapport insistent sur la nécessité d'une politique publique ambitieuse et spécifique pour les 2RM, qui repose sur une meilleure collecte de données, une amélioration des infrastructures, et des campagnes de sensibilisation ciblées pour les conducteurs de motos et les automobilistes.

Ce rapport pourtant très complet à l'époque ne propose pas de recommandations liées aux nouvelles technologies concernant les véhicules « 2RM ».

I.4 Objectifs et enjeux de la thèse

Dans le but de bien cerner les objectifs de la thèse, il est essentiel de comprendre les enjeux de l'accidentalité 2RM et les différentes approches développées pour y répondre, en termes de sécurité primaire, secondaire et tertiaire. Cette section présente d'abord un exposé des problématiques spécifiques aux 2RM, puis les principaux axes de développement des solutions de sécurité. Enfin, une définition des objectifs de la thèse est exposée, incluant la question de recherche et l'hypothèse de travail.

I.4.1 Identification des problématiques des 2RM

Les motocyclistes sont particulièrement exposés à des risques élevés en raison des spécificités inhérentes à leur mode de transport. Plusieurs problématiques majeures ont été identifiées à travers les études et analyses existantes :

- L'excès de vitesse des usagers de 2RM :

L'excès de vitesse est reconnu comme l'un des principaux facteurs de risque pour les motocyclistes. Les études, notamment celles de Hurst (2011), Varin et al. (2020), Guyot (2008) et Dubos et al. (2015), mettent en évidence que ce comportement est directement lié à une augmentation du nombre et de la gravité des collisions, en particulier pour les motos de grosse cylindrée. Les conducteurs de 2RM, souvent attirés par la puissance de leurs véhicules, ont

tendance à adopter des vitesses inadaptées aux conditions routières. En milieu urbain, une vitesse inadaptée dans un le trafic dense limite la visibilité et les possibilités de réaction. Sur les routes rurales ou les autoroutes, l'envie d'exploiter les capacités maximales des motos amplifie les risques de perte de contrôle et d'accidents graves voire mortels.

- Le problème de maniabilité des motos en virage :

La maniabilité des 2RM, et plus particulièrement lors de la prise des virages, représente un défi constant pour les conducteurs. Subirats (2011) a montré que les motocyclistes sont confrontés à des contraintes dynamiques spécifiques lorsqu'ils négocient des virages, notamment dans les carrefours giratoires. Ces zones sont particulièrement accidentogènes en raison des ajustements constants requis en termes de trajectoire, d'inclinaison et de vitesse. Les conducteurs novices ou peu expérimentés rencontrent des difficultés accrues dans ces situations, où une mauvaise évaluation de la vitesse d'entrée ou un angle d'inclinaison inadéquat peuvent entraîner une perte d'adhérence. Les surfaces routières glissantes ou les débris amplifient ces risques. De plus, la nécessité de partager l'espace avec d'autres véhicules dans des environnements complexes, tels que les intersections ou les ronds-points, rend ces manœuvres encore plus périlleuses.

- Les défaillances de perception des usagers de 2RM :

Les motocyclistes sont souvent confrontés à des erreurs de perception qui influencent directement leur capacité à réagir de manière adaptée dans des situations critiques. Ces défaillances incluent des erreurs dans l'évaluation des vitesses relatives, des distances, et des trajectoires des autres usagers de la route. Sexton et al. (2004) ont mis en évidence que ces erreurs de jugement sont particulièrement fréquentes dans des environnements complexes comme les intersections ou les ronds-points, où les interactions avec d'autres véhicules sont nombreuses et imprévisibles. Une difficulté majeure pour les motocyclistes réside dans la gestion des angles morts. Le positionnement du corps, les limitations du champ de vision imposées par les casques et la dynamique même des motos peuvent créer des zones invisibles autour du motocycliste. Ces zones augmentent le risque qu'un véhicule ou un obstacle échappe à leur attention. Cela est particulièrement dangereux lors de dépassements ou de changements de voie, où l'incapacité à percevoir un véhicule dans un angle mort peut entraîner des collisions graves. Ces lacunes sont encore amplifiées par des facteurs tels que le manque d'expérience ou une mauvaise anticipation des comportements des autres usagers de la route. Les motocyclistes expérimentés développent souvent des stratégies pour réduire ces risques, comme l'utilisation des rétroviseurs ou le balayage visuel fréquent, mais ces comportements ne compensent pas toujours les limitations inhérentes à leur perception. Ces défaillances liées aux angles morts soulignent l'importance d'intégrer des systèmes d'assistance à la conduite, tels que les alertes pour les angles morts, afin de pallier ces lacunes et réduire les risques d'accidents.

- Les difficultés de freinage en 2RM :

Le freinage représente un enjeu critique pour la sécurité des motocyclistes, en raison des caractéristiques dynamiques spécifiques aux 2RM. Contrairement aux véhicules à quatre roues, les 2RM possèdent un centre de gravité élevé et un empattement relativement court, ce qui entraîne un transfert de charge important vers l'avant lors des freinages brusques. Ce phénomène rend difficile une répartition optimale de l'effort de freinage entre la roue avant et

la roue arrière, augmentant le risque de déséquilibre et de chute (Cossalter et al., 2004). En outre, une pression excessive sur le frein avant peut provoquer un blocage de la roue et entraîner une chute par basculement, tandis qu'un freinage trop intense sur la roue arrière peut engendrer un dérapage incontrôlé. Un autre phénomène spécifique aux 2RM est celui du stoppie, qui correspond au soulèvement de la roue arrière sous l'effet d'un freinage trop intense sur la roue avant, compromettant ainsi la stabilité du véhicule. L'étude de (Sporner and Kramlich, 2001) a mis en évidence que dans plus de 50% des accidents de moto, un freinage incorrect est en cause. Pour répondre à ces problématiques, des technologies spécifiques aux 2RM, telles que l'ABS moto et le freinage couplé, ont été développées. Toutefois, il est nécessaire d'évaluer leur impact afin de mieux comprendre leur contribution à l'amélioration de la sécurité des usagers de 2RM.

I.4.2 Approches de sécurité : primaire, secondaire et tertiaire

Face à ces problématiques, plusieurs solutions ont été misent en place dans le but d'améliorer la sécurité des usagers de 2RM. Ces solutions s'articulent autour de trois niveaux complémentaires : la sécurité primaire, la sécurité secondaire et la sécurité tertiaire. Chacun de ces niveaux cible des aspects spécifiques du système de conduite pour réduire les accidents et leurs conséquences.

- Sécurité Primaire :

Aussi appelée « sécurité active », elle regroupe l'ensemble des mesures et dispositifs visant à prévenir les accidents en agissant sur les facteurs de risque en amont. Dans le cas des 2RM, la sécurité primaire repose sur des améliorations techniques spécifiques aux motos, des infrastructures adaptées et une sensibilisation des motocyclistes afin de limiter les situations pouvant conduire à une perte de contrôle ou à une collision. Le contrôle de la trajectoire et l'optimisation du freinage sont des enjeux majeurs pour les 2RM, car leur stabilité est plus précaire que celle des véhicules à quatre roues. Contrairement aux automobiles, les motos sont fortement influencées par des paramètres tels que le transfert de charge, l'adhérence des pneus et l'équilibre du motocycliste. Ainsi, des technologies comme le système de freinage antiblocage et le freinage couplé ont été initialement développées pour réduire les risques de blocage des roues et améliorer le contrôle du véhicule en cas d'urgence. Un autre aspect fondamental de la sécurité primaire en 2RM est le respect des distances de sécurité et de la vitesse adaptée. Ces dernières années, d'autres innovations ont également vu le jour, notamment les systèmes de freinage d'urgence automatique et les régulateurs de vitesse adaptatifs, afin de mieux répondre aux spécificités des 2RM et d'améliorer la sécurité des motocyclistes. La dynamique particulière des motos impose aux conducteurs une anticipation constante pour éviter les freinages d'urgence, qui peuvent être difficiles à gérer et risquent d'entraîner une perte d'adhérence. En outre, des dispositifs comme les enregistreurs embarqués, qui stockent les données de fonctionnement des véhicules avant un accident, offrent un double avantage : un effet dissuasif pour les conducteurs et une aide pour établir les responsabilités en cas de sinistre. En effet, ces enregistreurs permettent d'analyser des paramètres tels que la vitesse, le freinage, l'angle du volant ou l'activation des clignotants juste avant l'impact, fournissant ainsi des éléments factuels permettant de reconstituer la chronologie des événements et d'identifier les

comportements fautifs. Bien que développés initialement pour l'analyse post-accident, ces outils peuvent contribuer indirectement à la sécurité primaire en influençant positivement les comportements des usagers.

❖ Sécurité Secondaire :

Aussi appelée « sécurité passive », elle vise à réduire la gravité des blessures en cas d'accident. Depuis les débuts de l'automobile, des solutions ont été imaginées pour protéger les occupants des véhicules face aux risques de collisions. Dès 1903, Gustave Désiré Liebau a déposé un brevet pour des « bretelles de sécurité ». Cependant, ce n'est qu'en 1959 que les ceintures de sécurité ont été introduites sur les voitures, marquant un tournant décisif dans la protection des usagers. De leur côté, les 2RM présentent un risque plus élevé de blessures en cas d'accident, principalement en raison de l'absence d'une carrosserie capable d'absorber une partie du choc, comme c'est le cas pour les voitures. Le premier équipement développé pour les 2RM afin d'atténuer les blessures a été le casque. L'histoire du casque remonte à un événement tragique survenu en 1935. Ce jour-là, Sir Thomas Edward Lawrence (T.E. Lawrence), écrivain et officier britannique, circulait sur sa Brough Superior SS100. Tentant d'éviter des cyclistes, il a perdu le contrôle de sa moto et chuta lourdement. À l'hôpital, un jeune chirurgien, Hugh Cairns, faisait partie des médecins qui tente de le soigner. Bouleversé par cette tragédie, Cairns a décidé de mener des recherches sur la sécurité des motocyclistes. En 1941, il a publié ses résultats, démontrant que le port du casque chez les motocyclistes, tant militaires que civils, permettrait de sauver un nombre considérable de vies (Maartens et al., 2002). Cependant, ce n'est qu'en 1967 que les autorités britanniques ont rendu le port du casque obligatoire. Du côté Français, l'obligation du port du casque pour les 2RM a été instaurée par l'arrêté du 21 novembre 1975. Plus récemment, en France, une autre mesure de sécurité a été adoptée : depuis le 20 novembre 2016 (décret du 19 septembre 2016), l'absence de gants certifiés CE est sanctionnée par une amende et un retrait de points. De la même manière, depuis 2016, le port d'un gilet de haute visibilité est obligatoire pour les motocyclistes. Enfin, ces dernières années, les motocyclistes ont vu apparaître des gilets airbag, qui se gonflent automatiquement en cas de détection de chute, réduisant ainsi la gravité des blessures (Cheaibi et al., 2025).

❖ Sécurité Tertiaire :

La sécurité tertiaire représente une dimension importante de la gestion des conséquences des accidents de la route. Elle vise à atténuer leur impact à long terme sur les victimes et la société. Elle débute par une intervention médicale rapide, rendue possible par des technologies comme l'eCall, qui transmet automatiquement des alertes aux services d'urgence en cas de collision. À cette technologie s'ajoute un projet prometteur en cours de développement, appelé « ISafe » (Bruna-Rosso et al,.). Ce projet, et plus précisément sa phase initiale iSafe-Virtual-Human, a pour objectif d'évaluer, grâce à des algorithmes d'intelligence artificielle, et de transmettre rapidement le type et le niveau de gravité des blessures des occupants d'un véhicule accidenté. Pour les 2RM, Liberty Rider est l'une des sociétés qui développent des systèmes de sécurité tertiaires pour les motocyclistes, un eCall, spécifique aux 2RM. L'application développée détecte automatiquement la survenue d'un accident, et sans réponse du conducteur, envoie des alertes aux services de secours ainsi qu'aux proches, en transmettant la position GPS de l'accidenté.

La réhabilitation constitue une autre pierre angulaire de cette approche, avec des centres spécialisés offrant des soins prolongés pour traiter les traumatismes physiques tels que les handicaps, tout en prenant en charge les séquelles psychologiques, comme les troubles post-traumatiques, qui affectent aussi bien les victimes directes que leurs familles. Parallèlement, la sécurité tertiaire inclut la gestion post-accident des infrastructures routières afin de prévenir les collisions secondaires. Des systèmes intelligents de gestion du trafic détectent les incidents rapidement et optimisent les flux pour garantir une intervention efficac., Sur le plan socio-économique, cette sécurité vise à réduire les coûts associés aux accidents, notamment ceux liés aux soins prolongés, à la perte de productivité ou aux dommages matériels, en favorisant des politiques d'indemnisation équitables et des programmes de réintégration professionnelle pour les blessés. En outre, les avancées technologiques, telles que l'intelligence artificielle et les drones médicaux, offrent des perspectives prometteuses pour accélérer l'arrivée des secours dans les zones isolées, tandis que l'analyse des données issues des accidents contribue à une meilleure compréhension des mécanismes de blessures et à l'optimisation des protocoles de prise en charge (les drones peuvent, par exemple, localiser précisément les victimes, tandis que l'analyse en temps réel des données de l'accident permet d'anticiper le type de blessures subies et d'adapter plus efficacement la réponse médicale). De plus, cette approche globale et intégrée ne se limite pas à la prévention ou à la protection mais s'étend à une gestion complète des conséquences, visant à offrir aux victimes une reconstruction aussi complète que possible de leur santé, de leur bien-être psychologique et de leur intégration socio-professionnelle, tout en renforçant la résilience des systèmes routiers face aux imprévus.

I.4.3 Aperçu historique de l'évolution des 2RM

L'évolution de l'industrie des 2RM en matière de sécurité reflète une quête constante pour protéger les usagers et réduire les risques inhérents à leur utilisation. Depuis l'apparition de la première moto en 1885 (Figure I.10), créée par l'ingénieur allemand Gottlieb Daimler, qui a innové en installant un moteur à combustion interne sur une bicyclette, les 2RM n'ont cessé de progresser, tant en termes de conception que d'innovation technologique (Setright, 1979).



Figure I. 11. Premier prototype d'une moto

Ces avancées illustrent un effort continu pour répondre aux défis liés à la sécurité des motocyclistes et pour améliorer leur expérience de conduite. Au début du 20e siècle, les progrès

se concentraient sur des aspects mécaniques fondamentaux : des cadres en acier plus robustes pour assurer la stabilité, des freins à tambour pour améliorer le contrôle du véhicule, et des pneumatiques spécialisés offrant une meilleure adhérence sur des routes variées. À mesure que les motos gagnaient en puissance, des avancées ergonomiques et dynamiques ont suivi au milieu du siècle. Les suspensions hydrauliques, les cadres rigides et les pneus plus performants ont transformé la maniabilité et le confort des 2RM. Parallèlement, l'introduction des premiers casques homologués a marqué une avancée importante dans la protection individuelle des motocyclistes. Les années 1970 ont vu l'apparition des freins à disque, qui ont amélioré les capacités de freinage, notamment en conditions humides (Itoh et al., 1991). Les systèmes d'éclairage, équipés de phares halogènes, ont accru la visibilité nocturne, tandis que des vêtements de protection plus sophistiqués ont commencé à se répandre, offrant une meilleure résistance aux chocs et à l'abrasion. Avec les années 1990, la révolution numérique a transformé le domaine des 2RM, ouvrant la voie à des systèmes électroniques de gestion et de sécurité. BMW a été parmi les premières entreprises à équiper ses motos d'un système d'ABS (Anti-lock Braking System) sur son modèle K100 (Probst, 1987). Ce système fait partie des nombreuses innovations qui formeront plus tard le socle des systèmes avancés d'aide à la conduite pour motocyclistes, ou ARAS (Advanced Rider Assistance Systems). Ces technologies regroupent des dispositifs innovants visant à assister activement les motards dans la prévention des accidents et à améliorer leur perception de l'environnement (nous reviendrons en détail sur ces systèmes dans le chapitre II).

Aujourd'hui, l'industrie des 2RM s'oriente vers des solutions encore plus intelligentes, intégrant des technologies basées sur l'intelligence artificielle et des capteurs avancés. Ces systèmes prometteurs offrent un potentiel considérable pour améliorer la sécurité active et l'expérience des usagers de 2RM.

I.4.4 Définition des objectifs de cette thèse

Face aux problématiques identifiées pour les 2RM et en nous appuyant sur les axes permettant de développer des solutions pour accroître leur sécurité, nous avons choisi de nous concentrer sur l'évitement de l'accident, en regardant principalement les solutions développées dans le volet de la sécurité primaire.

➢ Questions de recherches et hypothèses

De nombreuses études ont exploré les bénéfices des ADAS sur la sécurité des usagers de véhicules à quatre roues motorisées (Aleksa et al., 2024; Isaksson Hellman and Lindman, 2023; Kuehn et al., 2009; Schoner et al., 2024; Spicer et al., 2018). Ces travaux, basés sur des modélisations des systèmes d'ADAS ou des analyses de cas réels d'accidents, ont systématiquement conclu que les ADAS contribuent à l'amélioration de la sécurité des usagers de véhicules à quatre roues. Ce constat soulève alors des questions quant à l'impact potentiel de ces technologies sur la sécurité des 2RM :

- Quels sont les systèmes développés ou à développer pour les 2RM ?
- Quel serait l'effet de ces solutions sur l'accidentalité des 2RM ?

Ces deux questions constituent le cœur de cette thèse. Nous formulons l'hypothèse que les systèmes d'aide à la conduite développés pour les 2RM pourraient contribuer à améliorer la sécurité de leurs usagers. De plus, une méthodologie basée sur l'analyse de bases de données d'accidents réels permettrait d'évaluer l'efficacité de ces systèmes.

➢ Objectifs

Dans le but de répondre à ces questionnements, l'objectif principal de cette thèse est d'évaluer l'effet des systèmes d'aide à la conduite développés pour les 2RM sur leur accidentalité.

Les résultats de cet objectif permettront par la suite d'identifier les technologies les plus prometteuses parmi ces systèmes, et les plus susceptibles d'accroître la sécurité des usagers de 2RM. En outre, les résultats de cette recherche visent à fournir une base scientifique pour orienter les politiques publiques dans l'élaboration de réglementations adaptées à la sécurité des motocyclistes. Un exemple marquant est le règlement n°COM 2010/542, qui a imposé, à partir du 1er janvier 2016, l'intégration obligatoire de l'ABS sur tous les 2RM de plus de 125 cm^3 en Europe. En identifiant les technologies les plus efficaces, cette thèse pourrait contribuer à des mesures similaires pour améliorer la sécurité des usagers de 2RM.

Pour atteindre cet objectif principal, nous avons défini deux objectifs spécifiques qui reposent sur des approches complémentaires :

➢ Premier objectif spécifique : Analyse globale de l'impact des ARAS

Une première étude porte sur une analyse systématique et globale des effets combinés de plusieurs technologies ARAS sur les accidents impliquant des 2RM. Cette étude permettra d'examiner la contribution potentielle de ces systèmes aux conséquences des accidents, en prenant en compte les défaillances et les besoins des motocyclistes. Cette première étape fournira une vue d'ensemble essentielle pour identifier les priorités en matière de technologies ARAS.

➢ Deuxième objectif spécifique : Études approfondies sur des technologies spécifiques

En complément de cette analyse globale, des études ciblées seront menées afin d'évaluer l'efficacité de technologies ARAS spécifiques, sélectionnées en fonction des principales problématiques rencontrées par les motocyclistes. Quatre technologies feront l'objet d'investigations approfondies :

- Technologie de détection d'approche de véhicules

Cette technologie, reposant sur des capteurs et des caméras, vise à alerter les motocyclistes de la présence de véhicules approchant rapidement, notamment dans les angles morts ou lors des changements de voie. Elle répond aux défaillances de perception souvent constatées, en particulier dans des environnements urbains denses où les interactions avec d'autres usagers de la route sont fréquentes.

- Technologie d’assistance au freinage en virage

Les virages représentent une situation critique pour les motocyclistes, en raison des risques de perte d’adhérence et d’instabilité. Cette technologie assiste le conducteur lors des freinages en courbe, en optimisant automatiquement la répartition de la force de freinage pour éviter une perte de contrôle. L’objectif de cette étude est d’évaluer l’impact de cette technologie sur la réduction des accidents causés par des manœuvres de freinage inadéquates en virage, en particulier ceux impliquant une perte de contrôle.

- Régulateur de vitesse adaptative

Inspiré des systèmes largement utilisés dans les voitures, le régulateur adaptatif de vitesse pour motos permet de maintenir automatiquement une distance de sécurité avec les véhicules qui précèdent. Lors de cette étude, plusieurs configurations de cette technologie ont été simulées, permettant d’analyser son efficacité dans divers scénarios. Les résultats obtenus mettent en lumière le potentiel de cette technologie pour réduire à la fois les accidents et la gravité des blessures.

- Système de freinage d’urgence

Ce système vise à assister les motocyclistes dans les situations où une réaction immédiate est essentielle pour éviter une collision frontale. Une analyse approfondie de l’efficacité de cette technologie a été réalisée, incluant des simulations de scénarios réels d’accidents.

I.5 Organisation du manuscrit

Le manuscrit de cette thèse est organisé en plusieurs chapitres, chacun ayant un objectif spécifique dans l’analyse de l’impact des systèmes d’aide à la conduite sur la sécurité des motocyclistes.

Ce Chapitre I a servi d'introduction générale, dans lequel nous avons défini les principales terminologies liées à l'accidentologie, et où la problématique de cette thèse a été clairement exposée. Ce chapitre a permis également de définir les objectifs spécifiques du travail de recherche, en exposant les enjeux liés à la sécurité des usagers de 2RM.

Le Chapitre II est consacré à une revue de littérature détaillant les systèmes d’aide à la conduite développés pour les 2RM. Ce chapitre présente les différentes technologies existantes, en définissant chacune d’elles, avant de dresser une liste des ARAS retenus pour l’analyse dans ce projet. Cette sélection sera le point de départ de l'étude des effets de ces technologies sur les accidents de 2RM.

Le Chapitre III se focalise sur les outils et la méthodologie générale. Ce chapitre décrit les outils et approches utilisés dans ce travail, en particulier les bases de données exploitées et les techniques de reconstitution cinématique des accidents réels. Cette partie pose les bases de

l’analyse en présentant les outils nécessaires à l’évaluation des effets des ARAS sur les accidents.

Les chapitres suivants (IV à VIII) sont consacrés à la présentation des études spécifiques réalisées dans le cadre de cette thèse. Chaque chapitre est structuré de manière uniforme et comprend : une revue bibliographique analysant l’influence des technologies étudiées, une description détaillée de la méthodologie mise en œuvre, la présentation des résultats obtenus et une discussion approfondie de ces derniers.

Le Chapitre IV présente la première étude de ce travail, qui analyse l’influence simultanée des systèmes sélectionnés sur les accidents des 2RM. Il fournit un aperçu global des effets combinés de ces technologies.

Le Chapitre V se concentre sur l’analyse approfondie de l'influence du régulateur de vitesse adaptatif sur la sécurité des motocyclistes, en étudiant spécifiquement ses effets sur les accidents.

Le Chapitre VI examine l'impact du système d’assistance au freinage en virage, en analysant son rôle dans la réduction des risques liés aux manœuvres de freinage dans des conditions de virage.

Le Chapitre VII se focalise sur le système de détection d’approche d’autres véhicules. Il présente des recommandations techniques concernant cette technologie, en fournissant des orientations sur son optimisation pour renforcer la sécurité des motocyclistes dans les environnements de trafic.

Le Chapitre VIII explore l’influence du système de freinage d’urgence sur les accidents de 2RM, en mettant en évidence l’importance de cette technologie dans les situations d’urgence.

Enfin, le **Chapitre IX** conclut ce travail en présentant des recommandations basées sur les analyses effectuées. Ce chapitre propose des orientations pour les politiques publiques, en vue d’améliorer la sécurité des usagers de 2RM. Il ouvre également des perspectives pour de futures recherches et innovations en matière de technologies de sécurité pour les motocyclistes.

Chapitre II

Les systèmes d'aides à la conduite pour les 2RM (ARAS)

Table des matières

II.1 Définition des systèmes d'aide à la conduite 28

II.1.1 Les catégories d'ADAS 30

II.1.2 Architecture des ADAS 31

II.1.3 Classification des ARAS pour les 2RM 32

II.2 Evaluations des ARAS pour les 2RM 38

II.1 Définition des systèmes d'aide à la conduite

Les technologies regroupées sous le terme de systèmes d'aide à la conduite (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS) s'inscrivent parmi les solutions conçues pour améliorer la sécurité des usagers de la route. Ces systèmes interviennent aussi bien en matière de sécurité primaire que de sécurité secondaire.

Les premières recherches sur les aides à la conduite dans le domaine automobile se sont inspirées des technologies développées dans l'aviation. L'un des premiers systèmes majeurs issus de ces recherches est le système de freinage antiblocage, ou ABS (Anti-lock Braking System). Conçu pour éviter le blocage des roues lors de freinages intenses, l'ABS a été inspiré par une technologie similaire utilisée pour les trains d'atterrissage des avions dès les années 1920.

Depuis lors, les technologies d'aide à la conduite n'ont cessé d'évoluer et de se diversifier, intégrant des innovations toujours plus avancées pour répondre aux besoins croissants de sécurité et de confort. Pour mieux comprendre ces systèmes, il est essentiel de commencer par définir précisément ce que recouvre la notion d'ADAS ?

Les systèmes d'aide à la conduite désignent un ensemble de technologies intégrées dans les véhicules dans le but d'améliorer la sécurité, le confort et les performances des usagers de la route. Ces systèmes reposent sur une combinaison de capteurs, d'algorithmes et de mécanismes de contrôle qui surveillent, analysent et parfois interviennent dans la conduite pour prévenir les erreurs humaines ou minimiser leurs conséquences (Galvani, 2019; Gáspár et al., 2017).

Les ADAS couvrent un large spectre de fonctionnalités allant de la simple assistance, comme les alertes sonores ou visuelles, jusqu'à des interventions actives, telles que la prise de contrôle partielle du véhicule. Ces systèmes sont devenus essentiels dans la lutte contre les accidents de la route, en anticipant les dangers et en aidant le conducteur à prendre de meilleures décisions.

La classification des niveaux d'automatisation des véhicules, basée sur les fonctionnalités des ADAS, s'étend de 0 à 5. Cette classification reflète le degré croissant de contrôle exercé par les technologies intégrées dans les véhicules par rapport au conducteur (Figure II.1). Ces niveaux, établis par des normes internationales (telles que SAE J3016), permettent de distinguer les capacités techniques du véhicule (Galvani, 2019; Kukkala et al., 2018; Watzenig and Horn, 2016).



Figure II. 1. Niveaux d'automatisation des véhicules

Bien qu'il existe six niveaux d'automatisation des véhicules, définis en fonction des fonctionnalités des systèmes d'aide à la conduite, il serait difficile pour les 2RM d'atteindre les niveaux 4 ou 5. Aujourd'hui, les systèmes développés pour les 2RM ne dépassent pas le niveau 2 d'automatisation. Les systèmes de niveau 2 sont capables de contrôler simultanément plusieurs fonctions de conduite, telles que la direction et l'accélération/freinage, dans des contextes spécifiques tels que les autoroutes bien balisées. Cependant, le conducteur doit rester attentif et prêt à reprendre le contrôle à tout moment. Le rôle du conducteur évolue légèrement à ce niveau, passant de l'exécution active à une position de supervision active. Cela permet d'augmenter le confort et la sécurité dans des conditions spécifiques, mais le conducteur reste responsable de la gestion des situations inattendues ou complexes.

Passer à un niveau d'automatisation supérieur à 2 poserait alors la question notamment du plaisir de conduire un motocycle et par conséquent la question de l'acceptabilité.

II.1.1 Les catégories d'ADAS

Les ADAS peuvent être classés en deux grandes catégories selon leur niveau d'interaction entre le véhicule et le conducteur : les systèmes ADAS actifs et les systèmes ADAS passifs. Ces deux catégories reposent sur des principes distincts, liés à leurs objectifs fonctionnels et leur mode d'intervention (Thalen, 2006).

- Les ADAS actifs

Les systèmes ADAS actifs interviennent directement dans le contrôle du véhicule, jouant un rôle proactif dans l'assistance à la conduite. Leur mission principale est de prendre en charge, totalement ou partiellement, certaines fonctions critiques pour garantir la sécurité ou optimiser les performances du véhicule. Contrairement aux systèmes passifs, ces dispositifs agissent de manière autonome, sans nécessiter une intervention immédiate du conducteur pour exécuter leurs tâches.

Ces systèmes exploitent une combinaison de capteurs avancés, de caméras, de radars et de processeurs embarqués pour analyser l'environnement en temps réel. Sur la base des données collectées, ils effectuent des actions telles que le freinage, l'accélération ou le maintien de la trajectoire du véhicule. Les ADAS actifs visent à prévenir les situations dangereuses ou à réduire les conséquences d'un éventuel accident, et sont souvent qualifiés de "systèmes en boucle fermée" car ils réagissent automatiquement aux événements en cours.

En résumé, les ADAS actifs se distinguent par leur capacité à contrôler directement les fonctions dynamiques du véhicule. Ils offrent un soutien immédiat et automatique, minimisant ainsi les marges d'erreur dues au temps de réaction humain.

- Les ADAS passifs

Contrairement aux systèmes actifs, les systèmes ADAS passifs se limitent à fournir des informations au conducteur, sans intervenir directement dans le contrôle du véhicule. Leur objectif est d'améliorer la prise de conscience du conducteur vis-à-vis de l'environnement routier et des conditions de conduite. Ces systèmes fonctionnent comme des dispositifs d'alerte ou de recommandation, laissant au conducteur la responsabilité finale d'agir en conséquence.

Les ADAS passifs utilisent également des capteurs et des caméras sophistiqués pour surveiller les paramètres critiques. Cependant, leur rôle se limite à interpréter ces données et à en informer le conducteur via des affichages visuels, des alertes sonores ou des vibrations. L'efficacité des ADAS passifs repose sur leur capacité à transmettre des informations claires et pertinentes, sans distraire ni surcharger le conducteur. Ils sont souvent considérés comme des outils d'accompagnement qui renforcent la vigilance du conducteur tout en respectant son contrôle exclusif sur le véhicule.

En résumé, les ADAS passifs agissent en boucle ouverte, se contentant de fournir un retour d'information sans exercer de contrôle direct sur le véhicule. Ils assistent les conducteurs

dans la prise de décisions éclairées, tout en leur laissant une autonomie totale dans la gestion des situations.

II.1.2 Architecture des ADAS

Les ADAS reposent sur une architecture complexe et intégrée. Leur fonctionnement (Figure II.2) commence par l'acquisition de données, réalisée grâce à une variété de capteurs embarqués. Ces capteurs comprennent des caméras, des radars, des lidars, des capteurs ultrasoniques et des unités de mesure inertielle. Chaque type de capteur remplit une fonction spécifique, comme la détection d'obstacles, la reconnaissance des marquages au sol, l'estimation des distances ou encore l'évaluation des mouvements du véhicule. Ces dispositifs collectent en temps réel des informations sur l'environnement externe et les conditions internes du véhicule.

Les données brutes captées sont ensuite transmises aux calculateurs, qui jouent un rôle central. Ces unités électroniques, dotées de capacités de calcul avancées, commencent par traiter les signaux pour extraire des informations pertinentes. Par exemple, une caméra peut fournir des images brutes qui sont ensuite analysées par des algorithmes de vision par ordinateur afin de détecter des piétons, des panneaux de signalisation ou des véhicules. Les calculateurs effectuent également une fusion de données, combinant les informations provenant de différents capteurs pour obtenir une vision globale et cohérente de la situation. Cela permet de surmonter les limites individuelles de chaque capteur, comme la sensibilité des caméras à la lumière ou les angles morts des radars.

Une fois les données traitées et analysées, les calculateurs appliquent des algorithmes sophistiqués pour interpréter la situation et évaluer les risques potentiels. À ce stade, des décisions sont prises en fonction des règles programmées ou des modèles prédictifs intégrés. Par exemple, si un obstacle est détecté à une distance critique, le système peut décider d'envoyer une commande pour activer les freins ou réduire la vitesse. Dans d'autres situations, les ADAS peuvent générer des alertes sonores ou visuelles pour attirer l'attention du conducteur sur un danger imminent, comme un véhicule dans l'angle mort.

Enfin, les actions décidées par les calculateurs sont mises en œuvre soit directement sur les systèmes du véhicule (ADAS actifs), soit par des interactions avec le conducteur (ADAS passifs). Ces commandes peuvent inclure des ajustements précis des fonctions de conduite, telles que le freinage automatique, la direction assistée ou la régulation de vitesse. Dans le même temps, des alertes sont transmises au conducteur via des interfaces utilisateur, comme des affichages, des signaux sonores ou des vibrations dans le volant.

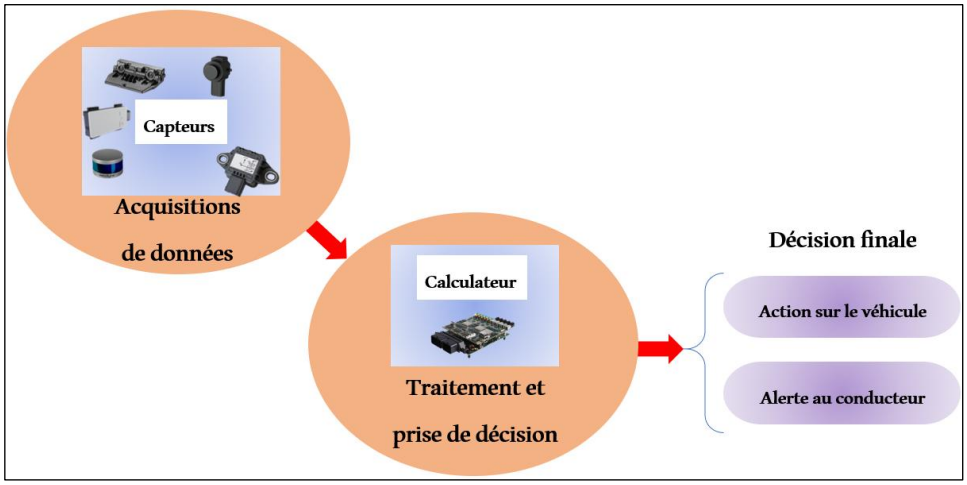


Figure II. 2. Architecture des systèmes ADAS

II.1.3 Classification des ARAS pour les 2RM

En ce qui concerne les 2RM, les systèmes d'aide à la conduite sont regroupés sous l'appellation « ARAS » (Advanced Rider Assistance System). Comparés aux systèmes d'aide pour les automobiles (ADAS), les ARAS ont connu un retard dans leur développement. La première technologie ARAS introduite sur une moto était le système antiblocage des roues, connu sous le nom d'ABS (Anti-lock Braking System), intégré pour la première fois à la BMW K100.

Dans le cadre de cette thèse, une recherche bibliographique approfondie a été menée afin de recenser les technologies existantes ou en cours de développement pour les 2RM. Les résultats de cette recherche s'appuient sur plusieurs revues de littérature dédiées aux ARAS (Damon, 2018; Kuschefski et al., 2009; Van Elslande et al., 2012). Les différentes technologies ARAS, classés dans le tableau II.1 entre systèmes actifs et passifs, sont présentées ci-dessous.

- Les systèmes actifs : Ils ont pour objectif de contrôler directement le véhicule, soit en longitudinal, soit en latéral.
  - Systèmes de contrôle longitudinal :
    - *Anti-lock Braking System (ABS)*: L'ABS est un système qui permet de gérer les conditions de freinage, en modulant la pression de freinage à certains seuils au moyen de cycles de serrage et de relâchement, afin d'éviter le blocage des roues (Pickenhahn, 1991).
    - *Combined Braking System (CBS)* : Appelé également freinage couplé, ce système permet de combiner le frein arrière avec le frein avant. Il aide le pilote à atteindre une répartition presque idéale de la force de freinage dans différentes conditions (HONDA, 2007).
    - *Autonomous Emergency Braking (AEB)* : Il s'agit d'un système composé d'une caméra et d'un radar, capable d'anticiper une collision frontale et d'en avertir le conducteur, et ensuite d'amorcer un freinage pour le véhicule (Giovannini et al., 2013).

- *PCB (Pre-Crash Braking)* : Il s'agit d'un système qui est similaire à l'AEB, basé sur des radars et des actions de freinage, mais celui-ci vise uniquement à atténuer l'impact en réduisant la vitesse, tandis qu'un AEB vise à éviter ou atténuer l'impact (Naude et al., 2022).
- *Active Cruise Control (ACC)* : L'ACC est un système électronique conçu pour maintenir une vitesse de croisière prédéfinie tout en s'adaptant automatiquement à la circulation environnante. Contrairement à un régulateur de vitesse classique, qui maintient simplement une vitesse constante définie par le motocycliste, l'ACC utilise des capteurs pour détecter la présence de véhicules devant la moto. Il ajuste alors la vitesse pour maintenir une distance de sécurité par rapport aux autres véhicules, ralentissant ou accélérant selon les besoins. Dans notre étude, nous nous somme basé sur la première technologie commercialisée par BMW® (BMW Media information, 2020). Plusieurs autres constructeurs ont équipé leurs motos de tels systèmes, notamment Kawasaki avec la Ninja H2 SX (2022+), KTM avec la 1290 Super Adventure S, Moto Guzzi avec la Stelvio (2024+), et Yamaha avec la MT-09 Tracer 9 GT+ (2023+) (Hooshmand, 2022).
- *Traction Control (TCS)* : Le TCS, ou antipatinage, est un système qui réduit en une fraction de seconde la puissance transmise par le moteur de sorte à équilibrer la force de la roue arrière et l'adhérence du pneu avec la chaussée en cas d'accélération trop brutale et/ou sur surface glissante, pour éviter la perte d'adhérence (Kobayash, 2013).
- *Anti-Wheelie (A-W)* : Ce système empêche la roue avant de se décoller en diminuant la puissance du moteur lorsque celle-ci perd le contact avec la chaussée (Steven Gray, 2010).
- *Stoppie Control (S-C)* : Contrairement à l'A-W, le stoppie se produit lorsque la roue arrière a tendance à se décoller et perdre le contact avec la chaussée. C'est pourquoi ce système prévient ce mouvement en fermant les papillons des gaz, offrant ainsi une meilleure stabilité longitudinale (Kate Murphy, 2019)
- *Launch Control (L-C)* : La commande de lancement est une aide électronique qui contrôle la quantité de couple appliquée à la roue arrière lors d'une forte accélération, à partir d'un départ arrêté, empêchant ainsi la roue arrière de patiner ou la moto de se mettre en roue libre (Giani et al., 2013) (Dumm et al., 2009).

➢ Systèmes de contrôle latéral :

- *Motorcycle Stability Control (MSC)* : connu également sous le nom d'« ABS virage », il est une version avancée du système ABS conventionnel. Ce système, qui prend en compte l'angle d'inclinaison en virage et la vitesse du véhicule, ajuste le freinage des roues pour éviter les redressements de la moto dans les courbes, une limite fréquente des systèmes ABS traditionnels (BMW Motorrad, 2022). Les fabricants de motos utilisent différentes appellations pour désigner leur version de ce système (Hooshmand, 2020). Chez Aprilia, il est connu sous le nom de Cornering ABS. BMW l'appelle ABS Pro ou ASC (Automatic Stability Control) dans ses modèles récents à partir de 2019, bien que ce système ait été introduit initialement sur la HP4 en 2013 et disponible dès 2012 pour la S1000RR. Ducati utilise le nom Bosch Cornering ABS, qui devient Bosch Cornering ABS Evo avec l'intégration de capteurs à 6 axes. Harley-Davidson,

dans son ensemble de technologies Reflex™ Defensive Rider Systems (RDRS), l'appelle Cornering Enhanced ABS (C-ABS). De leur côté, Honda et Suzuki désignent ce système simplement par le terme IMU (unités de mesure inertielle), indiquant l'utilisation de capteurs à 5 ou 6 axes. Husqvarna adopte également l'appellation Bosch Cornering ABS, tandis que Indian Motorcycles le présente sous les noms Smart Lean Technology et Wheelie Mitigation. Kawasaki a choisi l'appellation KCMF (Kawasaki Cornering Management Function), un système qui supervise plusieurs paramètres, y compris le freinage. Chez KTM et Zero, le système est référencé sous son nom d'origine, Bosch MSC (Motorcycle Stability Control). MV Agusta l'appelle six-axis IMU associé à Continental cornering ABS. Triumph le décrit comme Optimised Cornering ABS, se démarquant des autres versions moins évoluées. Enfin, Yamaha le présente sous le nom de 6-axis IMU, en mettant en avant la précision et l'innovation technologique de son système. Ainsi, bien que les noms varient selon les constructeurs, ces systèmes partagent le même objectif : optimiser le freinage en virage pour améliorer la sécurité et le contrôle des motos, tout en intégrant des technologies avancées comme l'IMU et des algorithmes de gestion du freinage.

- *Anti-Dérapage (A-D)* : Les roues se mettent à glisser latéralement si elles ne peuvent plus exercer une force latérale suffisante en virage à cause de la présence de feuilles mouillées, d'une flaque d'huile ou de gravillons sur la route. Bosch a pensé à appliquer une force latérale externe supplémentaire pour permettre au conducteur de maintenir le cap. Elle s'exerce sous forme d'un gaz qui s'échappe en pression pour créer une force dans le sens inverse du dérapage (Remi Darodes, 2018).

❖ Systèmes passifs

Les systèmes passifs améliorent la sécurité et le confort des motocyclistes sans intervention directe sur le contrôle du véhicule.

➢ Système améliorant la sécurité :

- *Systèmes d'alerte aux approches d'autres véhicules* : Divers systèmes ont été développés spécifiquement pour les 2RM afin de détecter et avertir le motocycliste en cas d'approche dangereuse d'autres véhicules. Parmi eux, le Collision Aversion Technology (CAT), conçu par Ride Vision®, se distingue par son approche passive. Ce système utilise des caméras placées à l'avant et à l'arrière du véhicule pour offrir une surveillance à 360° de l'environnement. Les données collectées par ces caméras sont transmises en temps réel à un boîtier central qui les analyse et calcule les risques potentiels. Ce boîtier est capable de détecter l'approche d'un véhicule et d'émettre des alertes pour le motocycliste (Ride Vision, 2021). Par ailleurs, des recherches telles que celles de Nie and Ray (2019) et Zohari et al. (2024) se sont concentrées sur les systèmes de détection d'angles morts, en intégrant une interaction directe avec le motocycliste via son casque. En outre, des technologies plus sophistiquées ont été explorées dans d'autres études, notamment celles de Anaya et al. (2017) et Naranjo et al. (2017). Ces recherches portent sur des systèmes dits Vehicle-to-Vehicle (V2V), Vehicle-to-Infrastructure (V2I) ou plus généralement V2X. Ces technologies exploitent des communications avancées entre véhicules, infrastructures, et

autres éléments connectés, permettant non seulement de détecter les angles morts, mais également de jouer un rôle important en tant qu'avertisseur d'intersection, renforçant ainsi la sécurité globale des 2RM.

- *AVD (Avertissement Virage Dangereux)* : Il s'agit d'une application développée par Liberty Rider® afin d'avertir les conducteurs sur les virages dangereux suivant leur vitesse instantanée (Titouan, 2021). D'autres systèmes ont été développés avec la même fonctionnalité, notamment par Huth et al. (2012) et Slimi (2012).
- *Smart Helmets (S-H)* : Le casque connecté comporte plusieurs capteurs pour assurer de multiples fonctions. Il permet de détecter la présence d'alcool et de drogues chez le conducteur et de vérifier si les taux dépassent certains seuils. Le cas échéant, ce système commence d'abord par avertir le motard. Si celui-ci décide de conduire malgré l'avertissement, ses contacts d'urgence seront informés afin qu'ils puissent gérer la situation (Tapadar et al., 2018).

➢ Système améliorant le confort :

En plus des systèmes axés sur la sécurité, certains ARAS se concentrent sur le confort des motocyclistes. Ces dispositifs visent à rendre la conduite plus agréable et à réduire les efforts nécessaires pour certaines manœuvres. Bien qu'ils n'aient pas d'impact direct sur la prévention des accidents, ces systèmes améliorent l'expérience globale de conduite en simplifiant la gestion des équipements et en optimisant le confort d'utilisation.

Voici une liste des principales fonctionnalités de confort disponibles. Comme pour les systèmes de sécurité, ces fonctionnalités ont été extraites de diverses revues bibliographiques (Damon, 2018; Kuschefski et al., 2009; Van Elslande et al., 2012) :

- ❖ Alerte d'accidents sur la route : ce système informe le conducteur en temps réel de la présence d'accidents ou de perturbations sur son itinéraire, lui permettant d'ajuster son trajet ou de se préparer à des ralentissements.
- ❖ Contrôleur de pression des pneus : ce dispositif surveille la pression des pneus et alerte en cas de sous-gonflage ou de sur-gonflage, évitant ainsi les arrêts imprévus et améliorant la longévité des pneus.
- ❖ Feux adaptatifs : ces phares ajustent automatiquement leur intensité et leur orientation en fonction de l'environnement (nuit, virages, conditions météorologiques), garantissant une meilleure visibilité et réduisant la fatigue visuelle.
- ❖ Fonctions de chauffage : notamment pour le siège et les poignées, ces options améliorent considérablement le confort du conducteur lors de trajets par temps froid.
- ❖ Fonctions d'ajustement ergonomique : offrant la possibilité de régler la position du siège, du guidon ou des repose-pieds pour s'adapter à la morphologie et aux préférences du conducteur, rendant les longs trajets moins contraignants.
- ❖ Assistance au passage des vitesses : un système permettant de changer de vitesse en douceur, sans nécessiter l'utilisation constante de l'embrayage, réduisant ainsi la fatigue sur les trajets urbains ou les longs parcours.

Toutes les technologies mentionnées précédemment peuvent être regroupées sous le terme Human-Machine Interface (HMI)**.** Ce concept désigne l'ensemble des systèmes et dispositifs qui facilitent l'interaction entre le conducteur et la machine. Ces technologies, directement inspirées des systèmes de confort ADAS des voitures, s'intègrent aux 2RM en tenant compte des besoins spécifiques des motocyclistes.

Enfin, on retrouve également des systèmes destinés à la sécurité tertiaire, tels que le eCall (appelé SOS accident chez Liberty Rider®). Ce système, conçu pour intervenir après un accident, vise à réduire le temps de réponse des services d'urgence. En cas de collision, le eCall s'active automatiquement grâce à des capteurs embarqués qui détectent l'impact. Une fois activé, le système envoie un signal contenant des informations essentielles, telles que la localisation exacte du véhicule, l'heure de l'accident.

Tableau II. 1. Classification des ARAS

Systèmes actifs		**Systèmes passifs**	
Sécurité		**Sécurité**	**Confort**
Longitudinal	**Latéral**		
❖ *Anti-lock Braking System* ❖ *Combined Braking System* ❖ *Autonomous Emergency Braking* ❖ *Pre-Crash Braking* ❖ *Active Cruise Control* ❖ *Traction Control* ❖ *Anti-Wheelie* ❖ *Stoppie Control* ❖ *Launch Control*	❖ *Motorcycle Stability Control* ❖ *Anti-Dérapage*	❖ *Des systèmes d'alerte aux approches d'autres véhicules* ❖ *Avertissement Virage Dangereux* ❖ *Smart Helmets*	❖ *GPS* ❖ *Alerte d'accidents sur la route* ❖ *Contrôleur de pression des pneus* ❖ *Les feux adaptatifs* ❖ *Les fonctions de chauffages du siège, des poignées* ❖ *Les fonctions d'ajustage du siège du guidon, du repose pied* ❖ *L'assistance au passage des vitesses* ❖ *…etc*

II.2 Evaluations des ARAS pour les 2RM

Les premières études sur les ARAS ont commencé dès l'apparition de l'ABS en 1986 avec le modèle de BMW K100. Kato et al. (1996) ont comparé les performances de différents systèmes de freinage lors d'essais sur piste. Ils ont montré que l'ABS offre des décélérations supérieures à celles d'un système standard, (avec un coefficient de glissement de 0,8 : freinage au levier = 8,7 m/s², freinage à la pédale ≈ 9 m/s²). Vavryn et al. (2004) ont évalué l'impact de l'ABS sur l'expérience des motocyclistes en examinant leurs décélérations et leurs distances de freinage. Les résultats indiquent que les conducteurs débutants bénéficient de meilleures performances de freinage avec l'ABS, tandis que l'effet est négligeable pour les conducteurs expérimentés.

Green et al. (2006) ont comparé les distances de freinage des 2RM équipés de différents systèmes (standard, ABS, ABS+CBS) lors de tests. Ils ont constaté que les systèmes ABS et CBS réduisent les distances de freinage de 5 à 10 % par rapport à un système standard.

Gail et al. (2009) ont examiné les bénéfices de l'ABS en matière de sécurité à travers des analyses d'accidents et des tests expérimentaux. Ils ont conclu que l'ABS réduit les distances d'arrêt et pourrait diminuer la mortalité des motocyclistes de 10%. Teoh et al. (2011) ont analysé des données d'assurances pour estimer les avantages de l'ABS. Les résultats montrent que le taux d'implication des motos équipées d'ABS dans les accidents mortels est inférieur de 37% par rapport à celles sans ABS.

Lich et al. (2015) ont évalué l'efficacité de l'ABS dans des cas réels d'accidents en Indonésie en comparant les vitesses de collision avec et sans ABS. Ils ont conclu que l'ABS permet une réduction de l'accidentalité de 33% et diminue la vitesse d'impact de 16%, soit une efficacité globale de 49%. Basch et al. (2015) ont utilisé une méthode fondée sur l'analyse du risque individuel d'accident et l'examen des réclamations d'assurances liées aux collisions. Leurs résultats montrent que les motos équipées d'ABS présentent une réduction de l'accidentalité de 21%. Dans une perspective similaire, Kumaresh et al. (2017) ont analysé des accidents réels à partir de bases de données provenant d'Inde et d'Indonésie. En appliquant une méthodologie analytique pour évaluer les bénéfices de l'ABS, ils ont conclu que cette technologie peut réduire le nombre d'accidents de 26% et la vitesse d'impact de 12% dans ces deux pays.

Rizzi et al. (2015) ont comparé le risque d'accident pour les motocyclistes équipés ou non d'ABS en utilisant des rapports de police et des bases de données internationales. Leurs résultats montrent que l'ABS réduit les accidents mortels de 34% et les blessures de 24%. Ciępka et al. (2016) et Anderson et al. (2010) ont mené des études similaires à celle de Kato et al. (1996) et ont confirmé que l'ABS et le CBS sont plus efficaces qu'un système conventionnel.

Enfin, Ondruš et al. (2018) et Vabre et al. (2022) ont étudié l'impact de l'ABS sur l'expérience de conduite sur route sèche en réalisant des tests avec différents types de motocyclistes. Leurs résultats corroborent ceux de Vavryn et al. (2004), montrant que les

conducteurs débutants obtiennent une meilleure stabilité et des décélérations plus importantes avec l'ABS.

Les méthodologies employées dans les études présentées reposent sur des essais expérimentaux, l'analyse de données d'assurance et, dans certains cas, le calcul du risque. Il serait pertinent de compléter ces approches par des analyses qualitatives et quantitatives de l'influence des ARAS développées pour les 2RM. Celles-ci s'appuieraient sur une approche par comparaison des accidents, différente des méthodes précédemment mentionnées. Cette approche permettrait d'évaluer directement l'impact des systèmes d'aide à la conduite en comparant des scénarios avec et sans assistance, en tenant compte de facteurs contextuels tels que les conditions de circulation, les comportements des usagers et les causes spécifiques des accidents. L'exploitation de bases de données d'accidents réels, couplée à des reconstitutions cinématiques précises, offrirait une meilleure compréhension des mécanismes accidentogènes et des marges de sécurité apportées par ces technologies.

De plus, il faut souligner que la revue bibliographique présentée se concentre principalement sur les avantages des technologies ABS et CBS pour les motocyclistes. De nombreuses autres recherches ont analysé l'impact d'autres technologies sur les utilisateurs de 2RM. Ces études seront détaillées dans les chapitres suivants. Dans un premier temps, les études évaluant l'impact combiné de différentes ARAS sur les accidents de 2RM sont abordées dans le chapitre IV. Le chapitre V explore les études analysant l'effet des systèmes de régulateurs de vitesse. Les recherches concernant l'influence de la nouvelle génération de systèmes ABS, tels que le « MSC », sont développées dans le chapitre VI. Le chapitre VII se concentre sur les systèmes de détection de collision ou d'approche de véhicules. Enfin, les études examinant l'impact des technologies de freinage d'urgence sur l'accidentalité des 2RM sont présentées dans le chapitre VIII.

Par ailleurs, il n'existe pas d'études évaluant d'autres systèmes actifs de contrôle des 2RM tels que l'anti-wheelie, le stoppie control, le launch control, le traction control ou encore les dispositifs d'antidérapages. Bien que ces systèmes soient conçus pour améliorer les performances et le contrôle du véhicule, aucune recherche n'a encore exploré leur influence éventuelle dans le contexte de la sécurité des motocyclistes.

Dans le cadre de cette thèse, l'objectif principal est d'évaluer l'impact des ARAS sur l'accidentalité des 2RM. Pour cela, une sélection rigoureuse des systèmes à analyser a été réalisée en se basant principalement sur leur lien direct avec la sécurité.

Dans un premier temps, la sélection des systèmes actifs, qu'ils interviennent dans le contrôle longitudinal (par exemple, les régulateurs de vitesse adaptatifs) ou latéral (comme le Motorcycle Stability Control), a été effectuée en prenant en compte uniquement ceux explicitement conçus pour réduire les risques d'accidents ou améliorer la maîtrise du véhicule. Ces systèmes, répertoriés dans le tableau II.1, répondent aux critères de « systèmes de sécurité », car ils ciblent des fonctions essentielles pour prévenir les collisions ou atténuer leurs conséquences.

Ensuite, la même méthodologie a été appliquée aux systèmes passifs, qui sont conçus pour agir en cas d'accident ou pour protéger les usagers dans des situations critiques. Ici aussi, seuls les systèmes relevant de la catégorie « sécurité » ont été retenus, afin de rester cohérent

avec l'objectif global du projet et se concentrer exclusivement sur les dispositifs destinés à améliorer la sécurité des motocyclistes.

Ce processus de sélection, guidé par des critères précis et des objectifs clairement définis, a permis d'établir une liste finale des ARAS à évaluer dans le cadre de cette étude (Tableau II.2). Cette liste représente un ensemble cohérent et pertinent de technologies ayant le potentiel d'apporter des réponses aux problématiques de sécurité routière spécifiques aux 2RM.

Tableau II. 2. Liste des ARAS sélectionnés

Systèmes actifs	
01	*Anti-lock Braking System*
02	*Combined Braking System*
03	*Autonomous Emergency Braking*
04	*Pre-Crash Braking*
05	*Active Cruise Control*
06	*Traction Control*
07	*Anti-Wheelie*
08	*Stoppie Control*
09	*Launch Control*
10	*Motorcycle Stability Control*
11	*Anti-Dérapage*
Systèmes passifs	
12	*Des systèmes d'alerte aux approches d'autres véhicules* : Pour cette catégorie le système CAT déjà commercialisé a été choisi.
13	*Avertissement Virage Dangereux*
14	*Smart Helmets*

Chapitre III

Outils

Et

Méthodologie générale

Table des matières

Chapitre III

Outils & Méthodologie générale

III.1 Les outils utilisés 43

III.1.1 Les bases de données 43

III.1.1.1 Études Détaillées d'Accidents (EDA) 43

III.1.1.2 Initiative for the Global harmonization of Accident Data (IGLAD) 46

III.1.1.3 Base de données nationale 47

III.1.2 La reconstitution cinématique d'un accident 48

III.1.3 Les outils utilisés dans les méthodologies d'évaluation de l'ACC et de l'AEB 55

III.1.3.1 Que ce que c'est qu'une blessure ? 56

III.1.3.2 Courbes de risque 57

III.1.3.3 Distribution des accidents selon la vitesse d'impact 59

III.2 Méthodologie générale de la thèse 62

III.3 Conclusion 64

Ce chapitre présente les outils et méthodologies utilisés pour mener les analyses de cette thèse. L'étude repose sur une approche rigoureuse combinant la reconstitution cinématique des accidents et l'exploitation de bases de données d'accidents approfondies. La reconstitution cinématique constitue un élément central de l'analyse, permettant d'étudier avec précision le déroulement de l'accident, d'identifier les facteurs contributifs et d'évaluer les scénarios alternatifs en intégrant des ARAS.

En complément, plusieurs bases de données ont été mobilisées. Parmi elles, une base de données locale, qui fournit des reconstitutions détaillées d'accidents impliquant des 2RM, une base de données internationale, qui permet une analyse standardisée à l'échelle internationale, et enfin une base de données nationale, issue de procès-verbaux d'accidents réels, offrant une vision concrète et détaillée des circonstances accidentelles. L'exploitation de ces sources permet d'assurer une analyse approfondie et diversifiée des accidents de 2RM.

Enfin, ce chapitre expose la méthodologie générale adoptée dans ce travail. L'approche repose sur l'analyse des effets des ARAS à travers deux niveaux complémentaires : une étude qualitative visant à évaluer l'ensemble des ARAS par rapport aux besoins des motocyclistes en situation d'accident, et une évaluation quantitative permettant de mesurer l'impact de certaines technologies sur la sécurité des 2RM.

III.1 Les outils utilisés

Plusieurs outils ont été utilisés afin de développer des méthodologies permettant d'analyser l'effet des ARAS sur les accidents des 2RM. Cette section propose une description détaillée de chaque outil utilisé dans la thèse :

III.1.1 Les bases de données

III.1.1.1 Études Détaillées d'Accidents (EDA)

Les Études Détaillées d'Accidents (EDA) ont été développées dans les années 1980 par le laboratoire des Mécanismes d'Accident de l'INRETS. Leur méthodologie (Figure III.1) repose sur un recueil approfondi des données directement sur la scène de l'accident, permettant d'identifier les causes, les facteurs et les conséquences des accidents, ainsi que les dysfonctionnements en jeu (Ferrandez, 1995). Contrairement aux rapports de police, dont l'objectif est de déterminer les responsabilités et de fournir des données statistiques aux organismes gouvernementaux, les EDA visent une compréhension détaillée des circonstances de l'accident. Les EDA se concentrent sur les accidents corporels, ce qui permet d'analyser les blessures et les mécanismes d'accident associés. Chaque dossier d'accident dans les EDA comprend environ 900 variables, contre seulement 90 dans un procès-verbal (PV) de police. Cette richesse de données permet de réaliser une reconstruction cinématique détaillée des accidents, et de faciliter l'identification des causes et des interactions entre les différents

facteurs en jeu. En outre, elle favorise une meilleure compréhension des scénarios accidentels et des pistes d'amélioration pour la sécurité routière.

Les enquêtes des EDA sont particulièrement précieuses pour l'étude des accidents de la route. Aujourd'hui, la base de données des EDA compte environ 1 500 cas d'accidents survenus dans la région de Salon-de-Provence et dans un rayon de 15 km aux alentours. Parmi ceux-ci, 260 concernent des accidents impliquant des 2RM. Le recueil des données repose sur trois axes complémentaires : l'analyse du comportement des impliqués, l'étude de l'infrastructure et de l'environnement, ainsi que l'examen des véhicules accidentés. Grâce à cette approche, les EDA constituent une ressource de données permettant de mener diverses analyses d'accidents, visant à améliorer la sécurité des usagers de la route.

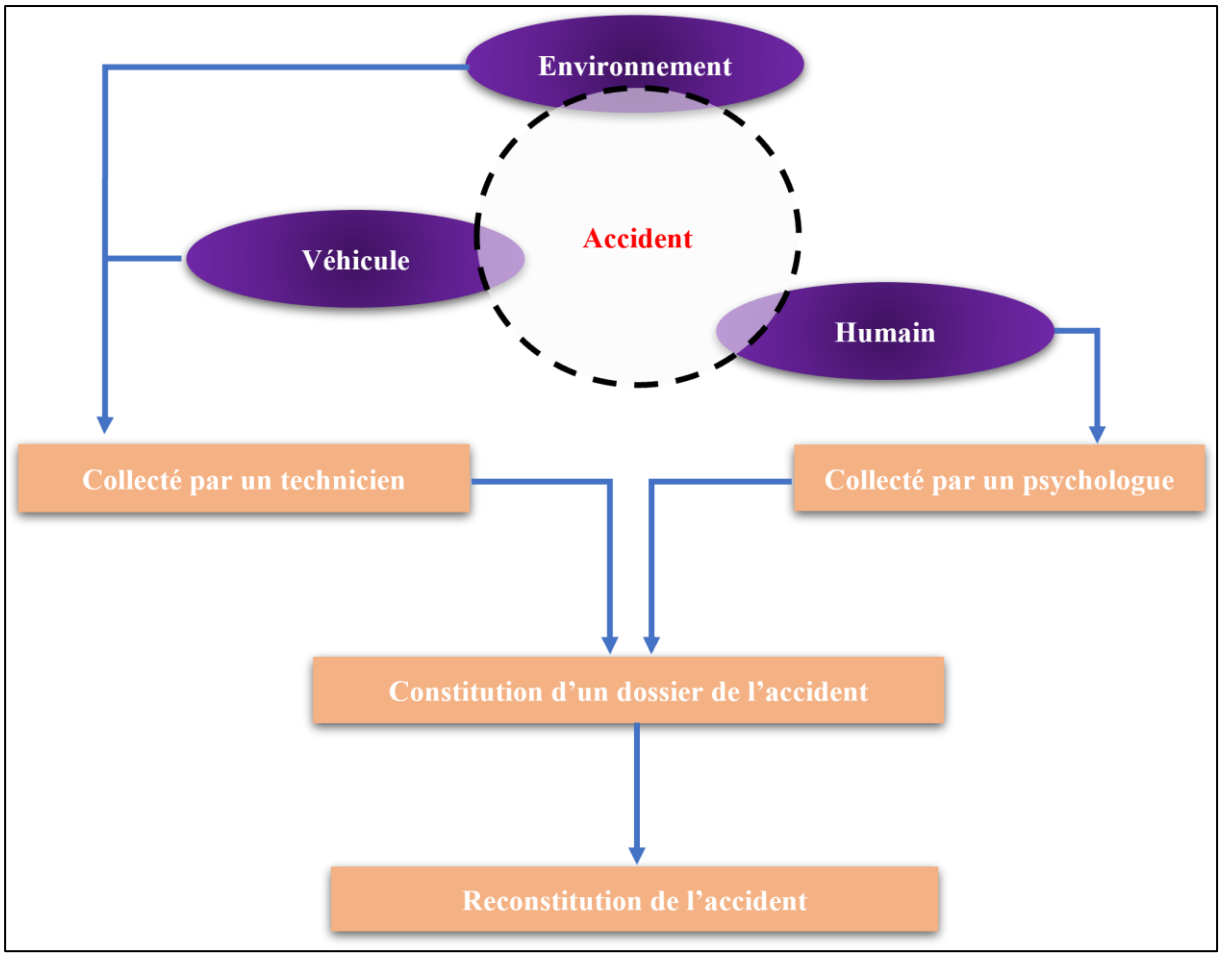


Figure III. 1. Méthodologie des EDA

À la suite d'un accident de la route, les services des EDA du LMA reçoivent un appel en même temps que les pompiers. Ensuite, deux enquêteurs (un technicien et un(e) psychologue) se déplacent sur les lieux de l'accident pour recueillir les données.

❖ Recueil des données auprès de l'impliqué

Le recueil des données sur l'humain repose dans un premier temps sur un entretien approfondi mené par un psychologue auprès des personnes impliquées dans l'accident. L'objectif est d'obtenir un récit aussi précis et détaillé que possible afin de faciliter la reconstruction de l'événement. Contrairement à un questionnaire standardisé, l'entretien prend la forme d'un dialogue semi-directif, au cours duquel l'interviewer invite l'impliqué à décrire la situation en explicitant ses intentions, ses perceptions, ses attentes, ainsi que les écarts entre

ces attentes et le déroulement réel des événements. Il s'agit également de comprendre comment la personne a tenté de réagir, quels gestes elle a réalisés et quelles décisions elle a prises avant, pendant et après l'accident.

Cet entretien est idéalement mené directement sur les lieux de l'accident afin de recueillir un récit spontané, sans que l'impliqué ait eu le temps d'analyser et de reconstruire son vécu, ce qui pourrait influencer ses propos. Toutefois, si son état physique ne le permet pas, l'entretien est réalisé à l'hôpital. Dans un deuxième temps, un second entretien est conduit, généralement quelques jours suivant l'accident afin d'approfondir certains aspects du récit initial et d'affiner la compréhension des circonstances de l'accident.

❖ Recueil des données sur l'infrastructure et l'environnement

L'analyse de l'infrastructure et de l'environnement est menée parallèlement à l'entretien des impliqués. Un technicien se charge d'enregistrer les éléments présents sur le site de l'accident immédiatement après les faits. Cela inclut la position des véhicules impliqués, les traces laissées sur la chaussée, les débris et obstacles, ainsi que les conditions climatiques, la luminosité, l'état du trafic et de la route. Chaque élément pertinent est photographié et marqué sur le sol pour constituer un dossier complet. Dans un second temps, dans les 48 heures suivant l'accident, un retour sur les lieux est effectué pour prendre des mesures plus précises. Ces mesures incluent la largeur de la chaussée, la localisation des panneaux de signalisation et des équipements routiers, ainsi que des éléments susceptibles d'affecter la visibilité (arbres, haies, panneaux publicitaires). Une vidéo embarquée est généralement réalisée afin d'analyser la perception de l'infrastructure par les conducteurs lors de leur approche vers les lieux de l'accident. L'ensemble de ces informations permet d'évaluer l'impact des conditions environnantes sur le déroulement de l'accident.

❖ Recueil des données sur le véhicule

L'analyse du véhicule accidenté vise à identifier les éventuels facteurs techniques ayant contribué à l'accident. Le technicien en charge de l'examen de l'infrastructure procède également à une inspection visuelle du ou des véhicules impliqués. Certaines données doivent être collectées immédiatement sur place, car elles risquent de disparaître lors du déplacement du véhicule. Cela inclut l'état des pneumatiques (pression, usure), la position des commandes (poignée d'accélération, levier de frein et d'embrayage), l'activation des feux et clignotants, ainsi que la répartition éventuelle d'une charge. De plus, toute gêne pouvant affecter la visibilité du conducteur, comme la présence d'un pare-brise ou de rétroviseurs endommagés, est notée. Une inspection plus approfondie est effectuée dans les jours suivant l'accident, généralement dans un garage ou au domicile de la victime. Cette inspection complémentaire permet d'analyser plus en détail les déformations subies par le véhicule et d'évaluer l'influence d'éventuels défauts techniques sur le comportement du véhicule lors de l'accident. L'ensemble de ces données contribue à une meilleure compréhension des circonstances de l'accident et de ses causes potentielles.

III.1.1.2 Initiative for the Global harmonization of Accident Data (IGLAD)

IGLAD est un consortium international créé en 2011 dans le but d'établir une norme commune pour la collecte et l'analyse des données approfondies sur les accidents de la route. Cette initiative a été annoncée lors du FIA Mobility Group en octobre 2010 et repose sur un projet non lucratif, entièrement autofinancé. IGLAD vise à fournir une base de données structurée et harmonisée permettant une meilleure compréhension des accidents et de leurs mécanismes à travers le monde.

La base de données IGLAD rassemble des informations détaillées sur des accidents provenant de divers pays et de divers organismes de recherche en sécurité routière. Contrairement aux bases de données statistiques nationales, qui se concentrent sur les nombres globaux de blessés et de décès, IGLAD se distingue par la richesse de ses informations avec 128 variables. Elle compile et uniformise des données essentielles pour la recherche et l'élaboration de réglementations en matière de sécurité routière.

La base de données regroupe des informations sur plusieurs composantes des accidents, notamment :

- **Les véhicules** : données techniques, vitesse, distance parcourue avant l'impact, activation des systèmes de sécurité, etc.
- **L'environnement** : conditions météorologiques, état et géométrie de la route, présence de signalisation, visibilité, etc.
- **Les blessures des occupants** : type et gravité des blessures subies par les conducteurs et passagers impliqués.
- **La reconstitution complète de l'accident** : élaboration d'un scénario détaillé expliquant la succession des événements ayant conduit à l'accident.

Depuis sa création, IGLAD a connu une expansion importante. Aujourd'hui, le consortium regroupe 23 membres issus de divers horizons, ainsi que 16 fournisseurs de données situés dans 13 pays : Australie, Autriche, Brésil, Chine, République Tchèque, France, Allemagne, Inde, Italie, États-Unis, Espagne, Suède et Corée du Sud. La base de données est mise à jour chaque année, intégrant de nouvelles informations issues des organismes partenaires. De nouveaux pays, institutions et membres sont régulièrement intégrés au projet dans l'optique d'une couverture géographique aussi large que possible.

L'un des principaux atouts d'IGLAD réside dans l'uniformisation des données issues de différents pays et organisations. Cette standardisation permet de comparer les accidents sur des bases cohérentes, facilitant ainsi l'identification des tendances et des facteurs de risque à l'échelle internationale. La base de données IGLAD offre également une plateforme d'échange pour les chercheurs spécialisés en accidents, favorisant la coopération et le partage d'expertises à travers le monde.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons accès aux données des accidents survenus en 2021. La base de données de cette année comprend un total de 1150 accidents dont 240 accidents impliquant des 2RM.

III.1.1.3 Base de données nationale

Les EDA et IGLAD constituent des bases de données d'accidents réels particulièrement bien renseignées. Cependant, elles présentent des limites en termes de représentativité à l'échelle nationale. Afin d'assurer une meilleure généralisation des résultats obtenus, il est nécessaire de s'appuyer sur une base de données nationale. Toutefois, aucune base nationale ne dispose d'un niveau de détail équivalent aux EDA et à IGLAD. Les seules bases de données nationales existantes sont les BAAC et les PV (ONISR, 2024).

Les BAAC sont des fiches standardisées renseignées par les forces de l'ordre après chaque accident corporel de la circulation. Elles contiennent 90 variables, incluant des informations essentielles telles que la localisation, les conditions de circulation, les véhicules impliqués ainsi que les circonstances générales de l'accident. Les PV sont établis par les forces de l'ordre dans le cadre d'enquêtes judiciaires. Ils contiennent des éléments factuels sur l'accident, les déclarations des témoins et parties impliquées, ainsi que des constatations techniques. Cependant, leur accès est restreint et leur contenu peut varier en fonction des circonstances de l'accident et du niveau de détail apporté par l'enquêteur. Toutefois, leurs niveau de détail est limité par rapport aux EDA, notamment en ce qui concerne l'analyse approfondie des facteurs techniques et comportementaux (ONISR, 2024).

Pour répondre à cette problématique, nous avons utilisé les résultats d'un autre projet (Ragot-Court & Van Eslande, 2011) portant sur l'analyse d'une base de données de 1000 accidents issus des BAAC et des PV, impliquant un 2RM entre 2004 et 2009. Cette base de données constitue un échantillon représentatif des données statistiques nationales et a été constituée par extraction aléatoire à partir de l'ensemble des PV collectés en France sur les accidents corporels impliquant au moins un 2RM durant cette période. Ces données sont issues du fichier BAAC. Nous avons plus précisément exploité l'analyse statistique descriptive de cette base de données, qui fournit une répartition des accidents à l'échelle nationale en fonction des manœuvres à l'origine des accidents. Nous les avons structurés en six scénarios principaux, définis comme suit (voir le détail dans l'annexe 1) :

- **Scénario 1 (SC1)** : Accidents entre véhicules circulant sur la même voie.
- **SC2** : Accidents lors de manœuvres de dépassement.
- **SC3** : Accidents en intersection.
- **SC4** : Accidents liés aux véhicules quittant ou entrant en stationnement.
- **SC5** : Accidents de véhicules seuls en perte de contrôle.
- **SC autre** : Accidents hors des catégories précédentes.

Cette classification permet de mieux comprendre les scénarios les plus fréquents impliquant des 2RM et d'orienter les analyses vers les situations à fort enjeu en matière de sécurité routière. De plus, cette variable de classification des scénarios facilite l'extrapolation des résultats obtenus à partir de bases de données telles que les EDA à l'échelle nationale française.

III.1.2 La reconstitution cinématique d'un accident

L'analyse des accidents de la route repose en grande partie sur la reconstitution cinématique des accidents. L'objectif principal de cette reconstitution est de déterminer, avec la plus grande précision possible, le scénario des étapes successives impliquant chaque acteur de l'accident. Il s'agit d'établir la position et la cinématique des véhicules à chaque instant, de manière synchronisée, depuis la phase de pré-collision jusqu'à l'immobilisation finale. Les mouvements des véhicules sont modélisés cinématiquement par des séquences simples, basées sur des mouvements uniformément accélérés ou décélérés. Pour garantir une reconstitution cohérente et fiable, il est essentiel d'interpréter rigoureusement les données recueillies et de confronter les différentes analyses issues de ces données (Lechner et al,. 1990). Cette démarche permet de vérifier la fidélité de la reconstitution et d'identifier les facteurs déterminants ayant conduit à l'accident.

Afin de mieux comprendre le processus de reconstitution cinématique d'un accident, il est important de revenir à la définition de l'accident donnée au chapitre I.Un accident peut être décomposé en trois phases : la pré-collision (incluant la situation de conduite, le moment de rupture et la situation d'urgence), la collision et la post-collision ou échappement (Figure III.2).

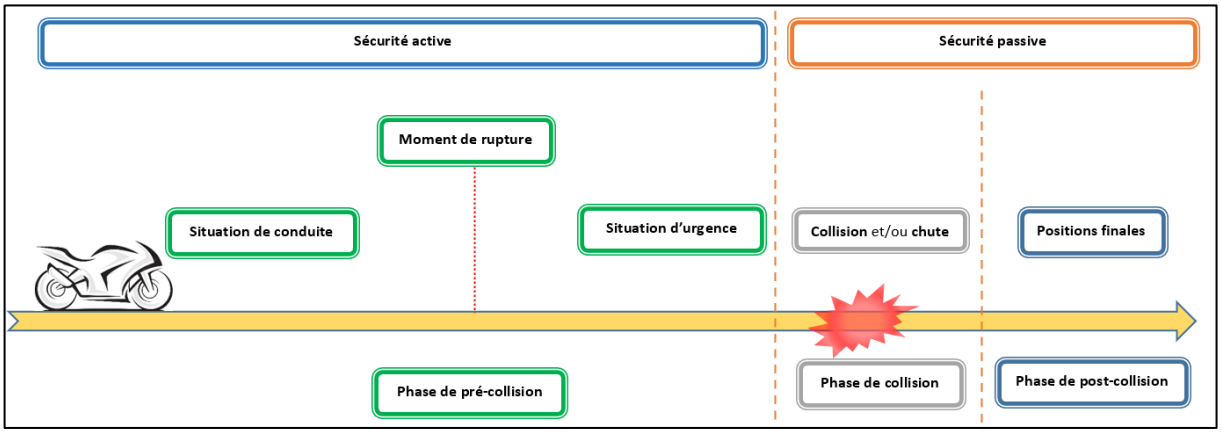


Figure III. 2. Schéma d'un accident

Pour illustrer cette décomposition, prenons l'exemple d'un scénario d'accident réel extrait de la base de données des EDA impliquant un 2RM : le cas d'une voiture effectuant une manœuvre d'insertion sur une route principale en tournant à gauche et coupant la trajectoire d'une moto (figure III.3).

Dans cet exemple, une moto circule sur une route principale (D16), en provenance de Salon et en direction de Grans, à une certaine vitesse. Une voiture se trouve sur un chemin privé perpendiculaire à cette route et cherche à s'y insérer en tournant à gauche pour prendre la direction de Salon. Lors de cette manœuvre, le conducteur de la voiture ne remarque pas l'arrivée de la moto sur sa gauche et entame sa manœuvre. Faute de temps et d'espace pour réagir, le 2RM entre en collision avec la voiture et est projeté au sol quelques mètres après l'impact. La voiture, quant à elle, s'immobilise juste après la collision, subissant un choc au niveau de son aile avant droite.

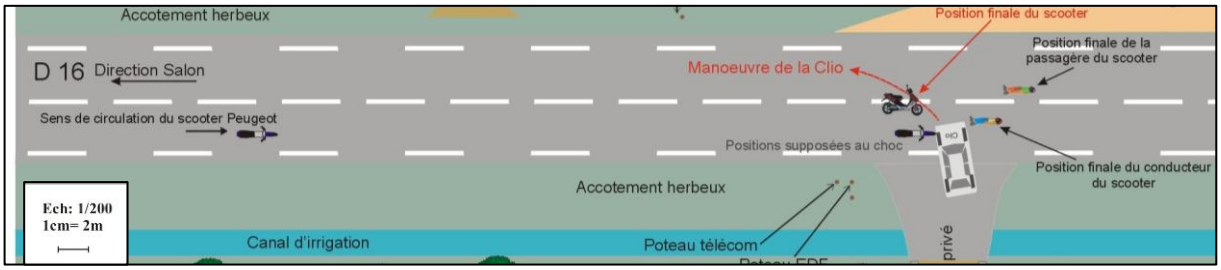


Figure III. 3. Exemple d'accident 2RM

À partir du scénario d'accident décrit ci-dessus, il est possible de décomposer la succession des événements en différentes phases et situations (Ferrandez, 1995):

❖ Situation de conduite

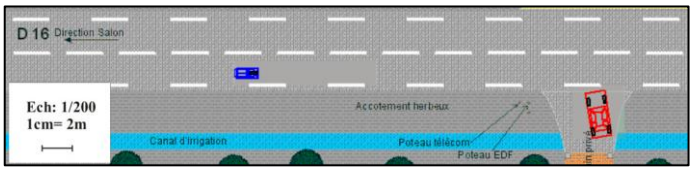


Figure III. 4. Situation de conduite

Dans cette phase, le conducteur évolue dans un contexte dit « normal », où il maîtrise pleinement son véhicule et effectue ses tâches de conduite de manière fluide et anticipée. Il contrôle sa trajectoire et sa vitesse en fonction des conditions de circulation et des éléments de l'environnement. Les événements se déroulent conformément à ses prévisions, et il reste en pleine capacité d'adaptation aux sollicitations rencontrées. Cette situation reflète l'intention initiale du conducteur et met en évidence son comportement avant tout élément perturbateur.

Dans l'exemple présenté, cette phase correspond au moment où la moto et la voiture circulent respectivement sur leurs voies, sans interférence directe. La figure III.4 illustre cet état, où chaque conducteur évolue en accord avec les règles de circulation, sans qu'aucun danger imminent ne soit encore perçu.

❖ Moment de rupture

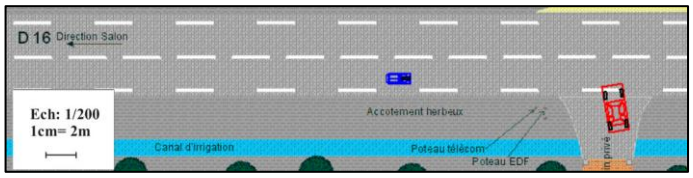


Figure III. 5. Moment de rupture

Le moment de rupture marque un basculement critique de la situation de conduite. À cet instant, les sollicitations auxquelles le conducteur est soumis passent d'un niveau tolérable à un niveau excessif, rendant la gestion de la situation plus complexe. Le conducteur doit alors réagir rapidement et efficacement pour éviter un danger imminent. Cependant, au-delà de la réaction humaine, la capacité du véhicule à répondre aux sollicitations dynamiques élevées devient également un facteur déterminant dans l'issue de la situation.

Dans l'exemple étudié, ce moment correspond à l'instant où la voiture amorce sa manœuvre de tourne à gauche, coupant progressivement la trajectoire de la moto. La figure III.5 illustre cette phase où le contexte évolue brusquement, imposant au conducteur du 2RM une prise de décision immédiate pour tenter d'éviter la collision.

❖ Situation d'urgence

La situation d'urgence est définie par l'espace-temps qui sépare le moment de rupture de la phase de choc. Elle est limitée à la fois en durée et en distance, imposant au conducteur une réaction immédiate face à une situation critique. Dans cet intervalle, il se trouve confronté à un dépassement de ses capacités de conduite habituelles et doit rapidement identifier et mettre en œuvre la meilleure réponse possible.



Figure III. 6. Situation d'urgence

La prise de décision dans cette phase est conditionnée par plusieurs facteurs : les capacités de conduite et cognitives du conducteur, l'état du véhicule, ainsi que l'état de l'infrastructure, notamment l'adhérence entre le véhicule et la chaussée. Le conducteur doit alors décider en urgence de la stratégie à adopter, telle que le freinage, une manœuvre d'évitement ou une combinaison des deux, afin d'éviter l'accident ou d'en minimiser les conséquences.

Dans l'exemple étudié (Figure III.6), cette situation est représentée par le moment où le motard aperçoit la voiture coupant sa trajectoire et cherche désespérément une solution pour éviter la collision. L'étude de cette phase est essentielle pour analyser les accidents, car elle permet d'identifier les besoins des conducteurs dans ces situations critiques et de développer des solutions de sécurité adaptées.

❖ Phase de collision

La phase de collision marque l'échec des solutions envisagées pendant la situation d'urgence. Elle conditionne la gravité de l'accident à travers les dommages matériels et corporels subis par les usagers impliqués. L'analyse de cette phase repose sur des modèles physiques basés sur la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie cinétique.

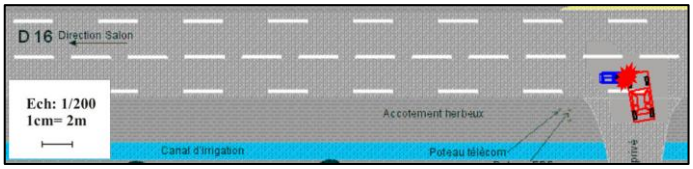


Figure III. 7. Phase de collision

Dans l'exemple étudié (Figure III.7), cette phase est illustrée par la collision de la moto avec l'aile avant gauche de la voiture. À cet instant, l'énergie accumulée lors des phases précédentes est partiellement dissipée dans les structures des véhicules et sous forme d'énergie cinétique résiduelle, influençant ainsi le comportement post-collision des impliqués.

❖ Phase de post-collision

Appelée aussi « échappement », cette phase est importante dans le processus de reconstitution cinématique d'un accident. Elle permet de retracer les événements ayant précédé l'impact. En effet, la reconstitution cinématique d'un accident consiste à remonter dans le temps et l'espace pour comprendre les trajectoires des véhicules avant, pendant et après la collision. La phase de post-collision débute immédiatement après le choc et se termine lorsque les véhicules atteignent leurs positions finales. Dans cet exemple, la figure III.3 illustre les

positions finales des véhicules impliqués dans l'accident, représentant ainsi la phase de post-collision.

❖ Comment reconstruire un accident ?

La reconstitution cinématique des accidents de 2RM repose sur des modèles physiques bien connus, à savoir (Lechner and Ferrandez, 1990):

- Le mouvement uniforme : Ce type de mouvement se caractérise par une vitesse constante dans le temps, sans accélération.
- Les mouvements uniformément accélérés : Ces mouvements impliquent une accélération constante, positive ou négative (décélération). Ils permettent de décrire les phases de variation de vitesse, telles que l'accélération lors d'un démarrage ou le freinage avant un impact.
- Le mouvement circulaire : Ce mouvement décrit le déplacement d'un véhicule le long d'une trajectoire circulaire avec une vitesse constante. Il peut être analysé selon une approche statico-dynamique en tenant compte de la force centrifuge et de l'accélération transversale. Cette approche est toutefois limitée à des valeurs spécifiques de rayon de courbure du virage et de vitesse constante.

La reconstitution cinématique d'un accident se fait en découpant l'événement en plusieurs **séquences cinématiques**. Une séquence cinématique est définie comme une entité spatio-temporelle distincte des autres par la modification d'au moins un paramètre cinématique, souvent l'accélération. Chaque séquence est caractérisée par :

- Des données d'entrée : Définissant l'état initial du véhicule.
- Des données de sortie : Définissant l'état final du véhicule.
- Des données transitoires (dans certains cas) : Décrivant un état intermédiaire.

La reconstitution cinématique réalisée dans le cadre des EDA commence par la **phase de post-collision** ou d'**échappement**, en partant de la position finale du véhicule.

Le processus suit généralement les étapes suivantes :

➢ Première étape : Reconstitution de la phase de post-collision

Cette étape consiste à remonter de la position finale du véhicule (immobilisé, avec une vitesse finale Vf = 0) jusqu'à sa position au moment de l'impact. La vitesse à la sortie du choc (V') peut être déterminée à l'aide des équations (III.1 et III.2) :

$$V' = \sqrt{2d\gamma + Vf^2} \qquad Eq\ \text{III.1}$$

Avec Vf = 0

$$V' = \sqrt{2d\gamma} \qquad Eq\ \text{III.2}$$

Avec :

d : Distance entre la position finale et la position au choc du véhicule.

γ : Accélération du véhicule.

Le plus important dans cette phase est le choix de l'accélération « γ ». Il repose sur le recueil de données sur le terrain, notamment les traces laissées par le véhicule entre la position de choc et la position finale, telles que les marques de pneus ou les traces de grattage. L'expérience de l'enquêteur joue un rôle important, car il n'existe pas de calcul permettant de déterminer avec précision la valeur de « γ ». Cette estimation repose sur ses connaissances ainsi que sur les données techniques du véhicule, obtenues soit à partir de recherches scientifiques, soit dans les revues techniques spécialisées

V' ici présente la vitesse du véhicule à la sortie de choc. C'est avec ce paramètre qu'on va pouvoir remonter ensuite à la vitesse d'entrée en choc.

- Deuxième étape : Reconstitution de la phase du choc

Il convient ensuite de déterminer les vitesses de choc des véhicules entrant en collision en utilisant des notions introduites dans cette phase. Chaque véhicule est caractérisé par sa masse (exemple M_1 et M_2), sa vitesse d'entrée en choc (V_1 et V_2) et les vitesses de sorties de choc (V_1' et V_2'). Ces paramètres permettent ensuite de formuler les équations décrivant les différentes notions associées :

- Quantité de mouvement : La quantité de mouvement est une grandeur vectorielle qui caractérise le mouvement d'un objet en fonction de sa masse et de sa vitesse. Elle est définie par le produit de la masse (M) de l'objet et de sa vitesse (V), soit (équation III.3) :

$$\vec{P} = M.\vec{V} \qquad Eq\ \text{III.3}$$

Elle est conservée dans un système isolé, ce qui signifie que la somme des quantités de mouvement des objets avant et après une collision reste constant (équation III.4) :

$$M_1.\overrightarrow{V_1} + M_2.\overrightarrow{V_2} = M_1.\overrightarrow{V'_1} + M_2.\overrightarrow{V'_2} \qquad Eq\ \text{III.4}$$

Il est nécessaire par la suite de projeter les vecteurs de vitesse sur les axes x et y pour donner par la suite des équations scalaires.

- Énergie cinétique : L'énergie cinétique est une grandeur scalaire qui mesure l'énergie qu'un objet possède du fait de son mouvement. Pour un objet de masse (M) se déplaçant à une vitesse (V), elle est donnée par la relation (équation III.5) :

$$Ec = \frac{1}{2} M.V^2 \qquad Eq\ \text{III.5}$$

Lors d'une collision, une partie de cette énergie peut être convertie en d'autres formes d'énergie, comme la déformation Wd. En effet l'énergie dissipée lors de l'impact est exprimée par l'équation III.6 (Campbell, 1974):

$$W_d = \frac{1}{2}\, m \times EES^2 \qquad Eq.\text{III.6}$$

Où EES (Energy Equivalent Speed) représente une vitesse équivalente associée à la dissipation d'énergie due aux déformations du véhicule. Cette vitesse est estimée à partir des données issues des essais de crash de référence, appelés ETS (Equivalent Test Speed). Ces derniers sont réalisés en conditions contrôlées contre des obstacles fixes et

indéformables, permettant ainsi d'établir une correspondance entre les déformations observées sur un véhicule accidenté et celles mesurées lors des tests expérimentaux.

Tandis que le reste demeure sous forme d'énergie cinétique résiduelle. L'équation qui définit la conservation de l'énergie cinétique s'écrit alors (équation III.7) :

$$\frac{1}{2}\mathrm{M}_1.\mathrm{V}_1^2 + \frac{1}{2}\mathrm{M}_2.\mathrm{V}_2^2 = \frac{1}{2}\mathrm{M}_1.\mathrm{V'}_1^2 + \frac{1}{2}\mathrm{M}_2.\mathrm{V'}_2^2 + \mathrm{Wd}_1 + \mathrm{Wd}_2 \qquad Eq\ \text{III.7}$$

L'objectif avec ces deux équations est de déterminer V_1 et V_2, qui représentent les vitesses d'entrées de choc des deux véhicules. L'équilibrage des deux équations permet d'approximer les valeurs des vitesses d'entrées en collision.

- Troisième étape : Reconstitution de la phase avant le choc

Une fois les vitesses d'entrée de collision déterminées, l'évolution des véhicules dans le temps et l'espace peut être modélisée à l'aide des modèles physiques connus :

- Le mouvement uniforme (équation III.8) :

$$V = \frac{d}{t} \qquad Eq\ \text{III.8}$$

Avec t est le temps.

- Ralentissement ou freinage : Il peut être modélisé grâce à des modèles de mouvement uniformément décéléré (équations : III.9, III.10 et III.11).

$$d = -\frac{1}{2}\gamma.t^2 + V_i.t \qquad Eq\ \text{III.9}$$

Avec « d » est la distance parcourue

Et « γ » est la décélération choisie (accélération négative)

$$t = \frac{V_i - V_f}{\gamma} \qquad Eq\ \text{III.10}$$

L'équation III.10 permet de déterminer la durée d'une séquence en utilisant les vitesse initiale (Vi) et finale (Vf) du véhicule au début et à la fin de la séquence.

$$d = \frac{V_i^2 - V_f^2}{2.\gamma} \qquad Eq\ \text{III.11}$$

L'équation III.11 permet de déterminer la distance entre le début et la fin d'une séquence.

- Démarrage ou accélération : Modéliser grâce à des modèles de mouvement uniformément décéléré (équations : III.9, III.12).
  Avec l'équation III.9, si Vi = 0, la durée de la séquence peut être modélisé grâce :

$$t = \sqrt{\frac{2d}{\gamma}} \qquad Eq\ \text{III.12}$$

- Le mouvement circulaire : Il permet de déterminer des notions comme l'accélération transversal (γ_t) (eq III.13).

$$\gamma_t = \frac{V^2}{R} \qquad Eq\ \text{III.13}$$

Avec « R » et le rayon de courbure d'un virage.

- L'utilisation de l'outil de reconstitution des accident ANAC :

ANAC est un logiciel développé au sein du LMA pour la reconstitution cinématique des accidents impliquant plusieurs véhicules à partir de dossiers d'accidents préalablement constitués. Bien qu'il soit principalement conçu pour les accidents en intersection, il peut également être utilisé pour d'autres configurations. Cet outil vise à faciliter le travail de reconstitution tout en nécessitant une bonne maîtrise de la méthodologie pour en exploiter pleinement les fonctionnalités.

Le logiciel fonctionne dans un environnement graphique intuitif (Figure III.8). La fenêtre principale affiche le plan du site accidenté, entouré de fenêtres secondaires fournissant des informations complémentaires, telles que les résultats des calculs, le repérage des positions sur le plan ou le déroulement temporel des animations.

ANAC offre plusieurs fonctionnalités interactives :

- Plan de l'accident : Le processus débute par la numérisation du plan de l'accident relevé sur le terrain. Des outils permettent de redessiner le plan, d'ajouter les véhicules et les traces, puis de vérifier leurs positions respectives.
- Séquences cinématiques : La reconstitution est segmentée en deux phases autour de la collision : la post-collision (échappement) et la pré-collision. Des modèles élémentaires permettent de déterminer les paramètres cinématiques dans chaque phase. Par exemple, pour modéliser un freinage, l'utilisateur spécifie la distance parcourue et la décélération en tenant compte du contexte de l'accident. Le logiciel calcule alors les vitesses et distances parcourues à un échantillonnage de 50 Hz, avec des résultats visualisables sous forme de tableaux, de courbes ou le long d'une trajectoire définie.
- Analyse du choc : Un sous-programme dédié permet de modéliser l'impact en tenant compte de divers paramètres (masse, angle, vitesse, EES). Le principe de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie cinétique est appliqué pour équilibrer le système de manière cohérente avec les données de l'accident.
- Animation : ANAC offre la possibilité de vérifier la cohérence des résultats via une animation des mouvements relatifs des véhicules, permettant de valider les paramètres cinématiques à chaque instant de l'accident.
- Simulations : Une fois la reconstitution terminée, l'utilisateur peut tester des variantes de manœuvres pour évaluer si des actions alternatives auraient pu éviter l'accident.

- Sorties graphiques : Le logiciel génère des planches graphiques en couleur récapitulant l'ensemble du travail de reconstitution, incluant le plan de l'accident, les graphes des mouvements (distance, vitesse, accélération), un tableau des paramètres cinématiques et des commentaires explicatifs.

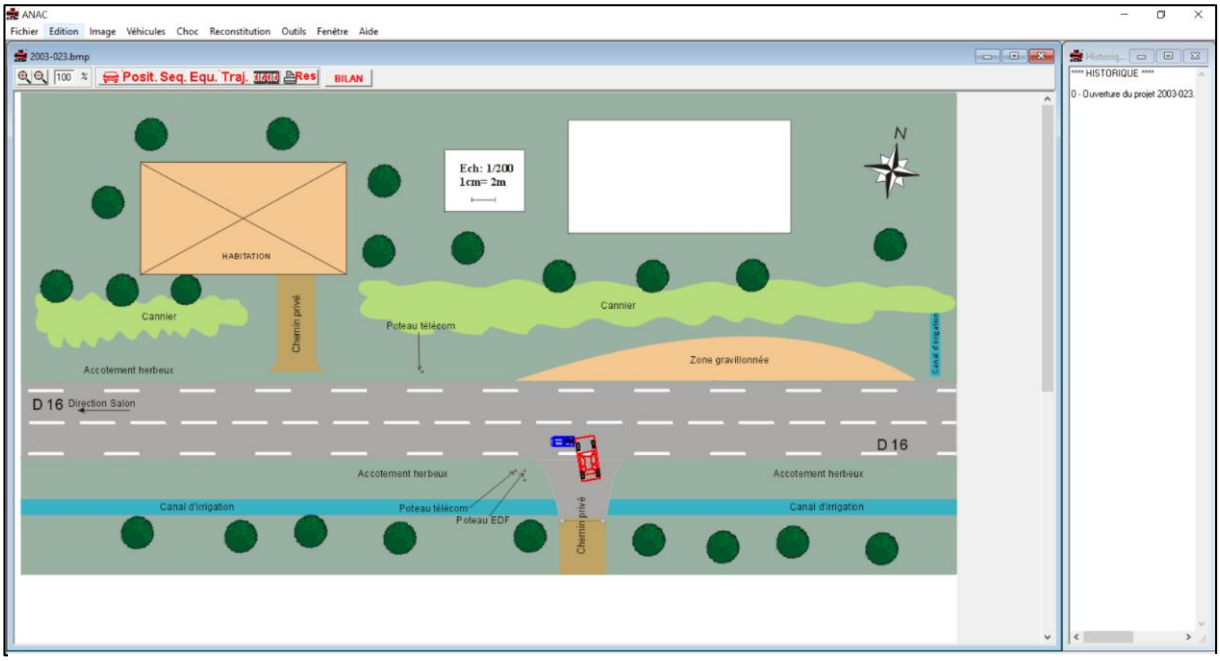


Figure III. 8. Aperçu du logiciel ANAC

La reconstitution cinématique d'un accident nécessite une collecte rigoureuse des données sur le terrain ainsi qu'une analyse détaillée des traces et des déformations des véhicules. Les modèles physiques utilisés permettent de décrire les différentes phases de l'accident, de la post-collision à la pré-collision. L'expérience de l'enquêteur, combinée aux données techniques et aux modèles physiques, permet d'obtenir une reconstitution fiable et détaillée de l'accident. Enfin, il est important de noter que la reconstitution d'un accident se fait en confrontant les scénarios de chaque véhicule entre eux et avec les autres données, notamment les déclarations des personnes impliquées dans l'accident.

III.1.3 Les outils utilisés dans les méthodologies d'évaluation de l'ACC et de l'AEB

Parmi les méthodologies développées pour la thèse, deux approches spécifiques ont nécessité l'utilisation d'outils dédiés à l'évaluation de l'impact des technologies ACC et AEB sur le risque pour un motocycliste de subir une blessure grave en cas d'accident. Ces outils sont **les courbes de risque** et **la distribution des accidents en fonction de la vitesse d'impact**.

Cette section présente une description détaillée de ces outils. Dans un premier temps, une définition des blessures et des courbes de risque est proposée, accompagnée d'une revue bibliographique des études ayant abordé ces thématiques. Ensuite, une explication de la

méthodologie employée pour construire et exploiter les distributions des accidents en fonction des vitesses d'impact est fournie.

III.1.3.1 Que ce que c'est qu'une blessure ?

La compréhension des blessures, notamment dans le contexte de la sécurité routière, repose sur des définitions claires. Les blessures se distinguent des maladies car elles doivent être définies à la fois par l'événement causal et par la pathologie résultante, ce qui rend leur catégorisation complexe. Dans le contexte des accidents de la route, la gravité des blessures varie considérablement, nécessitant une standardisation pour leur classification et évaluation. L'Abbreviated Injury Scale (AIS) a été créée dans les années 1960 par un comité pluridisciplinaire pour collecter des données épidémiologiques et évaluer les liens entre la conception des véhicules et les traumatismes. Mise à jour au fil des ans, l'AIS permet une évaluation numérique et standardisée de la sévérité des lésions, facilitant les comparaisons dans les recherches sur les blessures (AMA Committee, 1971).

Une des caractéristiques essentielles de l'AIS est le Maximum Abbreviated Injury Scale (MAIS), qui est le score le plus élevé attribué aux lésions subies par une victime ayant plusieurs blessures. Le MAIS est utilisé pour évaluer la gravité globale des blessures subies par une victime. Ce score est particulièrement utile dans les études qui examinent comment les modifications de la conception des véhicules influencent l'évolution et la gravité des blessures au fil du temps (Chiron et al., 2004).

En somme, une compréhension précise des blessures et leur codage à travers des systèmes tels que l'AIS et le MAIS sont très utiles pour avancer dans la recherche sur la prévention des blessures et améliorer la sécurité routière.

Il existe sept niveaux d'AIS représentant le degré de gravité des lésions. Ces niveaux sont reportés dans le tableau III.1.

Tableau III. 1. Niveaux de gravité des blessures

Niveau AIS	Gravité
0	Indemne
1	Mineure
2	Modérée
3	Sérieuse
4	Sévère
5	Critique
6	Maximale

III.1.3.2 Courbes de risque

Les courbes de risque sont largement utilisées pour quantifier en pourcentage le risque de blessure dans les accidents de la route, en fonction de différents indicateurs. Ces courbes permettent de prédire la probabilité d'un certain niveau de blessure, souvent exprimée selon l'échelle MAIS. Plusieurs types d'indicateurs peuvent être utilisés pour établir ces courbes de risque et notamment la vitesse.

Premièrement, la vitesse limite correspond à la vitesse réglementaire sur le lieu de l'accident, mais elle ne reflète pas directement la violence de l'impact. C'est pourquoi les études préfèrent utiliser des indicateurs plus étroitement liés à la dynamique de l'accident, comme la vitesse d'impact. En effet, la vitesse d'impact est un paramètre intéressant, car elle représente l'énergie cinétique dissipée lors de la collision, influençant directement la gravité des blessures. L'énergie cinétique (eq III.6) augmente de manière quadratique avec la vitesse, ce qui signifie qu'une légère augmentation de la vitesse d'impact entraîne une augmentation importante de l'énergie à dissiper, et par conséquent, du risque de lésions graves. Par exemple, un impact à 50 km/h génère une énergie cinétique quatre fois supérieure à celle d'un impact à 25 km/h, augmentant ainsi le risque de blessures sévères. En utilisant la vitesse d'impact comme indicateur principal, les courbes de risque fournissent donc une estimation plus précise du risque de blessure. Cela permet non seulement d'améliorer la compréhension des mécanismes lésionnels dans les accidents de la route, mais aussi de développer des méthodes permettant d'évaluer l'efficacité des systèmes tel que l'AEB ou l'ACC sur la réduction des blessures pour les motocyclistes.

Les courbes de risque sont également spécifiques à différents types de collisions, que ce soient des collisions frontales, latérales, ou des accidents impliquant des piétons, ou d'autres types de collisions. Ces courbes de risques ont été utilisée pour différents objectifs. Ces études ont cherché à établir des relations entre la vitesse d'impact et la gravité des blessures dans divers types de collisions, dans le but de définir des limites de vitesse plus sûres pour différents usagers de la route.

De nombreuses études ont démontré l'importance de ces courbes dans la définition de politiques de sécurité routière et d'aménagements visant à réduire la gravité des accidents. Lubbe et al. (2022) ont ainsi établi que la probabilité de subir une blessure grave varie selon le type d'usager de la route et la vitesse relative d'impact, avec des seuils allant de 29 km/h pour les piétons à 112 km/h pour les automobilistes. Dans une extension de ces travaux, Lubbe et al. (2024) ont appliqué ces courbes au contexte suédois en s'appuyant sur la base de données GIDAS, montrant que le risque de blessure grave (MAIS2+ ou MAIS3+) apparaît dès 25 km/h et peut atteindre 75 km/h selon le type de collision. Ces résultats ont permis de recommander une limitation de vitesse à 80 km/h sur la majorité des routes suédoises, illustrant ainsi l'usage des courbes de risque pour guider les politiques publiques.

L'application des courbes de risque aux accidents impliquant des motocyclistes a été approfondie par Ding et al. (2019), qui ont développé des modèles basés sur des données réelles d'accidents de moto. Ils ont mis en évidence que le risque de blessure grave varie fortement selon l'obstacle percuté : 20 % pour un objet large, 51 % pour une barrière et jusqu'à 64 % pour un objet étroit. En outre, une collision frontale entre une moto et une voiture à 120 km/h engendre un risque de blessure grave de 55 % pour le motocycliste. Ces résultats soulignent

l'importance d'une régulation stricte de la vitesse pour limiter la sévérité des blessures chez les motocyclistes, qui constituent une catégorie d'usagers particulièrement vulnérable.

L'adaptabilité des courbes de risque à différents contextes a été explorée par Dean et al. (2023), qui ont comparé leur applicabilité aux États-Unis et en Suède dans le cadre de la Vision Zéro. Ils ont montré que si la vitesse d'impact est un facteur déterminant dans les collisions frontales, la vitesse relative entre les véhicules impliqués est un indicateur plus pertinent pour d'autres types de chocs, notamment contre des barrières ou lors d'impacts latéraux. Cette distinction souligne l'intérêt de développer des modèles spécifiques selon les configurations d'accident afin d'optimiser les stratégies de prévention.

En résumé, une courbe de risque exprime le risque en pourcentage d'atteindre un certain niveau de blessure (MAIS [0-6]), en fonction d'un indicateur spécifique, tel que la vitesse d'impact, dans un type de collision donné.

Dans notre étude, l'analyse se concentre sur les accidents ayant entraîné des blessures graves. Les blessés graves sont ici définis comme des motocyclistes ayant subi une blessure de niveau AIS 3 ou supérieur, classée MAIS 3+. Ce choix de se concentrer sur les blessés graves repose sur plusieurs raisons importantes.

Premièrement, ils traduisent la vulnérabilité des motocyclistes en cas de collision. Comme indiqué dans les données de l'ONISR (voir Chapitre I), les 2RM se retrouvent fréquemment en deuxième position pour le nombre de tués et en première position pour le nombre de blessés graves. Deuxièmement, la quantité de données disponibles pour cette thèse nous incite à privilégier cette catégorie des blessés graves. Nous disposons dans nos bases de données EDA et IGLAD de :

- 5 accidents où le motard a été tué.
- 76 accidents où le motard a subi un MAIS 3+
- 146 accidents où le motard a subi un MAIS inférieur à 3.

En raison du faible nombre de décès dans notre base de données, l'analyse de la courbe des décès s'est avérée non exploitable. Nous avons décidé de focaliser notre étude sur les blessés graves. Pour établir la courbe de risque correspondante, nous avons d'abord tracé la fréquence cumulée des 76 cas d'accidents impliquant des blessés graves en fonction de la vitesse d'impact. Ensuite nous avons appliqué une fonction de régression logistique de type (équation III.14 (figure III.9) :

$$P(x) = \frac{1}{1 + e^{-t}} \qquad Eq\ \text{III.14}$$

$$\text{Avec : t } = \sum_0^n \beta_i X_i$$

Cette fonction, adaptée aux études disposant d'une distribution binaire (le motocycliste peut être blessé ou non), permet de calculer la probabilité de blessure dans un accident à partir des prédicteurs X_i (Vittinghoff et al. 2005). Dans ces études nous avons utilisé le logiciel R et Matlab. Le logiciel « R » dispose du package « stats » qui contient la fonction « glm ». Cette fonction nous permet d'appliquer un modèle linéaire généralisé (GLM) sur les données de nos accidents. Nous utilisons un GLM, car il généralise la régression linéaire en permettant de

modéliser des relations où la variable réponse suit une distribution autre que la normale, comme ici la distribution binomiale adaptée à la régression logistique.

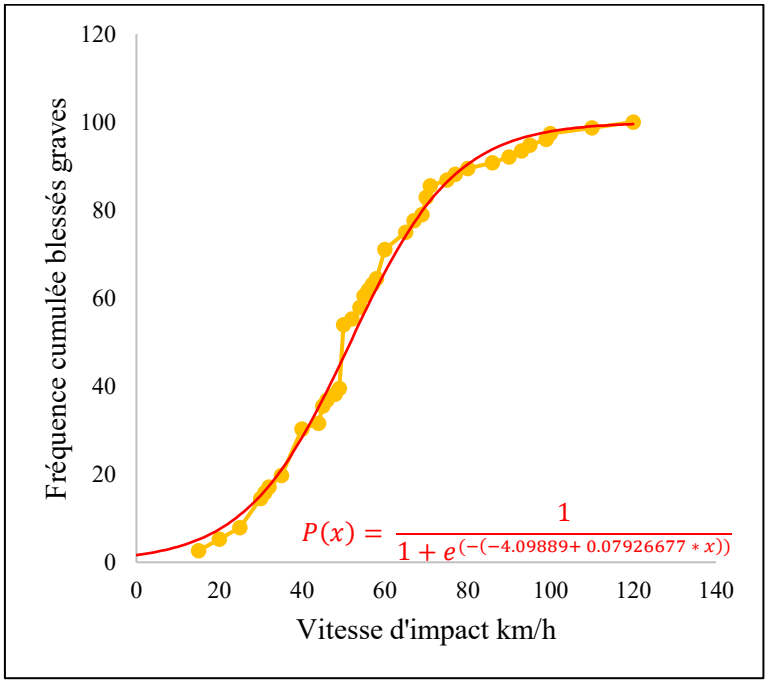


Figure III. 9. Fréquence cumulée en fonction de la vitesse d'impact (en jaune), avec la régression logistique (en rouge)

III.1.3.3 Distribution des accidents selon la vitesse d'impact

Le second pilier de notre méthodologie d'évaluation de l'influence des technologies ACC et AEB sur les blessés graves repose sur l'analyse de la distribution des accidents en fonction de la vitesse d'impact. Pour assurer la cohérence de cette analyse avec les calculs requis, il est essentiel de disposer d'une fonction continue, similaire aux courbes de risque. Cette approche se décompose en trois étapes :

1- Tracé des histogrammes : Nous avons d'abord représenté la distribution des accidents en fonction des plages de vitesses d'impact sous forme d'histogrammes. Cette représentation visuelle des données brutes permet d'identifier les plages de vitesse où les accidents sont les plus fréquents (Figure III.15). Ensuite un lissage de type gaussien a été appliqué, mais avant cela il était nécessaire de vérifier que la distribution des données suivait une loi normale. Pour ce faire, nous avons utilisé les tests statistiques de Shapiro-Wilk ou de Kolmogorov-Smirnov. Ces tests permettent d'évaluer si une série de données suit une distribution normale en calculant un coefficient indiquant l'écart par rapport à la normalité ; plus ce coefficient est proche de 1, plus la distribution est susceptible d'être normale. En termes statistiques, si la p-value de ce test dépasse 0,05 (5%), cela permet de rejeter l'hypothèse (H0) qui stipule que les données évaluées ne suivent pas une distribution normale.

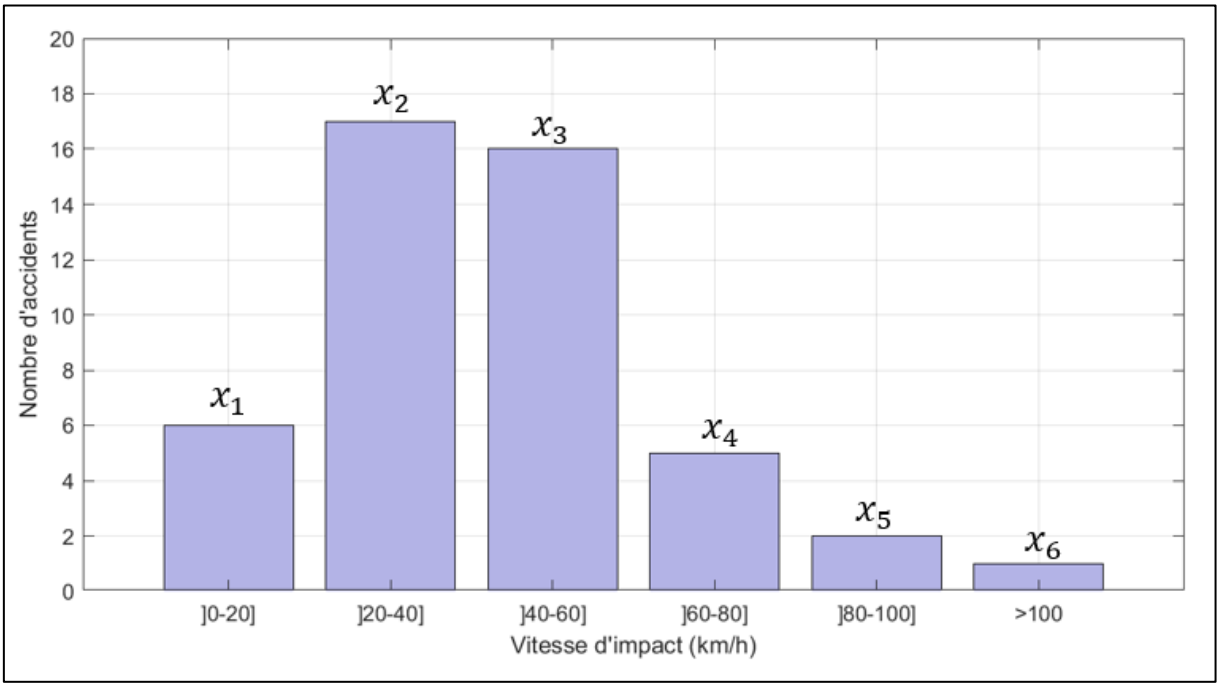


Figure III. 10. Distribution des cas d'accidents en fonction des la vitesse d'impact dans les bases locales EDA +IGLAD

2- Extrapolation des données vers la base de données nationale : La deuxième étape consiste à extrapoler la distribution des vitesses d'impact obtenue pour l'échantillon de bases locales EDA étudiés dans le cadre de l'analyse de l'ACC et de l'AEB, vers une base de données nationale plus large (la base de données nationale). Cette extrapolation permet de mieux représenter les résultats à l'échelle nationale et se déroule comme suit :

a. Hypothèse de distribution : Nous avons posé l'hypothèse de conserver la distribution obtenue dans l'échantillon des bases locales pour la base de données à l'échelle nationale. Bien que cette hypothèse introduise une limite méthodologique, elle fournit une estimation initiale du potentiel de l'ACC et l'AEB pour réduire les blessures graves, une évaluation absente de la littérature actuelle.

b. Calcul du ratio pour chaque intervalle de vitesse (équation III.15) : Nous avons ensuite calculé le ratio entre le nombre de cas dans chaque intervalle de vitesse et le nombre total d'accidents de l'échantillon des bases de données locales. Exemple, pour l'intervalle]0-20] km/h :

$$ratio\ ]0-20] = \frac{x_1}{\sum x_i} = a_1\% \qquad Eq\ \text{III.15}$$

c. Extrapolation des ratios à l'échelle nationale (équation III.16) : Le ratio calculé pour chaque intervalle de vitesse d'impact dans notre échantillon a été appliqué à la base de données nationale.

Cette extrapolation a été appliquée comme ceci :

$$x_1' = \sum x_i' \times a_1\% \qquad Eq\ \text{III.16}$$

$$x_1' : Nombres\ de\ cas\ d'accident\ ]0-20]_{Nationale}$$

$\sum x_i'$: Nombre total des accidents dans la base national pour l'ACC ou l'AEB (résultats chapitre IV)

La distribution finale obtenue est donnée à la figure III.16 :

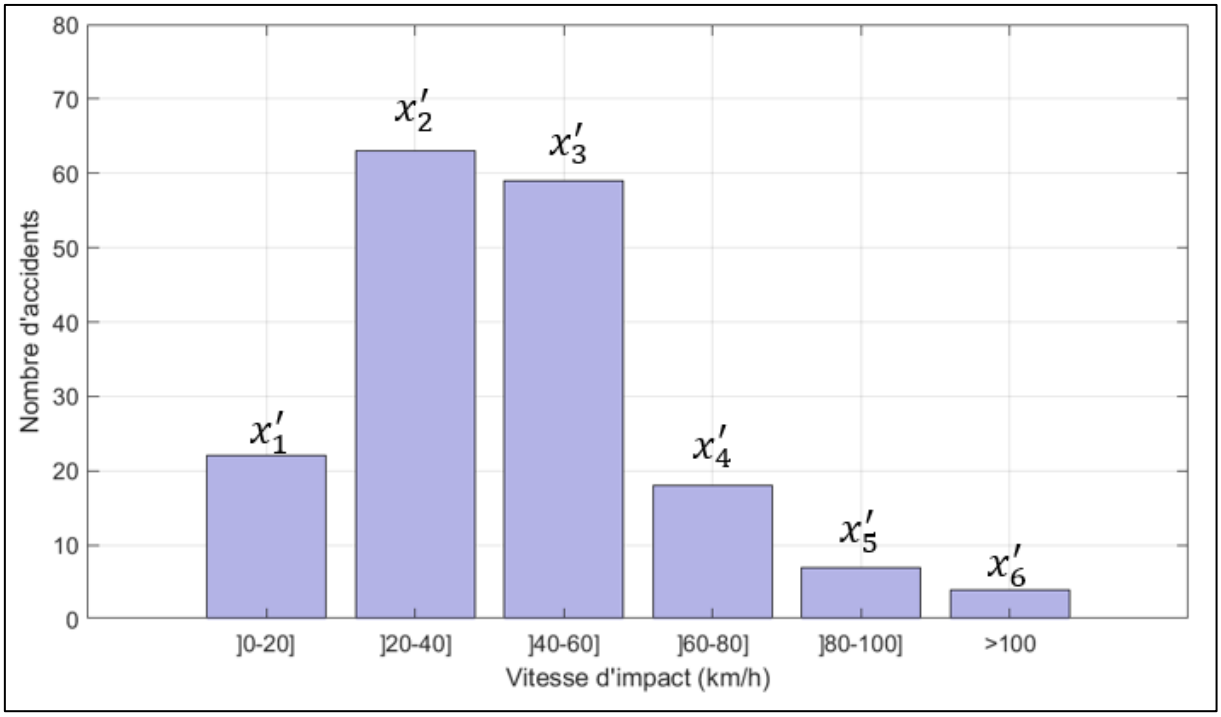


Figure III. 11. Distribution des vitesses d'impact sur la base de données nationale

3- Lissage des données (figure III.17) : Le lissage consiste à appliquer une méthode mathématique pour atténuer les fluctuations des données brutes et mettre en évidence les tendances sous-jacentes, comme cela a été fait pour la courbe de risque. Pour lisser les histogrammes de distribution des vitesses d'impact dans notre échantillon, nous avons utilisé la fonction gaussienne, qui est adaptée aux distributions normales. Cette fonction est de la forme (équation III.17) :

$$f(x) = a \times e^{-0.5\,(\frac{x-b}{c})^2} \qquad Eq\ \text{III.17}$$

Où :

- a : est l'amplitude.
- b : est la position du centre de la courbe.
- c : est l'écart-type qui détermine la largeur de la courbe.

L'ajustement des paramètres a été réalisé en utilisant la fonction « *nls* » de R (Baty et al., 2015), qui permet d'appliquer un modèle non linéaire. Dans cette étude, une fonction gaussienne a été ajustée pour minimiser la différence entre les fréquences observées dans l'histogramme des vitesses d'impact et les valeurs prédictives du modèle. Les paramètres initiaux (amplitude, moyenne et écart-type) ont été estimés à partir des données observées pour garantir une convergence optimale de l'algorithme d'ajustement. Cette méthode offre une représentation lissée des fluctuations aléatoires, permettant de capturer les tendances globales de la distribution des accidents en fonction de la vitesse. De plus, des métriques comme le coefficient de détermination (R^2) ont été utilisées pour évaluer la qualité de l'ajustement. Cette méthode d'analyse nous permet de mieux comprendre les tendances de fond et peut être comparée avec d'autres modèles, comme les

polynômes ou les régressions non linéaires, pour s'adapter à des distributions complexes.

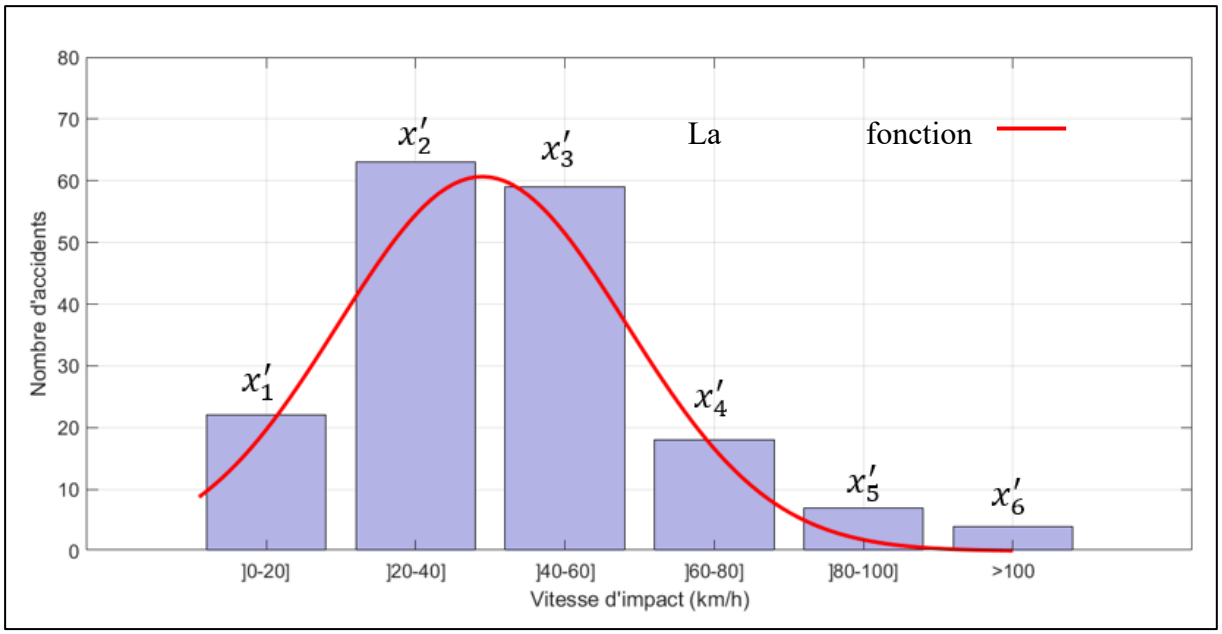


Figure III. 12. Distribution des accidents en fonction de la vitesse d'impact avec régression gaussienne

En somme, la combinaison des histogrammes et du lissage des données permet de créer une fonction continue qui décrit la distribution des accidents selon les vitesses d'impact. Cette fonction peut ensuite être utilisée pour calculer les bénéfices potentiels des systèmes d'ARAS dans la réduction des blessures graves à l'échelle nationale.

La suite de cette méthodologie consiste à combiner la courbe de risque avec les courbes de distribution des vitesses d'impact pour les différentes configurations de chaque système d'ARAS, notamment l'ACC et l'AEB. Les résultats obtenus, incluant les distributions des vitesses d'impact et les bénéfices associés à chaque technologie, sont présentés en détail dans les chapitres correspondants : le chapitre V pour l'ACC et le chapitre VIII pour l'AEB.

III.2 Méthodologie générale de la thèse

La méthodologie générale de la thèse repose sur l'analyse des bases de données d'accidents réels impliquant des 2RM, reconstruits à partir d'enquêtes approfondies. Cette approche s'inscrit dans une démarche largement adoptée dans la littérature pour évaluer les facteurs de risque et les mesures de sécurité dans les accidents de la route (Lubbe et al. 2024; Naude et al. 2022; Savino et al. 2014, 2015, 2016, 2013a, 2013b, 2019). L'objectif est d'examiner l'impact des ARAS en intégrant ces dispositifs dans la dynamique des accidents et en évaluant leurs conséquences potentielles.

L'exploitation des bases de données d'accidents réels offre plusieurs avantages méthodologiques. D'une part, elle permet d'analyser des cas concrets et représentatifs de la réalité des accidents de 2RM, en tenant compte des multiples facteurs impliqués. D'autre part,

elle autorise une évaluation fine des mécanismes accidentels en s'appuyant sur des données objectives issues d'enquêtes approfondies, ce qui renforce la robustesse des analyses. En outre, cette approche permet de mieux cerner les conditions d'apparition des accidents et les comportements des usagers, ce qui est essentiel pour juger de la pertinence et de l'efficacité des technologies étudiées.

Le cadre méthodologique peut être synthétisé à travers deux équations fondamentales (figure III.18). La première équation est une description de l'accident tel qu'il est observé dans la réalité. Cette description est basée sur la défaillance d'au moins un élément du système de conduite HVE (Humain-Véhicule-Environnement). La somme de plusieurs accident construit par la suite une base de données d'accidents réels. La seconde équation intègre un ou plusieurs systèmes ARAS à cette dynamique, modifiant potentiellement le déroulement de l'accident et ses conséquences. L'objectif est donc de comparer les scénarios réels aux scénarios modifiés pour identifier les effets de ces technologies en termes d'évitement ou d'atténuation des impacts.

La méthodologie adoptée repose sur deux niveaux d'évaluation complémentaires :

- Le premier niveau est une analyse **qualitative** visant à examiner simultanément l'effet potentiel de quatorze technologies d'ARAS. Cette approche repose sur l'étude des défaillances humaines ayant conduit aux situations de choc, en identifiant les moments de rupture et les situations d'urgence dans les accidents impliquant des 2RM. À partir de cette analyse, il est possible de déterminer les besoins spécifiques des motocyclistes dans ces situations critiques et d'identifier les ARAS susceptibles d'y répondre en fonction de leurs fonctionnalités techniques. Cette étude qualitative constitue un premier cadre d'évaluation et sera développée dans le chapitre suivant.
- Le second niveau d'évaluation est **quantitatif** et porte sur une sélection de technologies pour lesquelles une analyse détaillée est menée afin de quantifier leur effet sur les accidents de 2RM. Cette quantification repose sur une modélisation des conséquences des ARAS en termes d'évitement ou d'atténuation des impacts. L'objectif est d'estimer la capacité réelle de ces systèmes à prévenir un accident ou à réduire la gravité des blessures en cas de collision. Dans certains cas, il est également possible d'identifier des situations où l'introduction de ces technologies n'a pas d'effet, ce qui permet d'affiner leur champ d'application et leurs limites. Les méthodologies quantitatives spécifiques à chaque ARAS sont décrites en détail dans le chapitre dédié à l'analyse de cette technologie.

Cette approche, combinant une analyse qualitative des besoins en sécurité des motocyclistes et une évaluation quantitative des bénéfices potentiels des ARAS, permet d'obtenir une vision globale et approfondie de l'impact de ces technologies sur la sécurité des 2RM. Elle constitue ainsi un cadre méthodologique pour répondre aux enjeux liés à l'intégration des ARAS dans la prévention des accidents et l'amélioration de la sécurité des motocyclistes.

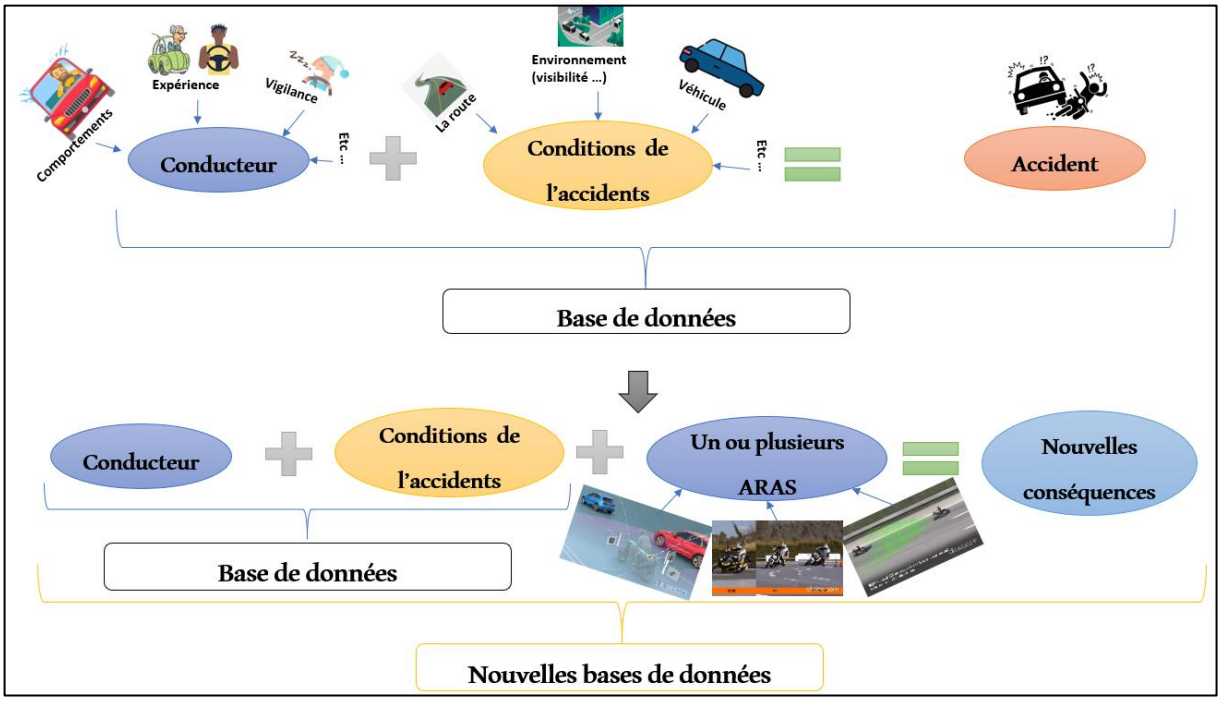


Figure III. 13. Méthodologie générale

III.3 Conclusion

Ce chapitre a présenté les outils utilisés dans les études de la thèse pour analyser l'impact des ARAS sur la sécurité des 2RM. Tout d'abord, la reconstitution cinématique des accidents a été décrite comme un élément indispensable pour étudier le déroulement précis des collisions et évaluer l'effet potentiel des ARAS sur ces scénarios. Ensuite, l'exploitation de plusieurs bases de données, notamment EDA, IGLAD et la base nationale française BAAC, a été détaillée afin de souligner l'importance des données réelles dans l'analyse des accidents et l'identification des facteurs de risque. Enfin, la méthodologie générale a été exposée, articulée autour d'une approche en deux volets : une évaluation qualitative visant à identifier les grands enjeux des ARAS et une évaluation quantitative visant à mesurer l'efficacité des ARAS en termes d'évitement de l'accident et d'atténuation de la collision.

Maintenant que les outils et la méthodologie ont été définis, l'analyse de l'impact des ARAS sur les accidents de la route peut être abordée. Le chapitre suivant se consacre ainsi à la première étude menée dans la thèse, qui porte sur l'évaluation qualitative des technologies ARAS. Cette approche permettra d'identifier les principales défaillances humaines menant aux accidents et d'examiner les systèmes les plus à même de répondre aux besoins des motocyclistes en situation critique.

Chapitre IV

Analyse qualitative des effets des ARAS

Table des matières

Chapitre IV

Analyse qualitative des effets des ARAS

IV.1 Revue de littérature des analyses globales des ARAS 67

IV.2 Matériel et méthodes 69

IV.2.1 Matériels utilisés 70

IV.2.1.1 Choix du modèle d'analyse de la production de la défaillance fonctionnelle 70

IV.2.1.2 Le facteur humain dans l'accident : « de l'erreur humaine à la défaillance fonctionnelle » 71

IV.2.2 Les besoins complémentaires des motocyclistes 79

IV.2.3 Méthodologies développées 81

IV.2.3.1 Liens entre les défaillances et les besoins des motocyclistes 81

IV.2.3.2 Étude de cas réels issus des bases de données EDA et IGLAD 82

IV.2.3.3 Extrapolation des données EDA à l'échelle nationale 84

IV.3 Résultats et discussions 86

IV.3.1 Statistiques des défaillances fonctionnelles et des besoins des conducteurs 86

IV.3.2 Liens entre défaillances fonctionnelles, besoins des conducteurs et ARAS 89

IV.3.3 Effet global des ARAS sur les accidents analysés 92

IV.3.4 Influence de chaque ARAS 93

IV.3.5 Évaluation pondérée des effets des ARAS sur les accidents en France 96

IV.4 Conclusion 97

Cette étude s'appuie sur l'analyse des défaillances fonctionnelles des conducteurs de 2RM en situation d'accident. Elle se divise en deux étapes principales. La première étape consiste à établir les liens entre les systèmes ARAS et les défaillances fonctionnelles des conducteurs de 2RM lors des situations d'accidents. Cette étape est importante car elle nous permet ensuite de réaliser une analyse approfondie de l'influence des ARAS sur les accidents de 2RM. La seconde étape de l'étude se concentre sur l'analyse de 390 cas d'accidents de 2RM, extraits de deux bases de données d'accidents. Dans cette étude chaque cas a été examiné individuellement afin d'évaluer l'influence de chaque ARAS sur chaque accident.

Pour faciliter la compréhension du lecteur, ce chapitre est structuré comme suit : tout d'abord, nous présentons un état de l'art des études précédentes sur les effets des ARAS sur les 2RM. Ensuite, nous détaillons les outils utilisés dans cette étude. Nous décrivons également les méthodologies employées, notamment celles permettant de créer des liens entre les ARAS et les défaillances fonctionnelles, ainsi que celle utilisée pour analyser l'impact des ARAS sur les accidents répertoriés dans les deux bases de données retenues. Enfin, les résultats obtenus sont présentés et discutés dans les sections « Résultats et discussions ».

IV.1 Revue de littérature des analyses globales des ARAS

Il existe peu d'études traitant simultanément des effets de différents systèmes ARAS sur les accidents impliquant des 2RM.

L'étude menée par Terranova et al. (2022) évalue et compare l'applicabilité de cinq systèmes de sécurité active pour les 2RM en utilisant des données d'accidents réels provenant d'Australie, d'Italie et des États-Unis. Les systèmes étudiés comprennent l'ABS, l'AEB pour les motocycles, l'avertissement de collision, l'avertissement de virage et l'assistance au virage. La méthodologie suivie dans cette étude, similaire à celle de Savino et al. (2019), utilise un système de notation allant de 1 à 4 pour déterminer l'applicabilité potentielle de chaque système. Cette approche repose sur le principe de disjonction des cas en fonction des différents scénarios d'accident. Les résultats montrent que l'ABS est le système le plus applicable, avec une pertinence estimée entre 45% et 60% des accidents. Il est suivi par l'avertissement de collision, avec un effet estimé entre 22% et 31%. L'AEB a une applicabilité estimée entre 7% et 14%, tandis que les systèmes d'avertissement de virage et d'assistance au virage présentent des taux d'applicabilité très variés selon les bases de données, avec des pourcentages allant de 4% à 25%. Enfin, dans 20% à 30% des cas, aucun des systèmes étudiés n'était applicable.

Les évaluations des différents ARAS développés pour les 2RM concernent non seulement leur efficacité en termes de réduction des accidents, mais aussi l'acceptation de ces technologies par les usagers de 2RM. L'étude menée par Huth and Gelau (2013) visait à développer et valider un modèle prédisant l'acceptation des ARAS par les motocyclistes. En combinant une approche théorique et des tests empiriques avec 171 participants réguliers, testés

sur des simulateurs dynamiques et une piste d'essai fermée, l'étude a identifié trois facteurs importants influençant l'acceptation :

- **La sécurité perçue sans assistance** : Ce facteur mesure la perception des motards concernant leur sécurité lorsqu'ils roulent sans l'aide d'un système d'assistance. L'objectif est de comprendre si les motards estiment qu'ils peuvent rouler en toute sécurité sans ces technologies.
- **La conception de l'interface** : Il s'agit de l'ergonomie et de la facilité d'utilisation des systèmes ARAS. Une interface bien conçue, intuitive et facile à utiliser est essentielle pour encourager les motards à adopter ces systèmes.
- **Les normes sociales** : Ce facteur se réfère à l'influence des autres motards et de la communauté des motards en général. Si l'utilisation des ARAS est perçue positivement par cette communauté, les motards seront plus enclins à accepter et à utiliser ces systèmes.

Quatre prototypes de technologies ARAS ont été testés : l'avertissement de virage dangereux et un système d'assistance à l'intersection ont été testés sur le simulateur de Padova en Italie, tandis qu'un système d'avertissement aux collisions frontales et un système d'assistance au changement de voie ont été testés sur le simulateur de Paris en France. Les résultats ont montré que la conception de l'interface et les normes sociales sont des prédicteurs importants de l'acceptation des ARAS, tandis que la sécurité perçue sans assistance ne l'était pas. De plus, la volonté d'installer et de payer pour ces systèmes était positivement corrélée avec l'intention de les utiliser. L'étude souligne l'importance de la convivialité de l'interface et du contexte social pour favoriser l'acceptation et l'utilisation des ARAS, contribuant ainsi à améliorer la sécurité des motocyclistes.

Une autre étude, réalisée par Beanland et al. (2013) visait à explorer les facteurs généraux et spécifiques aux systèmes qui influencent l'acceptabilité des ARAS, ainsi que les obstacles potentiels à leur adoption et utilisation appropriée. La méthodologie employée pour cette étude comprenait une enquête en ligne à grande échelle, disponible en sept langues et qui a attiré 6297 répondants de divers pays européens. Ce sont principalement des motocyclistes réguliers qui ont répondu à un questionnaire structuré en trois parties. Le questionnaire évaluait les caractéristiques démographiques, les pratiques de conduite, les motivations, les traits de personnalité, les attitudes face au risque et les opinions sur l'acceptabilité des systèmes d'assistance. Les résultats de cette étude ont identifié deux groupes principaux : ceux avec une acceptabilité faible et ceux avec une acceptabilité modérée. Les systèmes les plus acceptés étaient ceux qui n'interfèrent pas directement avec la tâche de conduite, tels que les systèmes de vision nocturne et le GPS. Les systèmes perçus comme plus intrusifs, tels que le régulateur de vitesse adaptatif, étaient moins acceptés. L'acceptabilité était également influencée par la perception de la fiabilité des systèmes et la préférence des motocyclistes pour des équipements de sécurité traditionnels et moins coûteux. Cette démarche méthodologique a été également suivie par Füssl et al. (2015). Leurs résultats corroborent avec ceux de l'étude de Beanland et al. Cependant, Füssl et al ont montré qu'il existe un large potentiel pour augmenter l'acceptabilité de ces systèmes, que ce soit en agissant sur l'attitude des motocyclistes vis-à-vis de la technologie d'ARAS ou en mettant en œuvre des changements sur les technologies elles-mêmes, et cela en adoptant ainsi des démarches de conception et de fabrication centrées sur l'utilisateur.

Haasper et al. (2020) ont réalisé une étude visant à évaluer la connaissance et l'acceptabilité des ARAS par les motocyclistes. L'objectif était d'explorer les attitudes des motocyclistes envers ces technologies, leur niveau de connaissance, leurs expériences pratiques avec ces systèmes, ainsi que d'identifier les obstacles potentiels à leur adoption. Pour ce faire, l'Institut für Zweiradsicherheit (IFZ) a mené une enquête nationale auprès de 3805 motocyclistes. Les participants ont répondu à des questions sur leurs caractéristiques démographiques, leurs expériences avec les ARAS, et leurs opinions sur divers systèmes d'assistance. Les résultats montrent que la majorité des motocyclistes reconnaissent et apprécient les avantages des ARAS pour la sécurité routière, avec 94,6 % des participants considérant ces systèmes utiles pour des raisons de sécurité. Cependant, bien que la connaissance générale des ARAS soit majoritairement positive, une partie notable des motocyclistes manque encore d'informations suffisantes sur ces technologies. Les systèmes plus anciens et bien établis, tels que l'ABS et les systèmes de contrôle de traction, sont mieux connus et acceptés que les systèmes plus récents. L'étude a également révélé que les expériences positives avec les ARAS, que ce soit sur des motos ou des voitures, renforcent l'attitude favorable des utilisateurs envers ces systèmes.

En analysant ces études, nous remarquons d'abord que seule l'étude menée par Terranova et al. (2002) avait pour but d'analyser l'effet et l'applicabilité de certains ARAS. Par ailleurs, les autres études se sont focalisées sur l'acceptabilité de ces technologies par les motocyclistes ainsi que sur leurs différentes interactions. Nous notons un vide important dans la littérature concernant les analyses de l'impacts que les ARAS peuvent avoir sur les usagers des 2RM. Dans le chapitre 3, nous avons présenté différentes études qui ont traité de l'influence de diverses technologies d'ARAS, mais individuellement, et sans examiner l'influence potentielle d'un panel de technologies sur un accident de 2RM. C'est à partir de cette observation que nous avons décidé de mener cette étude pour apporter de nouveaux résultats sur l'analyse des effets combinés que différents ARAS peuvent avoir simultanément sur les accidents de 2RM.

IV.2 Matériel et méthodes

Dans le but d'analyser l'effet combiné des ARAS sur les 2RM, nous nous sommes concentrés sur le facteur humain dans les 2RM. Le facteur humain dans les accidents de la route est souvent considéré comme le maillon faible et le principal vecteur des déficiences du système de conduite "usager-véhicule-environnement". Néanmoins, l'humain constitue avant tout un agent de fiabilité essentiel sans lequel ce système ne pourrait pas fonctionner (Faveege, 1970). Ce paradigme est étudié par les chercheurs en psychologie à travers l'analyse de la production de "l'erreur humaine" conduisant à l'accident. Cette analyse permet de concevoir des modèles explicatifs de la genèse de "l'erreur humaine", c'est-à-dire de "l'élément pivot" qui fait basculer la situation de conduite en situation d'urgence (voir section III.1.2). Une définition plus explicite de l'erreur humaine (appelée défaillance fonctionnelle) est fournie dans la section suivante.

En s'appuyant sur le modèle HFF (Human Functional Failures), qui permet d'analyser la production des défaillances fonctionnelles dans les accidents de la route, une méthodologie d'analyse de l'effet de 14 systèmes ARAS sur l'accidentalité des 2RM a été élaborée. Cette méthodologie, développée dans le cadre de cette étude qualitative, se décompose en trois étapes :

1. Identification des liens entre les facteurs d'accidents et les technologies ARAS : Cette phase est primordiale car elle permet d'estimer l'effet global et individuel des ARAS sur les accidents impliquant des 2RM.
2. Analyse au cas par cas : Une analyse approfondie des bases de données EDA et IGLAD a été réalisée pour déterminer l'effet de chaque système ARAS dans les accidents étudiés.
3. Extrapolation des résultats : Les résultats obtenus à partir des données de la base EDA ont été extrapolés à l'échelle nationale française.

Les outils utilisés dans cette méthodologie, à savoir le modèle HFF, les défaillances fonctionnelles et les besoins spécifiques des motocyclistes, sont détaillés dans des sections séparées. Par la suite, la méthodologie de chaque étape est expliquée afin de mieux comprendre la réalisation de cette étude qualitative.

IV.2.1 Matériels utilisés

IV.2.1.1 Choix du modèle d'analyse de la production de la défaillance fonctionnelle

La littérature propose plusieurs modèles pour analyser la production d'erreurs humaines dans les accidents de la route. L'un de ces modèles, appelé Driver Reliability and Error Analysis Method (DREAM), est basé sur le modèle Cognitive Reliability and Error Analysis (Hollnagel, 1998). DREAM comporte deux aspects : le « phénotype » (événement critique), qui concerne les données observables et les conséquences du processus d'accident, et le « génotype », qui se concentre sur les causes ayant contribué à l'apparition de l'événement critique ou phénotype. Son objectif principal est d'expliquer les causes de l'accident et de parvenir à une classification globale de celui-ci.

En parallèle, la méthode « Accident Causation Analysis with Seven Steps » (ACASS) se focalise sur les causes humaines pertinentes, en se basant sur des aspects psychologiques et perceptuels. Cette méthode commence par analyser l'accident à partir des conditions initiales, puis suit les étapes de perception, d'évaluation et d'action ayant conduit à l'accident.

Enfin, le modèle « Human Functional Failures » (HFF) définit les fonctions de conduite humaine impliquées dans chaque accident et les différents facteurs qui les influencent. Van Eslande et al. (2023) et Atalar (2018) ont mené deux études comparatives de ces trois modèles. Les résultats, basés sur des questionnaires envoyés à des experts ayant une connaissance approfondie des accidents, montrent que les participants considèrent ACASS comme la méthode la plus facile à apprendre et à utiliser. Cependant, les méthodes DREAM et HFF ont été jugées les plus pertinentes, avec un léger avantage pour HFF (Van Eslande et al., 2023). La méthode HFF permet de coder un plus grand nombre de facteurs et prend en compte la majorité

des variables analysables par un enquêteur d'accident, offrant ainsi une analyse plus approfondie des défaillances et la possibilité d'identifier clairement les contre-mesures, que nous appellerons « besoins » dans cette étude.

Une autre distinction notable entre HFF et les autres modèles est que HFF divise l'accident en plusieurs phases distinctes (conduite, rupture, urgence, collision et post-collision), une caractéristique absente dans les autres méthodes. Pour toutes ces raisons, nous avons choisi le modèle HFF pour cette étude.

IV.2.1.2 Le facteur humain dans l'accident : « de l'erreur humaine à la défaillance fonctionnelle »

Le terme « erreur » provient du latin « error », qui signifie « ignorance, incertitude » ou « action de se tromper ». En ergonomie, ce concept a été interprété comme un écart ou une déviation par rapport à une norme (Leplat, 1985; Parker et al., 1995). Cependant Cellier (1990) a souligné que cette interprétation dépend du degré de précision de la norme de référence. De plus, certaines recherches ont montré que l'erreur peut avoir des aspects positifs, permettant par exemple d'économiser les ressources attentionnelles en tolérant une certaine marge d'erreur.

L'erreur peut être analysée de plusieurs façons. Par exemple, dans le cas d'une collision arrière à un carrefour, l'erreur observée pourrait être le fait qu'un conducteur n'a pas freiné à temps, sans que les causes spécifiques de cette erreur soient immédiatement apparentes.

En accidentologie, les chercheurs tentent de remonter aux causes fondamentales des erreurs par une analyse approfondie des données recueillies après un accident. Une telle analyse pourrait révéler, par exemple, un problème de perception de la distance avec le véhicule précédent, peut-être dû à une mauvaise évaluation de la vitesse relative. Cette mauvaise évaluation pourrait être exacerbée par une distraction du conducteur, telle que l'utilisation d'un téléphone portable, résultant d'une notification urgente incitant le conducteur à détourner son attention de la route.

Dans ce contexte, les erreurs humaines entraînant des accidents sont désignées sous le terme de « défaillances fonctionnelles ». Elles se définissent comme des erreurs non récupérables, se distinguant des erreurs récupérables qui n'entraînent pas de conséquences graves. Les défaillances fonctionnelles révèlent une inadéquation entre les caractéristiques techniques, organisationnelles et fonctionnelles de la situation de travail et les caractéristiques physiques, mentales et psychosociales de l'opérateur humain. Elles signalent des problèmes dans l'activité, se traduisant par des actions inappropriées qui entravent l'accomplissement du résultat attendu. L'analyse de ces défaillances est nécessaire pour comprendre les niveaux de difficulté auxquels sont confrontés les opérateurs, rendant inefficaces des fonctions normalement performantes (Van Eslande et al., 2023).

Selon Van Eslande (1997) dans le rapport « INRETS N°218 », « *Les défaillances fonctionnelles correspondent à l'étape de la séquence des traitements où une fonction n'a pas rempli son rôle adaptatif, au moment de la rupture de la situation de conduite* ». En d'autres

termes, une défaillance fonctionnelle est définie par ce qui n'a pas fonctionné durant la phase de conduite et qui a menée à la phase d'urgence et à l'accident par la suite.

D'autres travaux ont également étudié les erreurs des conducteurs de 2RM. Par exemple, Ledesma et al. (2023) ont développé un questionnaire pour examiner les erreurs de conduite liées à l'attention chez les motocyclistes. Ce questionnaire comprenait une auto-évaluation de l'implication dans des activités distrayantes, une mesure de l'inattention quotidienne, ainsi que des questions sociodémographiques et relatives à la conduite. Leurs résultats montrent que pour les mineurs, le téléphone est l'activité la plus distractive, tandis que pour les autres conducteurs, ce sont le GPS, l'écoute de la radio et de la musique.

Afin de bien comprendre comment les défaillances fonctionnelles ont été définies, il faut remonter aux fonctions humaines de conduites (appelées aussi fonctions outils). Elles consistent en différentes fonctions cognitives. En psychologie cognitive, la cognition se réfère à l'ensemble des mécanismes mentaux impliqués dans l'acquisition, le traitement, le stockage et l'utilisation de l'information. Cela inclut des fonctions telles que la perception, l'attention, la mémoire, le raisonnement, la résolution de problèmes, la prise de décision et l'apprentissage. En d'autres termes, la cognition englobe toutes les activités mentales qui nous permettent de comprendre et d'interagir avec le monde qui nous entoure (Reed, 2017). La figure III.1 présente un modèle adapté par Neboit (1978) qui schématise le fonctionnement de l'opérateur humain. Dans cette section, une description de chaque fonction de conduite est donnée, telle qu'elle a été décrite dans le rapport de Van Eslande et al. (2023) (Figure IV.1).

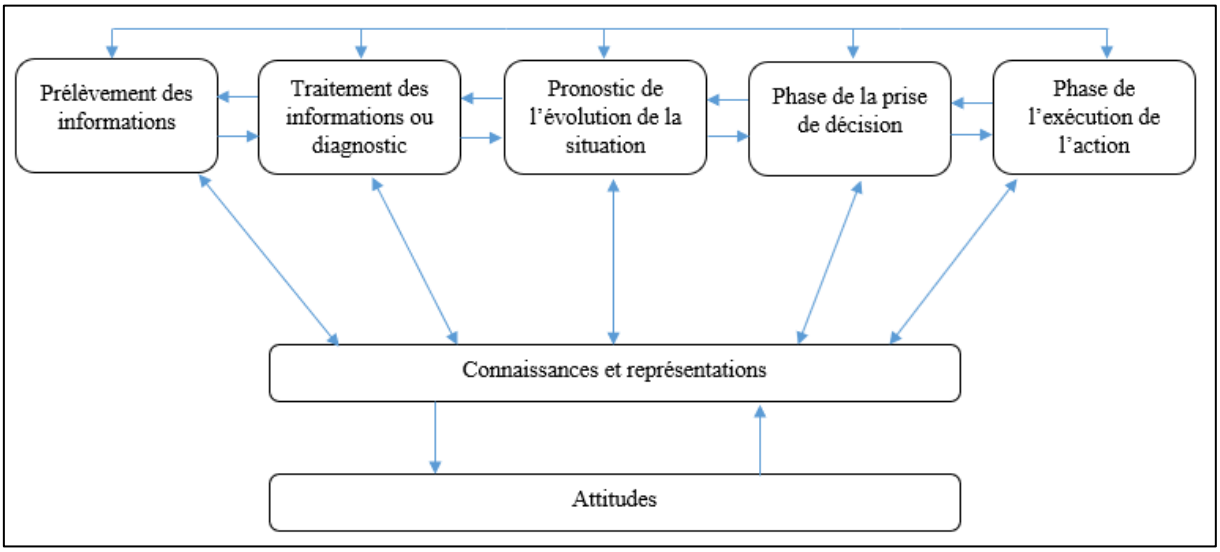


Figure IV. 1. Modèle de fonctionnement de l'opérateur humain (Van Elslande et al., 2023)

La perception : La perception est la capacité à reconnaître et interpréter les stimuli sensoriels (visuels, auditifs, tactiles, etc.) provenant de l'environnement (Prinzmetal et al., 1986). Elle agit comme un filtre qui transforme la réalité perçue en informations utilisables. En conduite, la perception implique la détection des panneaux de signalisation, des feux de circulation, des piétons et des autres véhicules. Une perception précise et rapide est déterminante pour réagir de manière appropriée et éviter les accidents. Par exemple, détecter un obstacle sur la route permet de freiner à temps pour éviter une collision. La perception constitue le point de départ de toutes les autres fonctions cognitives, car elle fournit les informations nécessaires pour la prise de décision et l'action. Cette séquence de traitement

permet de transformer les stimuli bruts en perceptions significatives, facilitant ainsi une conduite sécurisée et efficace.

- **La détection** : La détection est la capacité à identifier des stimuli pertinents dans l'environnement, permettant de focaliser l'attention sur les éléments déterminants pour l'action. Elle correspond à l'étape sensorielle dans la phase de perception. À ce stade, deux critères sont essentiels pour la détection d'un objet dans l'environnement :
  - La conspicuité sensorielle : Ce critère désigne la mesure dans laquelle un objet peut être distingué parmi les autres éléments de son environnement, en raison de ses caractéristiques physiques telles que la couleur, la taille, et le contraste. Une haute conspicuité sensorielle facilite la détection visuelle.
  - La conspicuité cognitive : Ce critère est lié aux facteurs intrinsèques à l'individu, tels que ses connaissances, son expérience et ses intentions au moment de traiter les informations visuelles. La conspicuité cognitive reflète la pertinence subjective d'un objet pour une personne donnée, influençant sa capacité à le détecter.

  Les facteurs attentionnels jouent également un rôle important dans la détection. Moins une personne s'attend à voir un objet, moins elle a tendance à le détecter (Simons and Chabris, 1999). Par exemple, un conducteur est moins susceptible de remarquer un piéton inattendu traversant soudainement la route si son attention est focalisée ailleurs.

  Ces deux types de conspicuité, sensorielle et cognitive, interagissent pour déterminer la probabilité de détection d'un objet dans l'environnement (Elslande et al., 2011). Une détection efficace résulte donc d'une combinaison de caractéristiques physiques saillantes et de la préparation cognitive de l'individu à percevoir ces caractéristiques.

- **L'évaluation :** L'évaluation consiste à estimer les situations et les options disponibles pour choisir l'action la plus appropriée. En conduite, cela signifie évaluer des facteurs comme la vitesse, la distance avec les autres véhicules, l'insertion dans le trafic…etc. Par exemple, évaluer si une manœuvre de dépassement est sûre nécessite une analyse rapide des vitesses relatives et des espaces disponibles. L'évaluation peut également englober des paramètres généraux tels que la dangerosité d'une situation ou l'évaluation de ses propres compétences et connaissances. Par ailleurs certaines études en psychologie cognitive ont mis en lumière des facteurs pouvant influencer le jugement du conducteur. Caird and Hancock (1994) ainsi que Horswill et al. (2005) ont mené des expérimentations sur le « Time-To-Collision » (TTC). Leurs recherches ont révélé que les conducteurs tendent à surestimer le temps d'arrivée lorsque le véhicule approchant est de petite taille, comme c'est le cas des 2RM par rapport aux véhicules plus grands
- **La compréhension :** La compréhension est le processus par lequel une personne interprète les différentes informations disponibles en utilisant ses connaissances préexistantes. En conduite, cela implique de comprendre les signaux routiers, les comportements des autres usagers. Cette fonction, combinée à l'évaluation, forme l'étape de « diagnostic », nécessaire pour traiter l'information et anticiper les événements futurs, ce que l'on désigne ensuite par l'étape de « pronostic ».

- **Anticipation :** L'anticipation est la capacité à prédire des événements futurs et à préparer des réponses adaptées. Elle repose sur la génération d'hypothèses quant aux évolutions possibles à venir, alimentée par l'expérience du conducteur, ses connaissances et sa compréhension des situations actuelles. En conduite, cela se traduit par la capacité à anticiper les actions des autres usagers de la route. Cette fonction est essentielle optimiser la prise de décision en temps réel et pour éviter les accidents. Par exemple, un conducteur qui anticipe le freinage d'un véhicule devant lui peut commencer à ralentir avant que la situation ne devienne critique.
- **La prévision :** La prévision consiste à estimer les conséquences futures de différentes actions possibles, en se basant sur l'analyse de la situation actuelle. Cette fonction est complémentaire avec la fonction d'anticipation et ensemble elles forment l'étape de pronostic.
- **Attentes :** Les attentes correspondent aux hypothèses sur ce qui est susceptible de se produire dans un contexte donné, basées sur les connaissances et les expériences du conducteur (Allain, 2013). Elles influencent la manière dont les informations sont perçues et interprétées. Les recherches en psychologie montrent que les performances de la perception augmentent si le conducteur s'attend à percevoir un objet Spécifique. Par exemple, le fait d'avoir déjà été impliqué dans un accident conditionne les attentes et améliore les anticipations pour éviter les scénarios de risque (Jimenez, 1997).
- **Décision :** La prise de décision est le processus de sélection d'une action parmi plusieurs alternatives, fondé sur l'analyse des informations disponibles et les objectifs à atteindre (Allain, 2013). Elle peut être effectuée « sous certitude » lorsque le résultat est connu, « sous incertitude » lorsque le résultat est inconnu, mais « sous risque » lorsque les probabilités et les conséquences sont évaluées. En conduite, cela inclut des décisions d'actions telles que le freinage, le changement de voie ou le céder le passage. Une bonne prise de décision requiert une évaluation rapide et précise des situations, souvent sous pression. Par exemple, décider de ralentir ou de s'arrêter complètement à un feu orange dépend de la distance au feu et de la vitesse de déplacement.
- **Comportement contrôlé/automatisé :** : Cette fonction distingue les actions conscientes et délibérées des actions automatiques qui résultent de la pratique et de l'apprentissage. Un comportement contrôlé nécessite une attention et un effort conscients, alors qu'un comportement automatisé se produit avec peu ou pas de pensée consciente. En conduite, de nombreuses actions deviennent automatisées avec l'expérience, comme changer de vitesse ou surveiller les rétroviseurs, permettant au conducteur de libérer des ressources cognitives pour des tâches plus complexes (Posner and Snyder, 2004).

À partir des fonctions humaines de conduite explicitées ci-dessus (perceptives, cognitives, motrices), des travaux ont été menés pour développer un modèle d'analyse de la production de la défaillance fonctionnelle dans le cas d'un accident de la route (Van Elslande, 2003, 2000). Au total, une analyse de 310 situations accidentelles différentes de la base de données des EDA a fait émerger une vingtaine de défaillances fonctionnelles, réparties par la suite en 6 catégories englobant le modèle d'analyse de la défaillance fonctionnelle.

Lors de l'enquête sur un accident, il est important de reconnaître que les défaillances sont souvent interconnectées, formant une chaîne de défaillances. Il est essentiel d'identifier les défaillances les plus pertinentes qui ont conduit à l'accident, tout en tenant compte de celles qui ont pu agir en amont comme facteurs précurseurs ou en aval comme aggravateurs.

Pour comprendre pleinement les causes des dysfonctionnements dans les interactions entre les parties impliquées, il est nécessaire de rechercher ces défaillances chez chacun des protagonistes de l'accident, qu'ils soient considérés comme prioritaires par la législation ou non. En effet, il est possible d'identifier des défaillances fonctionnelles chez un opérateur ou un usager considéré comme prioritaire, ce qui est essentiel pour élaborer des contre-mesures visant à prévenir ces défaillances et à réduire le risque global d'accident.

La figure IV.2 fournit un guide récapitulatif qui synthétise la démarche de questionnement destinée à identifier les échecs fonctionnels expliquant le mieux l'accident étudié. Dans la suite de cette section, nous avons décrit chaque catégorie du modèle. Les descriptions font référence à plusieurs travaux de Van Elslande et al. (2012, 2023) :

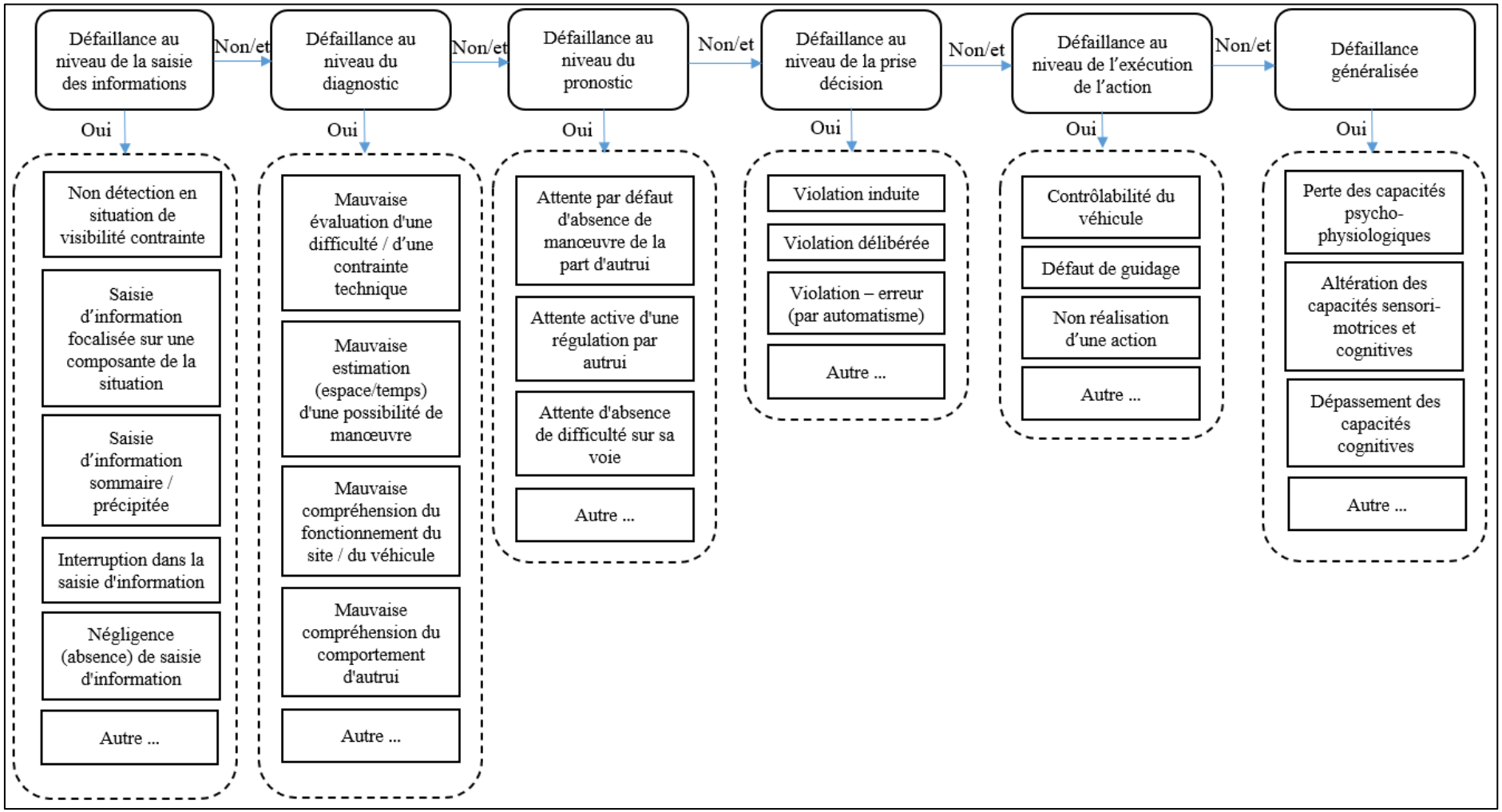


Figure IV. 3. Grille d'analyse des défaillances fonctionnelles des opérateurs de conduite

- **Défaillances à l'étape d'acquisition des informations :** Les défaillances à cette étape peuvent être classées selon trois catégories principales. La première, due à la contrainte de visibilité, survient lorsque les informations essentielles ne sont pas perceptibles à cause de facteurs tels qu'un masquage temporaire ou un contraste insuffisant. La deuxième catégorie résulte d'une mauvaise organisation de la recherche d'informations, subdivisée en deux types : une focalisation excessive sur un seul aspect de la situation, souvent liée à une concurrence attentionnelle intense, et une recherche trop sommaire ou précipitée causée par une faible attention ou une approche trop rapide. Enfin, la troisième catégorie englobe les lacunes de recherche active d'informations, incluant l'interruption momentanée de la surveillance due à des distractions externes et la négligence des exigences de recherche d'informations résultant d'une inattention diffuse ou d'une automatisation excessive des tâches de routine.
- **Défaillances à l'étape de diagnostic :** Les défaillances de diagnostic concernent les erreurs de traitement de l'information qui empêchent le conducteur d'évaluer correctement les paramètres physiques ou de comprendre la situation rencontrée. Elles se divisent en quatre catégories principales. La première se rapporte à une mauvaise évaluation d'une difficulté ponctuelle ou d'une contrainte technique de l'infrastructure, comme la vitesse admissible ou la perte d'adhérence, souvent due à une combinaison de facteurs endogènes (méconnaissance, énervement) et exogènes (difficulté de la tâche). La deuxième concerne l'évaluation incorrecte d'un créneau d'insertion ou de traversée par rapport au trafic environnant, conduisant à des collisions dues à une mauvaise estimation des distances et des temps d'interaction avec d'autres véhicules. La troisième résulte d'une mauvaise compréhension du fonctionnement du site ou du véhicule conduit, souvent due à une méconnaissance des lieux ou des aménagements peu lisibles, entraînant des comportements inappropriés. Enfin, la dernière implique une mauvaise compréhension du comportement d'un autre utilisateur du système, due à l'absence ou à l'ambiguïté des indices émis, ou à une analyse sommaire de l'interaction par le conducteur.
- **Défaillances à l'étape de pronostic :** Les défaillances de traitement à l'étape de pronostic concernent les erreurs de prévision et d'anticipation des conducteurs quant à l'évolution des situations de conduite. Elles se divisent principalement en trois types : Défaillance Pron1, Défaillance Pron2 et Défaillance Pron3.

  1. La Défaillance Pron1, ou l'attente par défaut d'absence de manœuvre de la part d'autrui, se manifeste lorsque les conducteurs, surtout ceux en situation prioritaire, n'anticipent pas les actions imprévues des autres usagers non prioritaires, comme le démarrage soudain d'un véhicule arrêté. Cela résulte souvent de l'absence d'indices visuels et de la confiance excessive dans le respect des règles par les autres usagers, entraînant une surprise lorsque l'inattendu se produit.

  2. La Défaillance Pron2, ou l'attente active d'une régulation par autrui, se produit lorsque les conducteurs supposent que les autres usagers géreront la situation critique. Cette attente repose sur des antécédents habituels et une confiance excessive dans la régulation par autrui, malgré des signaux d'alarme. Elle est souvent exacerbée par l'adhésion rigide aux règles de priorité, la familiarité avec le site, et la pression temporelle.

  3. Enfin, la Défaillance Pron3, ou l'attente d'absence de perturbation sur sa voie, se caractérise par l'anticipation erronée des conducteurs de l'absence d'obstacles sur leur trajectoire malgré une visibilité restreinte. Ils se basent sur un raisonnement incorrect : "si je ne vois rien, c'est qu'il n'y a rien". Cette prévision incorrecte, souvent influencée par des

expériences passées, conduit à des réactions inappropriées lorsqu'une perturbation inattendue survient. Ainsi, ces défaillances illustrent les difficultés des conducteurs à prévoir et anticiper correctement les évolutions dynamiques des situations de conduite, impactant leur capacité à réagir de manière adéquate aux imprévus.

- **Défaillances à l'étape de la prise de décision :** Les défaillances à l'étape de décision concernant la réalisation d'une manœuvre concernent les erreurs de jugement qui conduisent à des actions inadaptées ou à l'absence d'action, influencées par divers facteurs endogènes et exogènes. Ces défaillances incluent les violations des règles de sécurité, définies comme des écarts volontaires par rapport aux pratiques sécuritaires établies. Trois types de défaillances sont identifiés :

  1. La violation induite par les caractéristiques de la situation survient lorsque les conditions de conduite obligent le conducteur à prendre des risques pour naviguer une situation délicate, souvent en raison de défauts d'infrastructure ou de contraintes de trafic. Par exemple, la nécessité de ne pas ralentir excessivement pour éviter des conflits de trajectoire peut inciter à prendre des risques.

  2. La violation intentionnelle d'une règle de sécurité implique des conducteurs qui, pour atteindre des objectifs particuliers (comme rattraper un retard ou éviter une gêne), négligent les exigences de sécurité. Les motivations peuvent inclure la pression de respecter un horaire, la minimisation les temps perdus, ou des intentions transgressives comme tester les capacités d'un véhicule.

  3. La violation-erreur, un type intermédiaire de défaillance, combine des aspects de violation et d'erreur. Elle peut résulter d'un automatisme psychomoteur inopiné ou d'une délégation à autrui de la gestion de la situation, souvent influencée par des facteurs sociaux. Ces différentes formes de défaillances illustrent comment divers facteurs et motivations peuvent conduire à des décisions inappropriées en conduite, augmentant ainsi le risque d'accidents.

- **Défaillances à l'étape de l'exécution :** Les défaillances à l'étape psychomotrice d'exécution de l'action concernent les erreurs commises lors de l'action sur les commandes du véhicule pour guider la trajectoire. Ces problèmes peuvent survenir lorsque l'action désirée est mal réalisée, empêchant ainsi l'atteinte de l'objectif régulateur. Il est utile de distinguer les défaillances d'exécution liées à d'autres étapes de celles qui sont directement à l'origine de l'accident. Bien que rares, ces défaillances se produisent souvent lors de manœuvres d'urgence pour récupérer une situation déjà dégradée. On distingue deux types de défaillances : la mauvaise contrôlabilité du véhicule face à une perturbation externe et le défaut de guidage. La première implique des situations "pièges" à fortes contraintes surprenant le conducteur, empêchant une régulation correcte du véhicule. La seconde concerne un manque d'attention au guidage, dû à la démobilisation de l'attention sur des trajets familiers, ou à un détournement de l'attention vers une tâche annexe, ou encore à des ratés de l'action dus à une mauvaise manipulation des commandes ou à un manque d'expérience. Une autre défaillance plus générale est la non-réalisation d'une action nécessaire pour la sécurité, souvent liée à une omission due au niveau vigilo-attentionnel de l'opérateur ou à la complexité de la tâche.
- **Défaillances générales :** La catégorie des défaillances généralisées se distingue par l'impossibilité d'identifier une seule défaillance spécifique à une séquence fonctionnelle de la conduite. Ces défaillances sont caractérisées par une incapacité globale du conducteur à maîtriser la situation, touchant toutes les étapes, de la collecte d'informations aux actions à

entreprendre. Elles sont souvent liées à des états psychophysiologiques et cognitifs incompatibles avec les exigences de la conduite. On y trouve l'endormissement dû à une fatigue prononcée ou un malaise physiologique, la perte de capacités due à une absorption massive de substances psychotropes comme l'alcool, les drogues, ou certains médicaments, et le dépassement des capacités de conduite dans des situations stressantes, provoquant panique ou sidération. Ces défaillances se devisent en trois parties. La première, la perte des capacités psychophysiologiques, se produit lors de la perte totale de conscience du conducteur, causant une interruption de la conduite et une perte de contrôle du véhicule. Les causes incluent les conditions de vie et de travail ainsi que l'état de santé. Le deuxième, l'altération des capacités sensorielles, biomécaniques et cognitives, résulte d'une intoxication par des substances psychotropes, entraînant une désorganisation de l'activité de conduite. Les conducteurs intoxiqués manifestent des comportements aberrants face à la moindre difficulté. Enfin, la troisième, le dépassement des capacités cognitives, se manifeste par des réactions de panique ou de sidération, souvent chez les conducteurs débutants ou vieillissants, incapables de gérer les difficultés de conduite, même légères.

IV.2.2 Les besoins complémentaires des motocyclistes

Les besoins du conducteur ont été définis comme « *le négatif des défaillances* » ou « *le miroir des défaillances* » (Van Elslande, 2003). Ils représentent des compensations aux défaillances fonctionnelles, et leur satisfaction permet d'éviter l'erreur et, par conséquent, l'accident (Malaterre et Fontaine, 1992; Van Elslande et Fouquet, 2008).

Ces besoins ont été déterminés par l'analyse des défaillances de chaque accident dans la base de données détaillées des EDA (Van Elslande et Fouquet, 2008). Plusieurs besoins ont été définis pour chaque catégorie de défaillances fonctionnelles. Dans cette étude, une réadaptation de ces besoins a été effectuée afin qu'ils puissent correspondre aux conducteurs de 2RM.

Types des besoins extraits du projet « *DaCoTA* » (Van Elslande et al., 2012) et réadaptés sont les suivants :

❖ Besoins de détection : Ils indiquent un besoin de perception du danger.

- Détection d'une difficulté routière inattendu : Ce besoin désigne une difficulté liée à la route (virage serré, chaussée mouillée, etc).

- Détection d'un obstacle fixe : Cela inclut tout obstacle fixe (piéton, objet, animal, véhicule) qui n'a pas était perçu par le conducteur.

- Détection d'un obstacle en mouvement lent : Cela s'applique à tout obstacle (piéton, objet, animal, véhicule) en mouvement lent.

- Détection d'un véhicule en approche sur la même voie : Ce besoin est utilisé pour les collisions frontaux-arrières, et les dépassements. Il peut s'appliquer aux véhicules en approche dans un virage et en cas de manque de visibilité.

- Détection d'un utilisateur par manque de visibilité à une intersection : Codé pour les utilisateurs perçus au dernier moment avant l'impact (e.g, utilisateurs cachés derrière des constructions à une intersection)

- Détection d'un utilisateur en dehors du champ de vision avant : Ce besoin défini la détection d'un autre véhicule derrière ou dans les angles morts.

- Détection d'un utilisateur dans le champ de vision avant (masqué par un objet) : Cela désigne la détection d'autres véhicules cachés par des objets (végétation, autre véhicule…etc.).

- Détection d'une déviation de la trajectoire : Utilisé lorsque le conducteur ne détecte pas une déviation de la trajectoire de son véhicule.

❖ Besoins de diagnostic : Ils indiquent un besoin d'évaluation des informations perçues dans la phase de détection.

- Adapter la vitesse à la géométrie de la route : Ce besoin s'applique en cas d'excès de vitesse par rapport à la géométrie (ex : virage) ou l'état de la route (ex : chaussée glissante).

- Adaptation de la vitesse au réseau routier : Ce besoin concerne les excès de vitesse par rapport à la législation de la route (ex : limitation de vitesse).

- Evaluation du rattrapage d'un usager de la route plus lent : Cela désigne une sous-estimation de la vitesse d'un véhicule situé devant.

- Estimation d'une trajectoire de collision avec un autre utilisateur : Ce besoin correspond à une mauvaise évaluation d'une trajectoire avec un autre utilisateur en approche transversale (intersection).

- Evaluation de l'écart lors d'un dépassement ou d'un changement de voie : Il s'applique lorsque l'autre utilisateur a été perçu mais sa manœuvre a été mal évaluée.

- Évaluation des écarts lors d'une insertion ou d'un croisement de véhicules : Ce besoin désigne les utilisateurs qui n'ont pas la priorité et qui doivent s'insérer dans un flux de véhicules, la manœuvre d'insertion ayant été mal évaluée.

❖ Besoin de prédiction : il désigne les capacités du conducteur à anticiper la manœuvre d'autrui.

- Prédire qu'un autre utilisateur va se retirer ou ne pas s'arrêter : Il s'applique aux intersections où les véhicules prioritaires s'attendent à ce que les autres usagers leur cèdent le passage.

- Prédire qu'un autre utilisateur va ralentir, s'arrêter ou ne pas se désengager : Ce besoin est pertinent lorsque le véhicule devant engage soudainement une manœuvre de freinage.

- Prédire la manœuvre d'un autre utilisateur ou piéton : Ce besoin s'applique lorsqu'il y a une mauvaise interprétation de la fin de la manœuvre d'autrui (par exemple, un véhicule changeant de direction après un dépassement ou un piéton traversant soudainement la route).

- Prédire la manœuvre appropriée pour le fonctionnement du site : Ce besoin désigne une mauvaise interprétation du fonctionnement du site (par exemple, une mauvaise prédiction du fonctionnement du feu tricolore).

❖ Besoin de contrôle : Ils désignent les besoins liés au contrôle de la dynamique du véhicule.

- Besoin en contrôle longitudinal de trajectoire en freinage : Il s'applique lorsqu'il est nécessaire de contrôler longitudinalement le véhicule pendant une phase de freinage (par exemple, blocage des roues, freinage d'urgence).

- Besoin en contrôle longitudinal de trajectoire en accélération : Il est utilisé lorsque le contrôle longitudinal du véhicule est nécessaire pendant une phase d'accélération (par exemple, glissement des roues après une forte accélération).

- Besoin en contrôle latéral de trajectoire : Il désigne le besoin de contrôler latéralement le véhicule lors de sollicitations dynamiques latérales (par exemple, freinage en virage).

❖ Besoin de diagnostic interne : Ils définissent les besoins de diagnostiquer les capacités du conducteurs et/ou du véhicule à évaluer ou comprendre différentes informations.

- Diagnostiquer l'état du motard : Il désigne un besoin en capacités cognitives pour traiter les informations (par exemple, influencées par l'alcool, la fatigue, etc.)

- Diagnostiquer l'état du véhicule : Il désigne un besoin d'évaluation de l'état général des différents systèmes du véhicule (par exemple, freinage, pneus, etc.).

IV.2.3 Méthodologies développées

IV.2.3.1 Liens entre les défaillances et les besoins des motocyclistes

Cette étude se décompose en trois étapes. Dans cette première étape, nous avons développé une méthodologie (illustrée par la figure IV.3) reposant sur une analyse systématique des défaillances fonctionnelles identifiées. Chaque type de défaillance a ensuite été examiné en détail afin de déterminer les besoins spécifiques des conducteurs 2RM susceptibles de compenser ces défaillances. Ces besoins sont essentiels pour combler les lacunes fonctionnelles des conducteurs lors des moments critiques, contribuant ainsi à prévenir les situations de rupture de conduite et, par conséquent, à réduire le risque d'accidents.

Cette méthodologie permet d'établir des liens directs entre ARAS et les défaillances fonctionnelles, en utilisant les besoins complémentaires des conducteurs comme intermédiaires. En d'autres termes, elle vise à déterminer comment les ARAS peuvent répondre aux besoins identifiés pour pallier les insuffisances des conducteurs de 2RM, réduisant ainsi le risque d'accident. Cette approche a pour objectif de fournir une compréhension approfondie des interactions entre les technologies d'assistance et les défaillances humaines.

La matrice finale des liens entre les ARAS et les défaillances fonctionnelles permet d'analyser de manière simultanée l'impact de 14 technologies d'ARAS sur les accidents

impliquant des 2RM. En établissant ces correspondances, il est possible de cibler les technologies les plus efficaces pour chaque type de défaillance, et d'optimiser ainsi la prévention des accidents.

Pour atteindre ces objectifs, une analyse détaillée des fonctionnalités des différentes technologies d'ARAS a été effectuée pour établir comment elles peuvent répondre aux besoins identifiés. Cette étape inclut l'évaluation des capacités des d'ARAS à compenser les défaillances et à améliorer la sécurité des conducteurs.

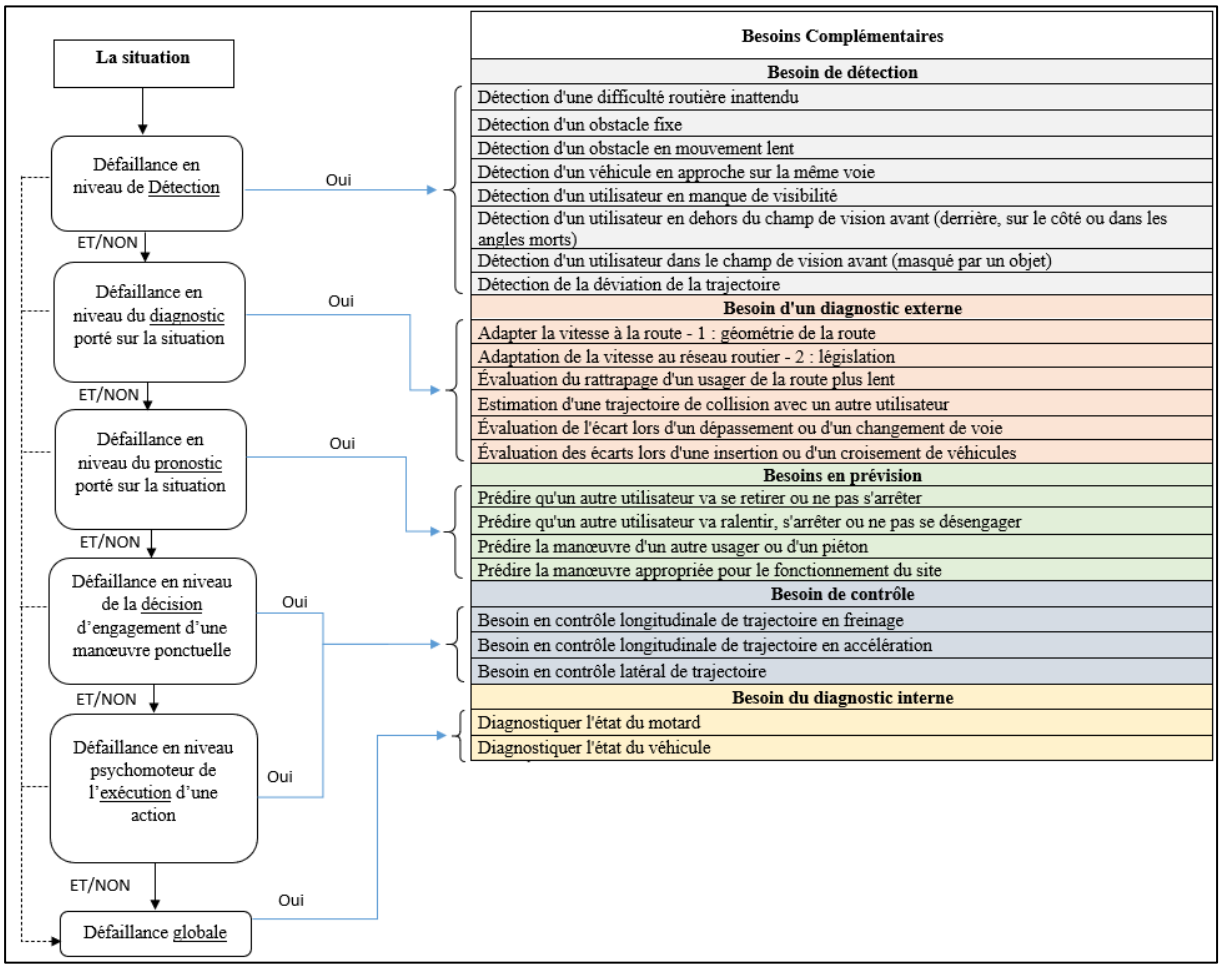


Figure IV. 4. Modèles méthodologiques pour créer un lien entre les ARAS, les besoins et les défaillances.

IV.2.3.2 Étude de cas réels issus des bases de données EDA et IGLAD

a. Sélection des accidents

Pour analyser l'effet des ARAS en utilisant la méthodologie développée lors de la deuxième étape, une sélection des accidents impliquant des 2RM a été effectuée. Les cas EDA ont été choisis en fonction des données disponibles pour chaque accident. Pour définir une ou plusieurs défaillances fonctionnelles dans un accident, il était essentiel de réaliser des entretiens avec chaque participant, l'un sur le lieu de l'accident et un autre effectué quinze jours plus tard. L'analyse de ces entretiens, combinée à d'autres données telles que les reconstructions cinématiques et les plans des accidents, nous a permis de valider les défaillances fonctionnelles

définies pour chaque phase de l'accident. Cette sélection des cas de l'EDA a abouti à une liste de 249 accidents.

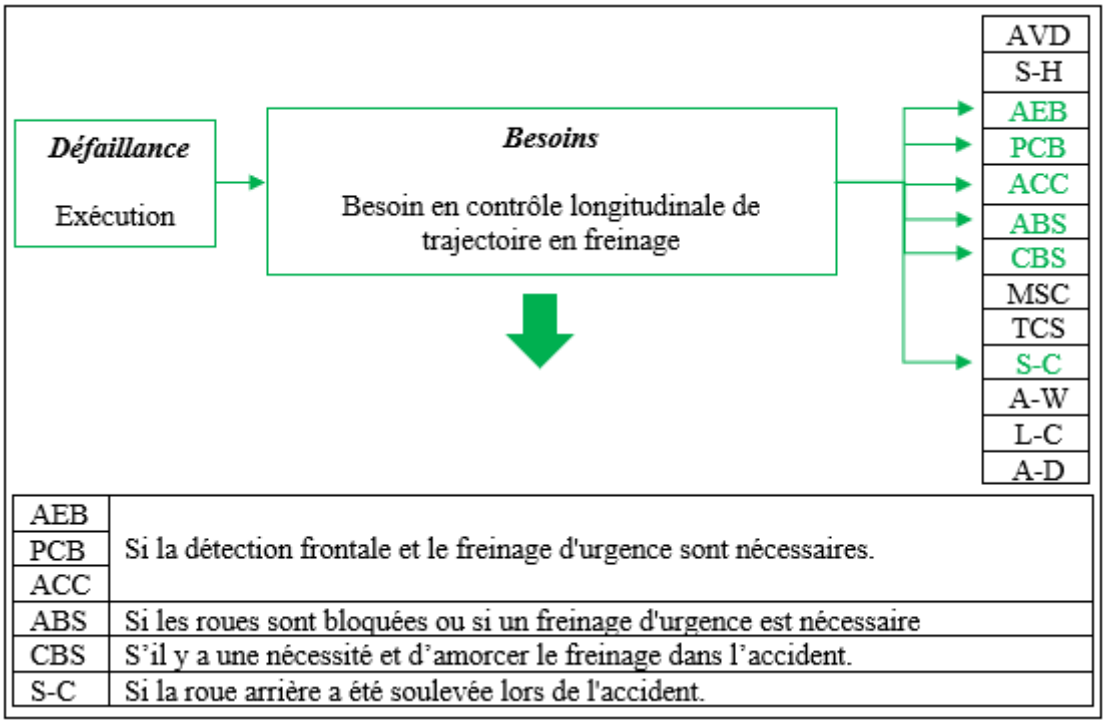
En revanche, il est important de souligner qu'IGLAD n'utilise pas les mêmes modèle et codage que le HFF pour déterminer les défaillances fonctionnelles de chaque accident. Néanmoins, une analyse de la production des erreurs humaines a été réalisée pour chaque cas, conduisant à la définition de nombreuses défaillances. Nous avons ensuite utilisé ces défaillances, ainsi que les schémas et les reconstructions cinématiques disponibles dans IGLAD, pour adapter cette analyse des défaillances à un modèle et un codage conforme au HFF. Comme toutes les informations nécessaires n'étaient pas disponibles pour les 240 cas d'IGLAD, une sélection a été faite en fonction de la disponibilité de ces informations, afin de ne retenir que les accidents correctement documentés. Cela a abouti à la sélection de 141 cas.

b. Processus de traitement des accidents

Une fois les liens entre les ARAS, les besoins complémentaires et les défaillances fonctionnelles établis lors de la première étape, la deuxième étape consiste à évaluer l'impact des ARAS sur les accidents. Cette phase repose sur l'analyse de la valeur ajoutée des ARAS. Les systèmes déjà présents sur chaque moto dans les bases de données ne sont pas pris en compte lors de la compilation des résultats. Par exemple, si, au moment d'un accident, une moto est déjà équipée d'un ARAS, ce système est considéré comme n'ayant eu aucun effet sur la moto dans cet accident, car notre objectif est de déterminer la valeur ajoutée des ARAS sur les conséquences observées dans chaque accident.

L'analyse des accidents implique d'examiner chaque cas individuellement pour déterminer si un ou plusieurs ARAS auraient pu influencer le déroulement de l'accident. Cette analyse est réalisée en fonction des défaillances identifiées dans chaque cas. Ces défaillances servent ensuite à identifier les besoins spécifiques du conducteur pendant chaque accident. Chaque besoin est ensuite associé à un ou plusieurs ARAS, en fonction de leurs fonctionnalités et critères de déclenchement (voir la section II.1.3). Le rôle du besoin dans notre méthodologie est de réduire le champ de sélection des ARAS à une liste plus restreinte de systèmes par rapport à la liste générale.

Il est important de noter que la sélection finale des ARAS répondant aux mêmes besoins est basée sur leurs fonctionnalités spécifiques. Concrètement, cela signifie que pour chaque accident, nous identifions d'abord les défaillances fonctionnelles et les besoins associés du conducteur. Ensuite, nous déterminons quels ARAS, en fonction de leurs caractéristiques techniques et de leurs conditions d'activation, auraient pu répondre à ces besoins et potentiellement modifier le cours de l'accident. Cette méthode nous permet de cibler les systèmes qui offrent une valeur ajoutée dans les situations d'accident analysées, et de comprendre comment ces systèmes pourraient améliorer la sécurité des conducteurs de 2RM.



AEB	Si la détection frontale et le freinage d'urgence sont nécessaires.
PCB	
ACC	
ABS	Si les roues sont bloquées ou si un freinage d'urgence est nécessaire
CBS	S'il y a une nécessité et d'amorcer le freinage dans l'accident.
S-C	Si la roue arrière a été soulevée lors de l'accident.

Figure IV. 5. Exemple explicatif de la méthodologie d'analyse des accidents

La figure IV.4 illustre un exemple pour clarifier cette méthodologie. Dans cet exemple, la défaillance observée était une défaillance d'exécution, entraînant un besoin de contrôle longitudinal de la trajectoire pendant le freinage. Cette analyse a conduit à une première sélection de six technologies d'ARAS parmi les 14 disponibles. Ensuite, les technologies les plus susceptibles d'avoir un effet sur le cas d'accident ont été choisies en fonction de leurs critères de déclenchement.

IV.2.3.3 Extrapolation des données EDA à l'échelle nationale

Dans le cadre de cette analyse qualitative des effets des ARAS sur les accidents impliquant un 2RM, un travail supplémentaire a été effectué afin de donner du sens et de concrétiser les résultats obtenus à partir de la base de données EDA. Ce travail consiste en une pondération des résultats de la base de données EDA à l'échelle nationale française. Le choix de cette approche, focalisée uniquement sur les accidents des EDA, s'explique par l'absence de données mondiales adéquates dans la base de données IGLAD permettant de pondérer l'ensemble de nos résultats.

La pondération des résultats des EDA à l'échelle française a suivi plusieurs étapes :

i. Définition de la variable de pondération : Cette variable est essentielle pour extrapoler les résultats d'un petit échantillon à un échantillon plus large. Pour répondre à cette exigence, il était nécessaire que cette variable soit présente dans les deux échantillons. Cette étape s'est révélée être un défi, car nous devions trouver une variable commune aux EDA et à une base de données nationale d'accidents. De plus, cette variable devait être pertinente pour pondérer les effets des ARAS. La variable retenue est « la manœuvre à l'origine de l'accident », car

elle est disponible dans les deux bases de données nationale (voir section III.1.1.3).

ii. La deuxième étape consistait à classer les accidents des EDA selon les scénarios définis. Ce travail a été réalisé en se basant sur le dossier de chaque accident (plan, reconstitution de l'accident, etc.) afin de déterminer le scénario le plus approprié pour chaque accident.

iii. La troisième étape consistait à calculer le pourcentage d'efficacité de chaque ARAS selon chaque scénario dans les EDA.

iv. Dans la quatrième étape, les résultats obtenus dans la troisième étape ont été pondérés sur la base de données nationales, en suivant l'hypothèse suivante :

« Si un ARAS a eu un effet sur X% de cas dans les EDA pour un scénario SCi (i = 1 à "autre"), ce même ARAS pourrait avoir un effet de X% sur le même SCi dans la base de données de 1000 PV ».

v. La cinquième étape consistait à recalculer le pourcentage d'effet de chaque ARAS pour la base de données des 1000 PV, avec l'hypothèse :

« Si un ARAS a X% d'efficacité dans le scénario SCi EDA, il aura aussi X% d'efficacité dans SCi France. ». Nous calculons donc le nombre de cas où l'ARAS a une efficacité au niveau national Yi dans le scénario i par l'équation (IV.1).

$$Yi = \frac{Xi}{SCi} \qquad Eq\ \text{IV.1}$$

Avec, SCi : Nombre totale des cas d'accidents dans ce scénario à l'échelle française.

i = de 1 jusqu'à "autre".

Puis nous calculons le pourcentage d'efficacité de l'ARAS au niveau national par l'équation (IV.2).

$$Z = \frac{\sum Yi}{1000} \qquad Eq\ \text{IV.2}$$

IV.3 Résultats et discussions

IV.3.1 Statistiques des défaillances fonctionnelles et des besoins des conducteurs

L'analyse des accidents en fonction des défaillances fonctionnelles a permis d'identifier plusieurs catégories de besoins, chacun correspondant à des défaillances spécifiques observées lors des accidents étudiés. La répartition de ces défaillances est illustrée dans la figure IV.5, tandis que les besoins associés sont présentés sous forme de pourcentages dans le tableau IV.1. Ces résultats mettent en évidence une diversité de besoins liés aux différentes situations rencontrées par les motocyclistes :

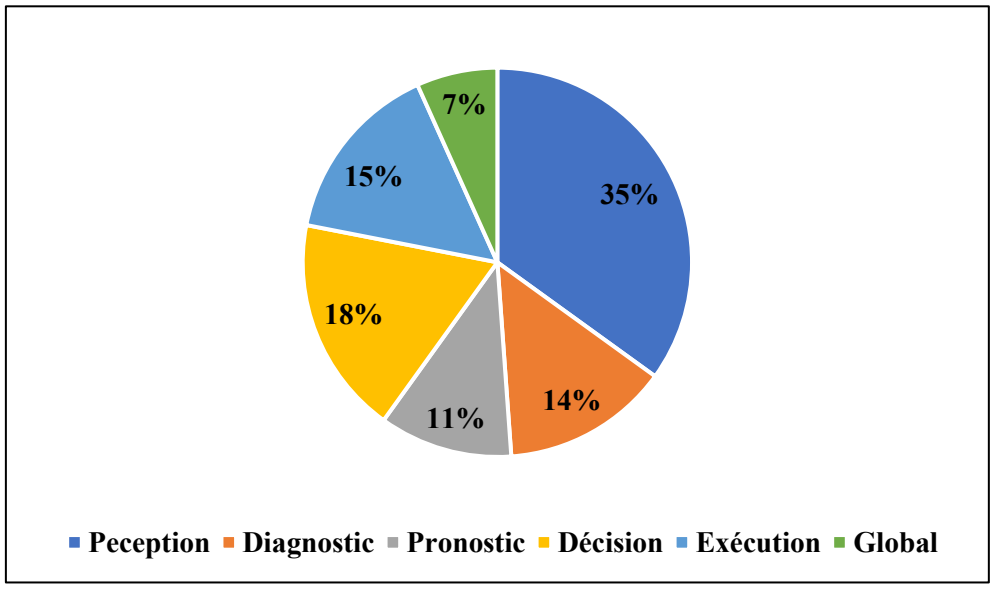


Figure IV. 6. Distribution des types de défaillances fonctionnelles dans les accidents analysés

1. **Défaillances et besoins à l'étape d'acquisition des informations** : Ces défaillances sont les plus fréquentes 35%, et sont principalement dues à des contraintes de visibilité, une mauvaise organisation de la recherche d'informations, et des lacunes dans la surveillance active. Les besoins de détection concernent 7% des cas nécessitant l'identification d'une difficulté routière inattendue, 12% la détection d'un véhicule en approche sur la même voie, 8% celle d'un utilisateur en dehors du champ de vision avant, 1% la détection d'un obstacle fixe, 3% celle d'un obstacle en mouvement lent, et 3% celle d'un utilisateur dont la visibilité est réduite à une intersection. Par ailleurs, 1% des cas impliquent la détection d'un utilisateur masqué dans le champ de vision avant par un objet, tandis qu'aucun cas identifié ne concerne la détection d'une déviation de trajectoire. L'analyse ces défaillances fonctionnelles dans les accidents impliquant des motocyclistes révèle des observations précieuses sur les situations critiques rencontrées par les motocyclistes et les besoins spécifiques à satisfaire pour améliorer leurs réactions. Ces défaillances, dues aux

contraintes de visibilité et à une mauvaise organisation de la recherche d'informations, montrent que les motocyclistes doivent être mieux équipés pour percevoir les dangers. Par exemple, des systèmes d'alerte visuelle ou sonore pourraient améliorer la détection des obstacles et des conditions de la route

2. **Défaillances et besoins à l'étape de diagnostic** : Ces défaillances compte 14% des cas. Elles se manifestent par des erreurs de traitement de l'information qui empêchent les conducteurs d'évaluer correctement les paramètres de la situation, comme l'évaluation incorrecte des créneaux d'insertion, la compréhension erronée du fonctionnement des infrastructures, et l'interprétation inexacte des comportements des autres usagers. Les besoins liés à ces défaillances concernent principalement l'adaptation de la vitesse à la géométrie de la route (5% des cas), l'estimation d'une trajectoire de collision avec un autre utilisateur 8%, et l'évaluation des écarts lors d'une insertion ou d'un croisement de véhicules 1%. En revanche, aucun cas identifié ne concerne le besoin d'adaptation de la vitesse au réseau routier, l'évaluation du rattrapage d'un usager plus lent ou l'évaluation des écarts lors d'un dépassement ou d'un changement de voie. Ces erreurs soulignent le besoin de formation approfondie pour améliorer les compétences des conducteurs en matière d'évaluation et de prise de décision, telles que l'évaluation des conditions routières.
3. **Défaillances et besoins à l'étape de pronostic** : Elles concernent les erreurs de prévision et d'anticipation des conducteurs quant à l'évolution des situations de conduite 11%. Cela inclut des attentes erronées vis-à-vis des manœuvres des autres usagers, la régulation par autrui, et l'absence de perturbation sur leur voie. Les besoins de prédiction ont été identifiés dans 8% des cas où il était nécessaire d'anticiper qu'un autre utilisateur allait se retirer ou ne pas s'arrêter, 2% pour prédire qu'un autre utilisateur allait ralentir, s'arrêter ou ne pas se désengager, et 1% pour anticiper la manœuvre d'un autre utilisateur ou piéton. Aucun besoin n'a été identifié pour prédire la manœuvre appropriée en fonction du fonctionnement du site. Ces résultats montrent que la prévision correcte des manœuvres des autres usagers reste un défi, nécessitant des interventions éducatives ciblées et des technologies d'assistance à la conduite comme le V2V. En outre, l'utilisation des simulateurs de conduite dans la formation des motocyclistes, incluant différents scénarios liés aux erreurs de prédiction, peut-être une piste prometteuse pour répondre aux différents besoins liés à ces défaillances fonctionnelles.
4. **Défaillances à l'étape de la prise de décision (18 %) et de l'exécution (15 %), ainsi que les besoins qui en découlent** : Les erreurs de décisions conduisent à des actions inappropriées ou à l'absence d'action, influencées par divers facteurs endogènes et exogènes. Elles incluent des violations des règles de sécurité, induites par les caractéristiques de la situation ou des motivations intentionnelles et des automatismes psychomoteurs. Pau ailleurs les défaillances de l'exécution surviennent lors de l'action sur les commandes du véhicule, où l'action souhaitée est mal réalisée. Elles incluent des problèmes de contrôlabilité du véhicule face à des perturbations externes et un manque d'attention au guidage. Les besoins découlant de ces défaillances concernent principalement le contrôle longitudinal de trajectoire en freinage, qui représente 25% des cas, tandis que le contrôle longitudinal en accélération ne concerne que 1% des situations et le contrôle latéral de trajectoire, 7%. L'analyse de ces résultats met en évidence que les défaillances liées à la prise de décision et à l'exécution cumulent 33% des cas. La corrélation entre ces défaillances et les besoins de contrôle est manifeste, notamment en ce qui concerne le contrôle longitudinal de trajectoire en freinage, qui est le plus répandu.

Cela suggère que les erreurs de décision ou d'exécution lors des situations de freinage sont fréquentes et qu'il est nécessaire d'améliorer les compétences de freinage tout en intégrant des systèmes d'assistance.

Tableau IV. 1. Répartition des besoins des conducteurs de motocyclettes dans les accidents étudiés

Besoins complémentaires	Résultats
Besoin de détection	
Détection d'une difficulté routière inattendu	7%
Détection d'un obstacle fixe	1%
Détection d'un obstacle en mouvement lent	3%
Détection d'un véhicule en approche sur la même voie	12%
Détection d'un utilisateur en manque de visibilité	3%
Détection d'un utilisateur en dehors du champ de vision avant (derrière, sur le côté ou dans les angles morts)	8%
Détection d'un utilisateur dans le champ de vision avant (masqué par un objet)	1%
Détection de la déviation de la trajectoire	0%
Besoin d'un diagnostic externe	
Adapter la vitesse à la route - 1 : géométrie de la route	5%
Adaptation de la vitesse au réseau routier - 2 : législation	0%
Évaluation du rattrapage d'un usager de la route plus lent	0%
Estimation d'une trajectoire de collision avec un autre utilisateur	8%
Évaluation de l'écart lors d'un dépassement ou d'un changement de voie	0%
Évaluation des écarts lors d'une insertion ou d'un croisement de véhicules	1%
Besoins en prévision	
Prédire qu'un autre utilisateur va se retirer ou ne pas s'arrêter	8%
Prédire qu'un autre utilisateur va ralentir, s'arrêter ou ne pas se désengager	2%
Prédire la manœuvre d'un autre usager ou d'un piéton	1%
Prédire la manœuvre appropriée pour le fonctionnement du site	0%
Besoin de contrôle	
Besoin en contrôle longitudinale de trajectoire en freinage	25%
Besoin en contrôle longitudinale de trajectoire en accélération	1%
Besoin en contrôle latéral de trajectoire	7%
Besoin du diagnostic interne	
Diagnostiquer l'état du motard	7%
Diagnostiquer l'état du véhicule	0%

5. **Défaillances générales (7%) et besoins de diagnostic interne** : Les défaillances liées à cette étape se caractérisent par une incapacité globale du conducteur à maîtriser la situation, affectant toutes les étapes, de la collecte d'informations aux actions à entreprendre. Elles sont souvent liées à des états psychophysiologiques et cognitifs incompatibles avec les exigences de la conduite, comme l'endormissement, l'intoxication par des substances psychotropes, et le dépassement des capacités cognitives dans des situations stressantes. Les besoins de diagnostic interne indiquent que 7% des cas nécessitent de diagnostiquer l'état du motard, alors qu'aucun besoin n'a été identifié concernant le diagnostic de l'état du véhicule. Ces résultats soulignent, d'une part, la nécessité de poursuivre la sensibilisation des motocyclistes aux dangers de la conduite en état d'ébriété ou de fatigue

et, d’autre part, d’accélérer le développement des ARAS visant à évaluer l’état des motocyclistes avant qu’ils ne prennent la route.

En somme, cette analyse détaillée des défaillances fonctionnelles et des besoins des motocyclistes met en évidence les domaines critiques nécessitant des interventions spécifiques. La prévalence des défaillances à l’étape d’acquisition des informations et de prise de décision souligne l'importance de dispositifs améliorant la perception et de stratégies de formation. Les besoins en détection, en diagnostic et en contrôle montrent que des améliorations technologiques et des programmes de formation ciblés peuvent jouer un rôle important dans l’amélioration de la sécurité des usagers de 2RM.

IV.3.2 Liens entre défaillances fonctionnelles, besoins des conducteurs et ARAS

La première étape de cette étude a permis de développer une matrice de liaisons entre les ARAS, les besoins complémentaires et les défaillances fonctionnelles des motards. Cette analyse approfondie a révélé plusieurs aspects importants concernant l'efficacité et la couverture des différents ARAS face aux besoins spécifiques des motards.

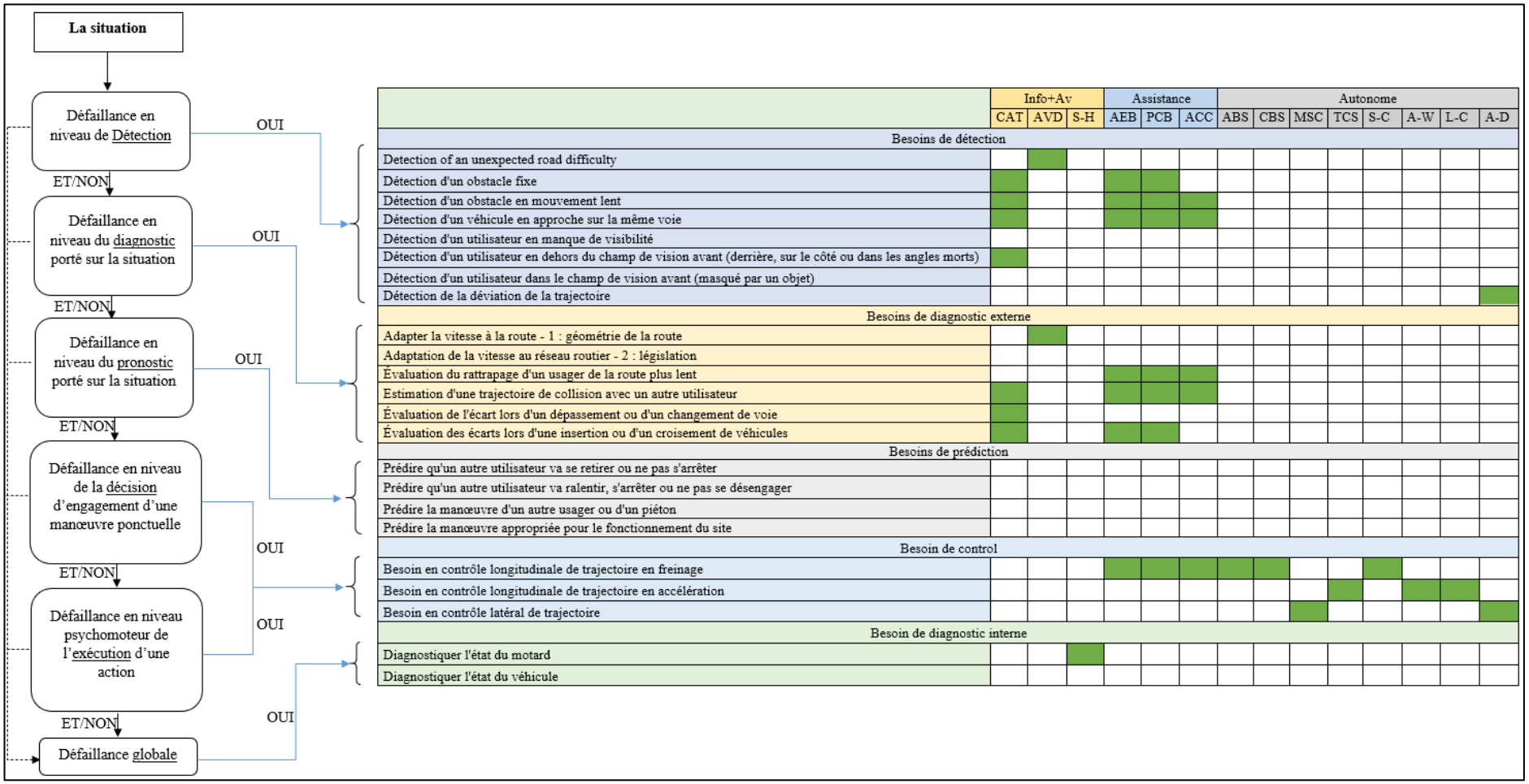
Les systèmes destinés à des fonctions d’information et d’avertissement, tels que le CAT, ont montré leur capacité à répondre aux besoins et aux défaillances liés à la détection et au diagnostic. Le CAT, grâce à sa surveillance à 360° assurée par deux caméras, couvre une large gamme de besoins de détection, bien qu'il présente certaines limitations. Par exemple, il ne parvient pas à détecter des utilisateurs masqués par des objets, un domaine où des technologies comme le V2V (Véhicule-à-Véhicule) ou le V2E (Véhicule-à-Environnement) seraient nécessaires. En outre, le CAT permet l’analyse des distances avec d'autres utilisateurs, ce qui lui confère une capacité partielle à couvrir les besoins de diagnostic.

D'autres technologies dans cette catégorie, telles que l’AVD et le S-H, contribuent également à la couverture des défaillances de détection et de diagnostic. L’AVD, par exemple, avertit les motards sur des virages serrés à venir, tandis que le S-H surveille l’état du conducteur par rapport à son alcoolémie permettant ainsi de couvrir un besoin de diagnostic interne.

La catégorie des ARAS dite "assistance" inclut des technologies telles que le AEB, le PCB et l’ACC. Ces systèmes interviennent sur les besoins de détection, de diagnostic, de décision et d’exécution. Grâce à l'intégration de caméras et de radars, ces technologies peuvent détecter des dangers potentiels, diagnostiquer la situation et engager automatiquement des manœuvres de freinage d'urgence pour éviter les collisions, démontrant ainsi leur polyvalence et leur capacité à intervenir dans diverses situations critiques.

Les systèmes dits "autonomes" se concentrent principalement sur les besoins de décision et d'exécution. Par exemple, le TCS répond aux besoins de décision en détectant une différence de rotation entre les roues avant et arrière, et en gérant automatiquement la puisse fournie par le moteur pour maintenir la stabilité du véhicule. De même, l’ABS répond aux besoins d’exécution en contrôlant longitudinalement le véhicule lors d’un freinage, empêchant le blocage des roues et assurant une meilleure maîtrise du véhicule.

Cette étude montre que, bien que chaque catégorie d'ARAS couvre différentes défaillances et besoins, il existe des lacunes spécifiques qui nécessitent le développement ou l'intégration de technologies complémentaires. En identifiant ces lacunes, les fabricants de systèmes de sécurité peuvent orienter leurs efforts vers des solutions plus complètes et efficaces, améliorant ainsi la sécurité globale des motards.



	Info+Av			Assistance			Autonome							
	CAT	AVD	S-H	AEB	PCB	ACC	ABS	CBS	MSC	TCS	S-C	A-W	L-C	A-D
Besoins de détection														
Detection of an unexpected road difficulty		■												
Détection d'un obstacle fixe	■			■	■									
Détection d'un obstacle en mouvement lent	■			■	■	■								
Détection d'un véhicule en approche sur la même voie	■			■	■	■								
Détection d'un utilisateur en manque de visibilité														
Détection d'un utilisateur en dehors du champ de vision avant (derrière, sur le côté ou dans les angles morts)	■													
Détection d'un utilisateur dans le champ de vision avant (masqué par un objet)														
Détection de la déviation de la trajectoire														■
Besoins de diagnostic externe														
Adapter la vitesse à la route - 1 : géométrie de la route		■												
Adaptation de la vitesse au réseau routier - 2 : législation														
Évaluation du rattrapage d'un usager de la route plus lent				■	■	■								
Estimation d'une trajectoire de collision avec un autre utilisateur	■			■	■	■								
Évaluation de l'écart lors d'un dépassement ou d'un changement de voie	■													
Évaluation des écarts lors d'une insertion ou d'un croisement de véhicules	■			■	■									
Besoins de prédiction														
Prédire qu'un autre utilisateur va se retirer ou ne pas s'arrêter														
Prédire qu'un autre utilisateur va ralentir, s'arrêter ou ne pas se désengager														
Prédire la manœuvre d'un autre usager ou d'un piéton														
Prédire la manœuvre appropriée pour le fonctionnement du site														
Besoin de control														
Besoin en contrôle longitudinale de trajectoire en freinage				■	■	■	■	■			■			
Besoin en contrôle longitudinale de trajectoire en accélération										■		■	■	
Besoin en contrôle latéral de trajectoire									■					■
Besoin de diagnostic interne														
Diagnostiquer l'état du motard			■											
Diagnostiquer l'état du véhicule														

Figure IV. 7. Matrice de liens entre défaillances fonctionnelles, besoins des conducteurs et systèmes ARAS

IV.3.3 Effet global des ARAS sur les accidents analysés

Suite à l'application de notre méthodologie d'analyse des accidents sur les bases de données sélectionnées, les résultats obtenus ont été examinés en détail. Le premier résultat analysé concerne la fréquence d'influence possible des ARAS dans les accidents impliquant des 2RM, tel que représenté dans le figure IV.7.

Il est notable que dans 61% des cas étudiés, soit 240 accidents sur 390, les ARAS auraient pu influencer les conséquences des accidents. Cette influence se manifeste par la capacité des ARAS à prévenir ou à atténuer les conséquences des accidents, démontrant ainsi leur efficacité potentielle en matière de sécurité pour les motocyclistes. Plusieurs facteurs peuvent expliquer pourquoi nous avons pu atteindre un taux d'influence de 61% des ARAS. Par exemple, les fonctionnalités spécifiques de certains ARAS jouent un rôle déterminant. Le système ABS permet de prévenir le blocage des roues, assurant ainsi une meilleure stabilité et contrôle du véhicule lors de freinages brusques. L'AEB et le PCB permettent d'effectuer des freinages d'urgence en détectant automatiquement les obstacles et en réduisant la vitesse pour éviter ou atténuer l'impact. L'ACC quant à lui aide à maintenir une distance de sécurité avec le véhicule précédent, réduisant ainsi les risques de collisions frontales. Ces fonctionnalités, parmi d'autres, contribuent de manière remarquable à l'amélioration de la sécurité des usagers de 2RM.

Il est également important de noter que dans 39% des cas d'accidents, soit 150 cas, les ARAS n'ont montré aucune influence. Ce résultat met en lumière les limites actuelles de ces systèmes dans certaines situations. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette inefficacité relative des ARAS dans ce sous-ensemble d'accidents. Premièrement, la vulnérabilité inhérente des 2RM par rapport aux véhicules à quatre roues est un élément important. Les motocyclistes sont plus exposés aux risques de la route, et les conséquences d'un accident sont souvent plus graves. Les ARAS, bien qu'efficaces dans de nombreux scénarios, peuvent être insuffisants pour contrer la gravité des accidents impliquant des 2RM, notamment ceux survenant à grande vitesse ou dans des conditions routières défavorables. Deuxièmement, les comportements à risque des conducteurs de 2RM réduisent l'efficacité des ARAS. La conduite à grande vitesse, le non-respect des règles de circulation et l'usage de substances altérant les capacités de conduite sont des comportements qui peuvent compromettre la performance des ARAS. Les technologies actuelles ne sont pas toujours capables de compenser les décisions dangereuses prises par les motocyclistes. Cela souligne la nécessité d'une meilleure éducation à la sécurité routière et de campagnes de sensibilisation pour encourager des comportements de conduite plus sûrs. De plus, certains types d'accidents, comme ceux impliquant des conditions météorologiques extrêmes, des routes en mauvais état, ou des interactions complexes avec d'autres usagers de la route, restent difficiles à prévenir, même avec des ARAS avancés. Ces situations requièrent des améliorations continues des technologies d'assistance et une intégration plus sophistiquée des systèmes de détection et de prévention des collisions.

Pour conclure, bien que les résultats montrent une efficacité notable des ARAS dans la réduction des accidents de 2RM, ils mettent également en lumière les défis persistants dans ce domaine. L'optimisation des technologies existantes et le développement de nouvelles solutions

sont essentiels pour améliorer la sécurité des motocyclistes. Parallèlement, des efforts supplémentaires sont nécessaires pour influencer positivement les comportements des motocyclistes et pour adapter les infrastructures routières afin de maximiser l'impact des systèmes de sécurité sur la prévention des accidents.

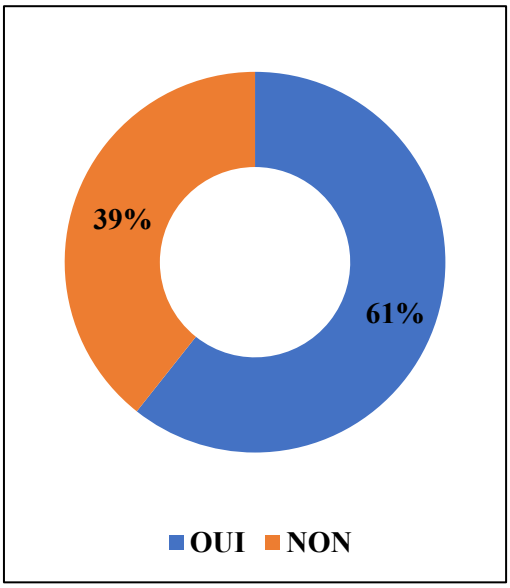


Figure IV. 8. Effet des ARAS sur les accidents

IV.3.4 Influence de chaque ARAS

Le deuxième résultat porte sur la fréquence d'intervention de chaque ARAS dans les bases de données analysées (figure IV.8). Ces fréquences ont été déterminées à partir des 61% de cas d'accidents où les ARAS ont eu une influence. Parmi ceux-ci, l'ABS s'est révélé être le plus influent, avec un taux d'intervention de 34% (133 accidents). Cette influence peut être attribuée d'une part à la capacité de l'ABS à prévenir le blocage des roues lors de freinages d'urgence, et d'autre part, à son assistance aux technologies de freinage d'urgence lors de leurs interventions sur un accidents. Ce résultat corrobore avec les études de Teoh (2011) et Rizzi et al. (2015) qui ont montré une influence de 37% et 34% respectivement. Cependant, il diffère de l'étude de Lich et al. (2015), dans laquelle l'effet de cette technologie est évalué à 74%. Cette différence peut être due aux types d'accidents analysés dans les deux études. Dans notre étude, tous les types de scénarios d'accidents ont été pris en compte pour analyser l'effet de tous les ARAS, tandis que dans l'étude de Lich et al. (2015), seuls les accidents qui rentrent dans le champ d'application de l'ABS ont été sélectionnés.

En deuxième position, la technologie CAT a influencé 31% des cas, soit 120 accidents. Cette technologie, grâce à sa surveillance à 360° de l'environnement du motocycliste, fournit des avertissements précoces sur les dangers potentiels, aidant ainsi à prévenir les collisions. Dans cette étude, ce système s'est avéré très avantageux en Inde où la majorité des grandes routes comportent plusieurs voies, ce qui engendre de nombreuses collisions dans les angles morts des 2RM. Les systèmes de freinage d'urgence AEB et PCB se classent en troisième position avec une influence de 28% (109 accidents). Ces systèmes de freinage d'urgence sont conçus pour détecter des situations critiques et appliquer automatiquement des freinages, ce qui

explique leur contribution importante à la réduction des accidents. Leur influence est particulièrement notable dans les situations où le temps de réaction du motocycliste est insuffisant pour prévenir une collision.

L'ACC, une technologie similaire au freinage d'urgence, se situe en quatrième position avec une influence de 17% (68 accidents). Bien qu'il ait une influence moindre par rapport aux systèmes de freinage d'urgence, il joue un rôle important en maintenant une distance de sécurité constante avec le véhicule précédent, réduisant ainsi le risque de collisions arrière.

Plus bas dans le classement, trois systèmes, le S-H, l'AVD et le CBS, ont chacun une influence de 8% (32 accidents). Bien qu'ils apparaissent moins influents que d'autres technologies, mais ils apportent une contribution à la sécurité des motocyclistes. Le S-H, par exemple, surveille le taux d'alcoolémie du motocycliste. En cas de dépassement d'un seuil critique, il avertit d'abord le conducteur, puis contacte les services d'urgence si nécessaire, réduisant ainsi les risques associés à la conduite en état d'ébriété. L'AVD, quant à lui, avertit le motocycliste des virages dangereux, permettant une anticipation et une adaptation de la vitesse et de la trajectoire, ce qui réduit les risques de perte de contrôle dans des courbes serrées ou mal signalées. Le CBS active simultanément les freins avant et arrière, optimisant la distribution de la force de freinage. Cette fonctionnalité permet un freinage plus stable et plus efficace, réduisant la distance de freinage et améliorant la sécurité lors des arrêts d'urgence.

Le MSC suit avec un impact de 6% (25 accidents). Cette technologie, grâce à la prise en compte de plusieurs paramètres tels que l'angle de roulis en virage, adapte la pression de freinage sur les roues avant et arrière, évitant ainsi une perte de contrôle causée par une manœuvre de freinage inadaptée. Le TCS et l'A-D ont chacun un impact de 2% (8 accidents). Ces deux technologies améliorent la stabilité du 2RM dans les situations de dérapage : le TCS en accélérant en virage ou en ligne droite, et l'A-D en virage, évitant ainsi les situations de « low-side ».

Enfin, le S-C a eu un effet marginal, influençant environ 1% des cas (4 accidents). Les systèmes d'A-W et de L-C n'ont eu aucune influence sur les accidents analysés. Le faible impact du S-C, ainsi que l'absence d'influence des systèmes d'A-W et de L-C, peuvent être attribués à leur utilisation plus restreinte ou à leur pertinence moindre dans les scénarios d'accidents analysés. Le S-C, conçu pour prévenir les "stoppies" (lorsque la roue arrière se soulève), et les systèmes d'A-W et de L-C, visant à contrôler les wheeling (lorsque la roue avant se soulève) et les démarrages rapides, ne jouent pas un rôle aussi critique dans les situations d'accidents courantes.

En résumé, l'analyse de l'influence de chaque ARAS met en lumière la diversité des contributions de ces systèmes à la sécurité des motocyclistes. Bien que certains systèmes se distinguent par leur efficacité dans la prévention et la réduction des conséquences des accidents, d'autres présentent des avantages spécifiques dans des contextes particuliers. Ces résultats soulignent l'importance d'une approche intégrée combinant plusieurs ARAS pour maximiser la sécurité des motocyclistes sur les routes.

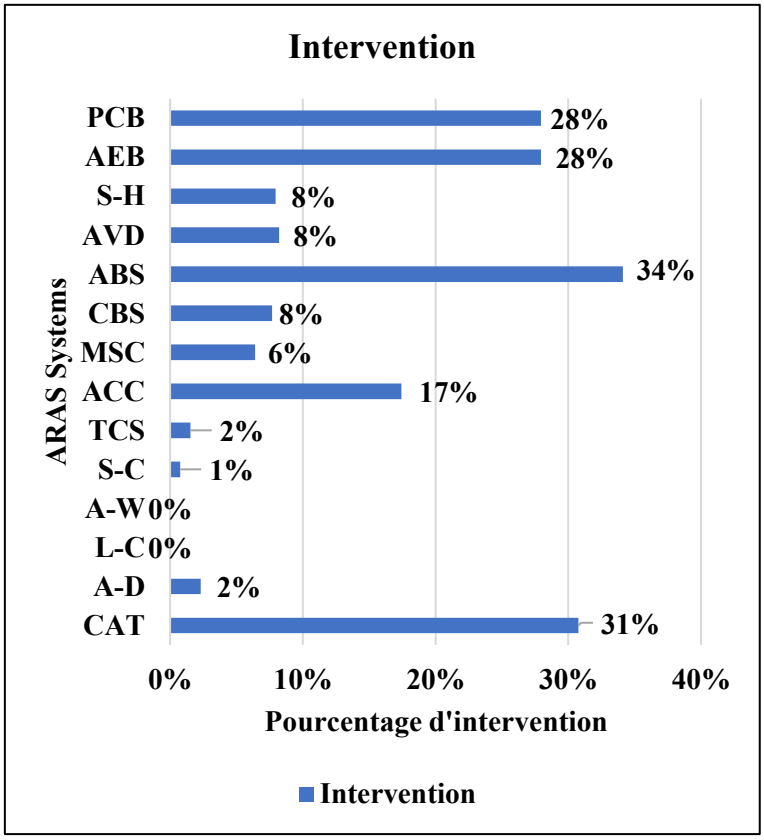


Figure IV. 9. Fréquence d'intervention de chaque ARAS

Pour compléter cette analyse, nous avons examiné le nombre de motos équipées d'un ou plusieurs systèmes ARAS au moment de l'accident. Bien que ces technologies présentes sur les motos n'aient pas été prises en compte dans les analyses (voir section IV.2.3.2) cette information fournit une indication sur la faible présence des technologies ARAS dans l'échantillon étudié.

Dans les bases de données analysées, nous avons observé que certaines motos étaient déjà équipées de technologies ARAS. En tout, 31 motos sur 390 cas d'accidents possédaient au moins un ARAS, ce qui représente environ 9% de l'échantillon. Cette répartition est la suivante : 21 motos dans la base EDA, représentant 5%, et 10 motos dans la base IGLAD, représentant environ 4%.

En analysant plus en détail, nous avons constaté que l'ABS était l'ARAS le plus fréquemment présent dans nos bases de données. En effet, l'ABS était installé sur 19 motos (dont 10 dans la base EDA et 9 dans la base IGLAD). De plus, d'autres technologies ont été identifiées : le CBS était présent sur 7 motos et le TCS sur 2 motos, tous deux uniquement dans les accidents de la base EDA. Par ailleurs, dans la base IGLAD, nous avons trouvé une moto équipée de l'ACC. Ces résultats n'ont pas influencé nos analyses des accidents, car il a été déterminé que ces technologies n'ont pas eu d'impact sur les accidents concernés. En effet, nous nous sommes concentrés uniquement sur la valeur ajoutée des ARAS dans chaque accident. De plus, dans cette étude, nous avons inclus des accidents impliquant des motos équipées de certains ARAS afin d'explorer si d'autres ARAS, non présents sur ces motos, auraient pu jouer un rôle dans la prévention de l'accident ou dans la réduction de sa gravité. Cette approche a permis d'évaluer le potentiel d'autres systèmes d'assistance à la conduite qui pourraient mieux répondre aux besoins de sécurité des motocyclistes.

IV.3.5 Évaluation pondérée des effets des ARAS sur les accidents en France

Le dernier résultat que nous avons établi concerne la pondération des données issues de la base de données des EDA sur un échantillon plus vaste, à savoir une base de données nationale. Le tableau IV.2 présente l'ensemble des résultats de cette analyse.

Dans la première section du tableau (en rouge), nous avons affiché le pourcentage de chaque scénario dans chaque base de données. Les proportions des scénarios dans les EDA ont généralement suivi celles de la base de données nationale. Par exemple, le scénario SC3, englobant les accidents en intersection, représente 44,2% des cas dans les EDA et 36,7% en France. Ensuite les scénarios SC5, regroupant les accidents de perte de contrôle, représentent 17,3% dans les EDA, et SC1 16,9%. En France, les scénarios SC1 occupent la deuxième position avec 21,3%, suivis par les scénarios SC5 avec 14,7%. Cette constatation met en évidence la nécessité de développer des stratégies ciblées pour réduire ces types d'accidents, en intégrant efficacement les ARAS dans les intersections et les zones à haut risque

Dans la deuxième partie du tableau (en vert), nous avons présenté le pourcentage d'effet de chaque ARAS dans chaque scénario. Les ARAS tels que le CAT, AEB, PCB, ABS, et CBS montrent un effet sur tous les scénarios définis, tandis que d'autres systèmes comme le MSC et TCS montrent des effets sur des scénarios spécifiques. Les résultats mettent également en lumière l'importance d'adapter les ARAS aux spécificités de chaque scénario d'accident. La proportion d'effet de chaque ARAS dans chaque scénario a généralement suivi les proportions obtenues dans les EDA et mentionnées dans la littérature (Terranova et al., 2022), avec l'ABS en tête, suivi par le CAT, l'AEB et le PCB.

Enfin, la dernière partie du tableau (en jaune) présente l'effet global de chaque ARAS dans la base de données nationale. Nous avons constaté que l'ABS a eu le plus grand effet avec 39,1% (391 cas), suivi par l'AEB et le PCB avec 30,1% (301 cas) chacun, et le CAT avec 29,8% (298 cas). Les autres ARAS suivent avec 17,3% (173 cas) pour l'ACC et 11,7% (117 cas) pour le CBS, tandis que les autres technologies ont des pourcentages inférieurs à 10%.

Ces résultats permettent de mieux comprendre la répartition et l'impact des différents scénarios d'accidents ainsi que l'effet des ARAS sur la réduction des accidents en France. Ils fournissent une base solide pour le développement de stratégies visant à améliorer la sécurité des motocyclistes à travers des interventions ciblées et l'intégration accrue des systèmes ARAS.

Tableau IV. 2. Analyse pondérée des scénarios d'accidents et des effets des ARAS sur la base de données nationale

Scénarios	EDA	France	Effet de chaque ARAS dans chaque scénario													
			CAT	AVD	SH	AEB	PCB	ACC	ABS	CBS	MSC	TCS	SC	AW	LC	AD
SC1	16,9	21,3	38,1	11,9	0	35,7	35,7	26,2	40,5	19	11,9	2,4	0,0	0	0	2,4
SC2	9,2	4,7	34,8	4,3	4,3	30,4	30,4	21,7	34,8	4,3	0	0	0,0	0	0	0
SC3	44,2	36,7	32,7	1,8	1,8	38,2	38,2	19,1	47,3	12,7	2,7	0,9	2,7	0	0	3,6
SC4	5,2	12,3	30,8	0	0	23,1	23,1	15,4	38,5	15,4	0,0	0	0,0	0	0	0
SC5	17,3	14,7	9,3	25,6	11,6	9,3	9,3	4,7	18,6	2,3	30,2	7	0,0	0	0	4,7
SC Autre	7,2	10,3	27,8	16,7	5,6	27,8	27,8	11,1	38,9	5,6	11,1	0	0,0	0	0	11,1
Effet de chaque ARAS en France			29,8	8,9	3,2	30,1	30,1	17,3	39,1	11,7	9,1	1,9	1	0	0	3,7

IV.4 Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre était de réaliser une analyse qualitative des effets de 14 systèmes ARAS sur les accidents impliquant des 2RM. Ce chapitre joue un rôle essentiel dans le cadre de la thèse, car il constitue la première partie de notre double analyse (qualitative et quantitative) des effets des ARAS. En se concentrant sur l'analyse qualitative, ce chapitre vise à établir :

1- Des bases solides pour comprendre comment les défaillances fonctionnelles des conducteurs de 2RM peuvent être influencées par les ARAS en situation d'accident.
2- Une perspective sur les systèmes ARAS prometteurs à analyser quantitativement.

Pour mener à bien cette étude, nous avons adopté une approche méthodologique en trois étapes principales. La première étape consistait à identifier et à établir des liens entre les différents ARAS et les défaillances fonctionnelles des conducteurs de 2RM en situation d'accident. Cette étape initiale a permis de créer une matrice de liens et une base de données compréhensive des interactions potentielles entre les technologies ARAS et les comportements des conducteurs.

La seconde étape de notre méthodologie a impliqué l'analyse détaillée de 390 cas d'accidents de 2RM, sélectionnés à partir de deux bases de données d'accidents existantes EDA et IGLAD. Dans cette étape, chaque cas a été étudié individuellement pour évaluer l'influence potentielle de chaque système ARAS sur l'accident. Cette analyse minutieuse a permis de qualifier les impacts des ARAS sur la sécurité des 2RM.

La dernière étape a consisté à extrapoler les résultats obtenus sur la base de données des EDA à l'échelle nationale française.

Les analyses effectuées dans ce chapitre ont révélé plusieurs résultats remarquables. Premièrement, il a été observé que 61% des accidents analysés auraient pu être influencés par

les technologies d'ARAS. Cette conclusion souligne le rôle potentiel important que ces systèmes peuvent jouer dans l'amélioration de la sécurité des usagers de 2RM. Ensuite, certains systèmes ARAS, tels que l'ABS, l'AEB, le CAT et l'ACC, ont montré un effet plus important que d'autres, notamment le MSC, le CBS et l'AVD, qui interviennent principalement dans des situations spécifiques. Par ailleurs, certains ARAS, tels que le S-C, l'A-W et le L-C, ont eu un faible impact car ils sont principalement destinés à des motos de course.

En conclusion, ce chapitre a apporté des éclaircissements précieux sur les effets qualitatifs des ARAS sur la sécurité des 2RM. Les résultats obtenus confirment l'importance et le potentiel des systèmes ARAS pour améliorer la sécurité des 2RM, tout en soulignant les domaines où des améliorations sont encore nécessaires. Ces conclusions serviront de base pour les analyses quantitatives qui suivront, afin de fournir une évaluation complète et intégrée des bénéfices des ARAS dans la prévention des accidents de 2RM.

Chapitre V

Analyse de l'effet d'un Active Cruise Control sur les accidents des 2RM

Table des matières

Chapitre V

Analyse de l'effet d'un Active Cruise Control sur les accidents des 2RM

V.1 Revue de littérature 101

V.2 Matériel et méthodes 103

V.2.1 Présentation de la technologie de l'ACC 103

V.2.2 Hypothèses 104

V.2.3 Sélection et préparation des données 105

V.2.4 Processus de calcul de l'impact de l'ACC sur les accidents de 2RM 105

V.2.5 Méthodologie de calcul du bénéfice de l'ACC sur les accidentés blessés graves à l'échelle nationale 109

V.3 Résultats de l'étude 113

V.3.1 Étude paramétrique 113

V.3.2 Bénéfices de l'ACC à 30 m 115

V.3.2.1 Tous les accidents de l'échantillon 115

V.3.2.2 Les accidents non évitables avec l'ACC 116

V.3.3 Bénéfices de l'ACC à 40 m 118

V.3.3.1 Tous les accidents de l'échantillon 118

V.3.3.2 Les accidents non évitables avec l'ACC 119

V.3.4 Les bénéfices de l'ACC sur les blessés graves 120

V.3.4.1 Répartition des accidents en fonction des vitesses d'impact 121

V.3.4.2 Bénéfices de l'ACC sur les blessés graves 124

V.4 Discussions 127

V.5 Conclusion 131

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer l'impact du système d'Adaptive Cruise Control (ACC) sur les accidents de 2RM. Alors que l'ACC a fait ses preuves dans la réduction des accidents pour les véhicules à quatre roues, son application aux motos demeure relativement inexplorée. Les systèmes d'ACC sont conçus pour maintenir une distance de sécurité avec les véhicules précédents, mais les spécificités des motos, telles que leur maniabilité et leur vulnérabilité accrue, posent des défis uniques pour leur intégration dans la sécurité routière. Ce chapitre se propose de combler une lacune dans la littérature en analysant l'effet potentiel de l'ACC sur la fréquence et la gravité des accidents impliquant des 2RM, en s'appuyant sur des scénarios réalistes basés sur des données empiriques.

L'étude s'appuie sur l'analyse des données d'accidents et la modélisation des scénarios d'accidents, tout en prenant en compte des paramètres comme la vitesse d'impact, la distance de déclenchement du système et les différents modes de fonctionnement de l'ACC. Les résultats visent à fournir une évaluation approfondie de l'efficacité de l'ACC pour réduire les blessures graves et les accidents non évitables, en vue de proposer des recommandations pour l'amélioration de ces systèmes et leur déploiement sur les motos.

V.1 Revue de littérature

Une recherche approfondie dans les bases de données scientifiques n'a révélé aucune étude traitant de l'évaluation de cette technologie appliquée aux 2RM. En l'absence de travaux spécifiques sur ce sujet, nous avons élargi notre analyse aux études existantes qui explorent l'influence de l'ACC sur l'accidentalité dans d'autres modes de transport, tels que les voitures.

Les études concernant l'évaluation de la technologie de l'ACC pour les 4RM ont débuté très tôt après son développement dans les années 90. L'étude menée par (Hoedemaeker et al., 1998) analyse comment les conducteurs s'adaptent aux technologies de l'ACC en fonction de leur style de conduite. Pour ce faire, 38 participants (25 hommes, 13 femmes) ont été répartis en quatre groupes en fonction de leurs réponses à un questionnaire sur leur style de conduite, axé sur deux dimensions : la vitesse (driving fast) et l'attention (ignorer les distractions). Les participants ont conduit dans un simulateur de conduite, d'abord sans ACC, puis avec trois conditions d'ACC différentes. Les résultats montrent que, quel que soit leur style de conduite, les conducteurs adoptent un comportement plus risqué avec un ACC, notamment en roulant à une vitesse plus élevée, en maintenant des distances de sécurité plus courtes et en appliquant une force de freinage plus importante lors d'arrêts d'urgence. Ces adaptations comportementales pourraient potentiellement réduire la sécurité routière, bien que les conducteurs aient généralement évalué l'ACC de manière positive en termes de confort et d'utilité. Les participants ont jugé la conduite avec ACC moins exigeante mentalement que sans ACC, et les groupes de conducteurs lents ont trouvé l'ACC plus confortable et utile que les groupes de conducteurs rapides. Cependant, ces derniers, qui sont également ceux à risque plus élevé d'accidents, sont moins enclins à accepter le système ACC.

Une autre étude plus récente menée par Larsson (2012) révèle des conclusions différentes concernant l'amélioration des comportements des conducteurs et de leurs adaptations avec l'ACC. Cette recherche explore l'utilisation et la perception de ACC par les conducteurs dans leur conduite quotidienne. L'objectif principal était de comprendre comment les conducteurs interagissent avec l'ACC, en particulier lorsqu'ils doivent reprendre le contrôle en raison des limitations du système. Pour mener cette étude, un questionnaire qualitatif a été envoyé à 632 propriétaires de Volvo XC60 en Suède, dont 130 ont répondu. Le questionnaire comportait 17 questions visant à identifier les incidents où le système ACC a surpris les conducteurs et à recueillir des informations sur leur compréhension et utilisation du système. Les résultats de l'enquête montrent que les conducteurs deviennent progressivement plus conscients des limitations du système au fil du temps, ce qui peut être bénéfique pour la prise de contrôle en situations inattendues. La majorité des utilisateurs activent l'ACC sur les autoroutes et les grandes routes, mais le désactivent souvent dans les zones urbaines ou sur les routes sinueuses. Certains conducteurs ont signalé des situations où le système perdait le contact avec le véhicule précédent, notamment dans les virages serrés ou les ronds-points, ce qui pouvait provoquer une accélération inattendue. Bien que certains utilisateurs oublient parfois si le système est activé ou non, cela n'a pas conduit à des accidents graves, mais souligne néanmoins des défis dans la conception de l'interface utilisateur du système.

Une étude menée par Ma et al. (2005) avait pour objectif d'évaluer l'impact d'un ACC et des conversations téléphoniques sur la situation de conduite, la charge de travail mentale et les performances de conduite. Les auteurs ont utilisé une simulation de conduite où les participants étaient assignés à des conditions de conduite avec ou sans ACC, et avec ou sans conversation téléphonique. Les résultats ont montré que l'utilisation de l'ACC améliore la situation de conduite des conducteurs en augmentant leur perception, compréhension et évaluation des situations de conduites. Plus précisément, les conducteurs utilisant l'ACC ont démontré une meilleure conscience de la situation et une réduction de la charge de travail mentale, permettant une gestion plus précise de la vitesse et de la distance de sécurité. Ces résultats suggèrent que l'ACC allège la charge cognitive liée au contrôle de la vitesse et de la distance de suivi, ce qui améliore la capacité des conducteurs à percevoir et à réagir à l'environnement de conduite.

Des études ultérieures ont examiné l'impact de technologies plus avancées que l'ACC, telles que le CACC (Cooperative Adaptive Cruise Control). Li et al. (2017) ont évalué l'influence du CACC sur la réduction des risques de collisions arrière. Le CACC est une technologie avancée de régulation de vitesse qui utilise la communication entre véhicules pour améliorer la sécurité et l'efficacité. Il permet aux véhicules de suivre de manière plus précise et plus sûre en utilisant des données provenant de véhicules leaders et voisins. Dans cette étude, les chercheurs ont modélisé le CACC en se basant sur le modèle IDM (Intelligent Driver Model- qui représente le comportement de conduite humain dans les simulations de trafic). Ils ont ensuite réalisé des simulations sur un tronçon d'autoroute de 15 km avec trois types de véhicules : ceux contrôlés par le modèle IDM, ceux équipés d'ACC, et ceux utilisant le CACC. Les simulations ont évalué différents paramètres, notamment les temps de réponse et les écarts de temps entre véhicules. Les résultats montrent que le CACC offre des bénéfices notables en termes de sécurité. Lorsqu'il est correctement paramétré, avec un écart de temps désiré de 0,6s et un délai de communication de 0,3 seconde, le CACC permet de réduire les risques de collisions arrière de plus de 90 %. En comparaison avec les véhicules contrôlés par le modèle

IDM, ou avec un ACC, les performances du CACC sont supérieures, en raison de la communication entre véhicules, ce qui améliore encore la sécurité routière.

Enfin, l'étude de Larsson suggère que les systèmes ACC actuels pourraient être moins néfastes pour les performances des conducteurs. Le fait que le système ne soit pas parfait oblige les conducteurs à reprendre régulièrement le contrôle, ce qui pourrait les aider à rester plus attentifs et engagés dans la conduite.

V.2 Matériel et méthodes

Pour atteindre l'objectif principal d'évaluer quantitativement l'impact de la technologie ACC sur les accidents impliquant des 2RM, deux méthodologies complémentaires ont été développées.

1. La première consiste à quantifier l'effet de ce système à partir d'un échantillon d'accidents réels de 2RM reconstruits. Cette approche permet d'estimer le pourcentage d'accidents qui auraient pu être évités ou atténués grâce à l'ACC, en testant plusieurs configurations de déclenchement et distances d'activation du système.
2. La deuxième méthodologie vise à élargir cette analyse à l'échelle nationale en projetant les résultats initiaux pour évaluer l'impact potentiel de l'ACC sur les blessures graves dans l'ensemble du pays.

Dans cette section, nous commencerons par rappeler la définition et le fonctionnement de la technologie ACC, tels que présentés dans le chapitre II. Ensuite, nous détaillerons le processus de sélection et de préparation des accidents pour l'analyse, avant de présenter les deux méthodologies mentionnées ci-dessus.

V.2.1 Présentation de la technologie de l'ACC

Parmi les technologies de l'ACC développées par les industriels, telles que présentées dans le chapitre 2, nous nous sommes concentrés sur la première technologie développée dans ce sens, offrant une régulation de vitesse en fonction de la distance de sécurité. Cette technologie a été développée par BMW®.

L'ACC, développé par BMW Motorrad (BMW Media information., 2020), est un système de régulation de vitesse intelligent qui intègre la gestion automatique de la distance avec le véhicule précédent. Grâce à un capteur radar situé à l'avant du véhicule, l'ACC ajuste la vitesse de la moto pour maintenir une distance prédéfinie par le conducteur, offrant ainsi une conduite plus sûre et plus confortable. Ce système est particulièrement efficace lors des trajets sur autoroute ou dans des environnements de circulation modérée, où il réduit la nécessité d'interventions fréquentes du conducteur pour réguler la vitesse ou freiner.

L'ACC repose sur trois fonctions de contrôle principales : la régulation de la vitesse, la gestion de la distance et la gestion en virage. La régulation de la vitesse, similaire aux

régulateurs de vitesse classiques, permet de maintenir une vitesse définie, tandis que la gestion de la distance ajuste automatiquement cette vitesse en fonction du véhicule devant. Le contrôle en virage réduit la vitesse dans les courbes pour maintenir une inclinaison confortable de la moto. Toutefois, il est important de noter que l'ACC n'intervient que pour les véhicules en mouvement et ne réagit pas aux obstacles immobiles, comme ceux à la fin d'un embouteillage, où le conducteur doit reprendre le contrôle total du freinage.

Ce système offre deux modes de conduite ajustables, "confortable" et "dynamique", permettant au conducteur de choisir entre une accélération et une décélération plus douce ou plus marquée, selon le style de conduite souhaité. Bien que l'ACC améliore considérablement la sécurité en automatisant la gestion de la vitesse et des distances, le conducteur reste responsable en tout temps et peut désactiver ou ajuster manuellement le système si nécessaire.

V.2.2 Hypothèses

❖ Première hypothèse

Une première hypothèse a été établie concernant les capacités de décélération de l'ACC : 3 m/s² pour le mode "confortable" et 5 m/s² pour le mode "dynamique". Ces valeurs sont basées sur des études liées au freinage AEB (Autonomous Emergency Braking). Bien que les objectifs de l'ACC et de l'AEB diffèrent, ces deux technologies partagent certaines caractéristiques. Tandis que l'AEB intervient exclusivement en situation d'urgence pour éviter ou atténuer une collision, l'ACC assure le maintien d'une distance de sécurité tout en étant capable de réagir dans des situations critiques, assumant alors un rôle de freinage d'urgence. Cette similitude dans leurs capacités de freinage justifie l'utilisation des valeurs de décélération de l'AEB comme référence pour l'ACC.

❖ Deuxième hypothèse

La seconde hypothèse repose sur la capacité de l'ACC, telle que décrite par le constructeur, à détecter les obstacles en mouvement situés à l'avant du véhicule. Afin d'envisager une extension de cette technologie à la détection d'obstacles immobiles ou arrivant latéralement, nous avons formulé l'hypothèse que l'ACC pourrait potentiellement détecter des obstacles dans un champ de vision de ±10° par rapport à l'axe longitudinal du 2RM (Figure V.1). Cette hypothèse est inspirée des systèmes déployés dans l'automobile, où un angle de détection global de 30° (±15°) est fréquemment utilisé, comme mentionné dans (Arita et al., 2007).

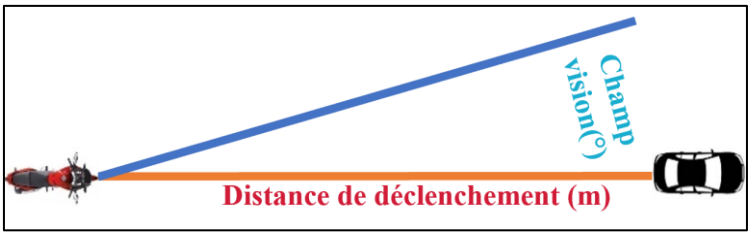


Figure V. 1. Les paramètres de l'ACC

V.2.3 Sélection et préparation des données

Afin d'évaluer l'impact potentiel de l'ACC sur les accidents impliquant des 2RM, nous avons initialement exploité deux bases de données d'accidents, EDA et IGLAD. Ces bases contiennent un total de 390 cas d'accidents impliquant des 2RM, couvrant diverses configurations d'accidents. L'utilisation de ces bases de données nous a permis de disposer d'un échantillon varié, incluant des accidents avec différents types de scénarios.

Une première étape de notre analyse, présentée dans le chapitre IV, a consisté en une étude qualitative des cas d'accidents. Cette analyse a mis en évidence 68 cas pour lesquels l'ACC aurait pu avoir un impact sur les conséquences de l'accident. Ces cas ont été sélectionnés en fonction de plusieurs critères, tels que les défaillances et les besoins des motards. Toutefois, pour aller au-delà d'une évaluation qualitative et mener une étude quantitative rigoureuse, il a été nécessaire de se concentrer sur les accidents pour lesquels des données détaillées étaient disponibles, permettant une reconstitution spatio-temporelle précise.

La méthodologie que nous avons adoptée repose en effet sur des simulations précises des accidents, avec et sans intervention de l'ACC. Cela nécessite des informations complètes sur la cinématique des véhicules, les distances de freinage, les vitesses initiales et les moments exacts des interventions de freinage. En conséquence, seuls les cas d'accidents disposant de ces données ont été retenus pour l'analyse finale. Après cette sélection, l'échantillon de travail s'est réduit à 49 cas d'accidents, pour lesquels une reconstitution complète et fiable a pu être effectuée. Ces cas représentent principalement des accidents de type frontal-arrière pour le 2RM (qui entrent dans le champ d'application de la technologie de l'ACC), ce qui permet l'évaluation de l'efficacité potentielle de cette technologie dans la réduction des risques d'accidents ou l'atténuation de leurs conséquences.

Ainsi, cette étape de sélection, rigoureusement basée sur la disponibilité des données et la faisabilité des reconstitutions, constitue une base solide pour l'analyse quantitative présentée dans ce chapitre.

V.2.4 Processus de calcul de l'impact de l'ACC sur les accidents de 2RM

La méthodologie pour évaluer les effets de l'ACC sur les accidents impliquant des 2RM s'appuie sur les principes des lois du mouvement, avec une analyse dans une seule dimension, celle du vecteur vitesse du 2RM lors de l'accident. Cela a nécessité la projection des différents vecteurs de vitesse des véhicules impliqués, et la prise en compte du sens de déplacement de ces véhicules.

Chaque cas a été examiné individuellement pour déterminer si le motocycliste a freiné pendant l'accident et à quel moment. Pour les accidents sans freinage du motocycliste, l'analyse s'est concentrée sur la séquence de freinage de l'ACC. Pour les accidents avec freinage du motocycliste, l'analyse a été divisée en deux séquences distinctes : celle du freinage de l'ACC et celle du freinage du motocycliste (Figure V.2).

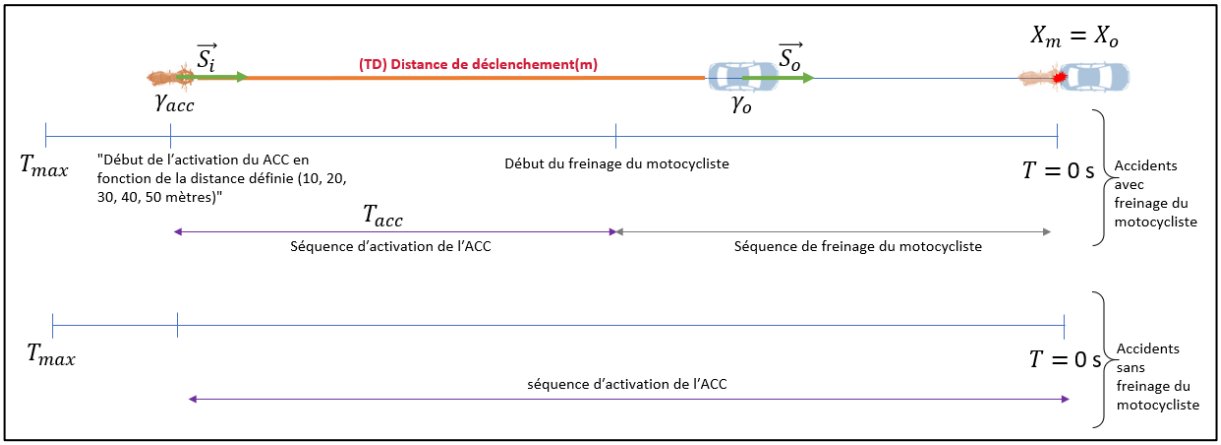


Figure V. 2. Diagramme d'accident avec et sans freinage du motard

Dans la suite de l'analyse, les termes suivants seront utilisés :

- ❖ Vitesse initiale : La vitesse de chaque véhicule au moment du déclenchement de l'ACC.
- ❖ Vitesse finale : La vitesse de chaque véhicule à la fin du calcul, soit la vitesse au choc s'il y a eu choc, soit la vitesse calculée à la fin du processus d'analyse en l'absence de choc.

La Figure V.3 illustre les différentes étapes de calcul selon le type d'accident analysé, avec ou sans freinage du motocycliste. Pour des accidents où le motocycliste n'a pas freiné, la vitesse finale de la moto a été calculée selon les étapes a.1 à a.4.

a.1. Détermination de l'instant présumé du choc, lorsque les positions de la moto et du véhicule adverse coïncident (Figure V.2). Cet instant t a été calculé en utilisant comme point de départ l'instant de déclenchement de l'ACC, à partir des données de reconstitution de l'accident et de la distance de déclenchement définie (TD), selon l'équation V.1. (Détails dans l'annexe 2)

$$t = \frac{S_i - S_o - \sqrt{(S_o - S_i)^2 - 2(\gamma_o - \gamma_{acc})TD}}{\gamma_o - \gamma_{acc}} \qquad Eq\ \text{V.1}$$

Avec : S_i Vitesse initale de la moto
S_o Vitesse initale du véhicule adverse
γ_{acc} Décélération de l'ACC
γ_o Décélération du véhicule adverse
TD Distance de déclenchement

a.2. Calcul de la vitesse finale du véhicule obstacle :
En utilisant l'instant présumé du choc calculé en première étape, la vitesse finale du véhicule obstacle a été calculée. Cela a été réalisé en dissociant les différentes situations envisageables et en associant la vitesse finale du véhicule obstacle à un calcul ou une valeur :

- Si la collision est jugée impossible, c'est-à-dire s'il n'existe aucun t tel que Xm = Xo, alors le véhicule obstacle a continué à rouler jusqu'à ce qu'il s'arrête, puisqu'il n'y a pas de choc, d'où Sf_o= 0.
- S'il y a collision, la vitesse finale du véhicule obstacle a été calculée en utilisant l'instant présumé du choc t selon l'équation V.2.

$$S_f = \gamma_o \,.\, t + |S_0| \qquad Eq\ V.2$$

a.3. Calcul de la distance parcourue par le véhicule obstacle :

A partir de la vitesse du véhicule obstacle calculée précédemment, la distance parcourue par le véhicule obstacle a été recherchée grâce à l'équation V.3.

$$DC_o = \frac{Sf_o^2 - S_o^2}{2\gamma_o} \qquad Eq\ V.3$$

a.4. Calcul de la vitesse finale de la moto :

Dans cette dernière étape, la vitesse finale de la moto a été calculée en se basant sur les données obtenues lors des trois étapes précédentes.

Tout d'abord, il a été vérifié si le véhicule obstacle était en mouvement, c'est-à-dire si $Sf_o \neq 0$.

Si tel était le cas, la vitesse finale de la moto a été calculée en utilisant l'équation V.4.

$$Sf_m = \gamma_{acc}.t + S_i \qquad Eq\ V.4$$

Si le véhicule obstacle était à l'arrêt, c'est-à-dire si $Sf_o = 0$, il était vérifié si le véhicule adverse se déplaçait en sens inverse (si $S_0 > 0$). Le but de cette condition était de déterminer la formule appropriée pour calculer la distance restante entre la moto et le véhicule obstacle ($(TD + DC_o)\ ou\ (TD - DC_o)$). Une fois cette condition vérifiée concernant le véhicule obstacle, la vitesse finale de la moto était calculée à l'aide de l'une des équations V.5 ou V.6.

$$Sf_m = \sqrt{S_i^2 + 2\gamma_{acc}(TD + DC_o)} \qquad Eq\ V.5$$

$$Sf_m = \sqrt{S_i^2 + 2\gamma_{acc}(TD - DC_o)} \qquad Eq\ V.6$$

Pour le second type d'accidents, avec un freinage du motocycliste, la vitesse finale de la moto a été calculée à partir de deux séquences distinctes (Figure V.2). La première séquence correspond au freinage de la moto par l'ACC, depuis l'instant de déclenchement jusqu'au début de freinage du motocycliste, avec les étapes de calcul b.1 à b.3.

b.1. Calcul de la vitesse intermédiaire de la moto à la fin de la séquence du freinage de l'ACC (S_{int-m}) à partir de la vitesse initiale de la moto (S_i) fournie par les bases de données, la décélération programmée par l'ACC (γ_{acc}) et sa durée d'activation (T_{acc}), à l'aide de l'équation V.7.

$$S_{int-m} = \gamma_{acc}.T_{acc} + S_i \qquad Eq\ V.7$$

Avec

$T_{acc} = Le\ moment\ où\ l'ACC\ est\ susceptible\ d'être\ activé - Le\ moment\ du\ début\ de\ freinage\ du\ motard$

b.2. Calcul de la vitesse intermédiaire du véhicule adverse à la fin de cette séquence de freinage de l'ACC, en se basant sur la vitesse initiale du véhicule adverse S_o, sa décélération renseignée dans les bases de données (γ_0) et la durée d'activation de l'ACC (T_{acc}), équation V.8 :

$$S_{int-o} = \gamma_0 . T_{acc} + |S_0| \qquad Eq\ \text{V.8}$$

b.3. Calcul de la distance restante entre les deux véhicules à la fin de la séquence du freinage de l'ACC, à partir des paramètres calculés précédemment :

- Dans le cas où le véhicule obstacle est dans le même sens que la moto (équation V.9).

Distance restante = Distance de déclenchement + Distance parcourue par le véhicule obstacle – Distance parcourue par la moto.

$$Dr = TD + \left(\frac{S_{int-o}^2 - S_o^2}{2.\gamma_o}\right) - \left(\frac{S_{int-m}^2 - S_i^2}{2.\gamma_{acc}}\right) \qquad Eq\ \text{V.9}$$

- Dans le cas où le véhicule obstacle est à contre sens à la moto (équation V.10).

Distance restante = Distance de déclenchement - Distance parcourue par le véhicule obstacle – Distance parcourue par la moto.

$$Dr = TD - \left(\frac{S_{int-o}^2 - S_o^2}{2.\gamma_o}\right) - \left(\frac{S_{int-m}^2 - S_i^2}{2.\gamma_{acc}}\right) \qquad Eq\ V.10$$

La seconde séquence concerne le freinage manuel du motocycliste, qui n'est inclus que lorsque sa décélération dépasse celle définie pour l'ACC. Les paramètres obtenus aux étapes (b.1, b.2, b.3) servent à calculer la vitesse finale de la moto, en réutilisant les étapes (a.1, a.2, a.3, a.4).

Une fois la vitesse finale de la moto calculée, nous avons vérifié si cette vitesse était égale à zéro, ce qui aurait signifié que le choc avait été évité. Dans le cas contraire, la vitesse au moment du choc a été enregistrée et analysée.

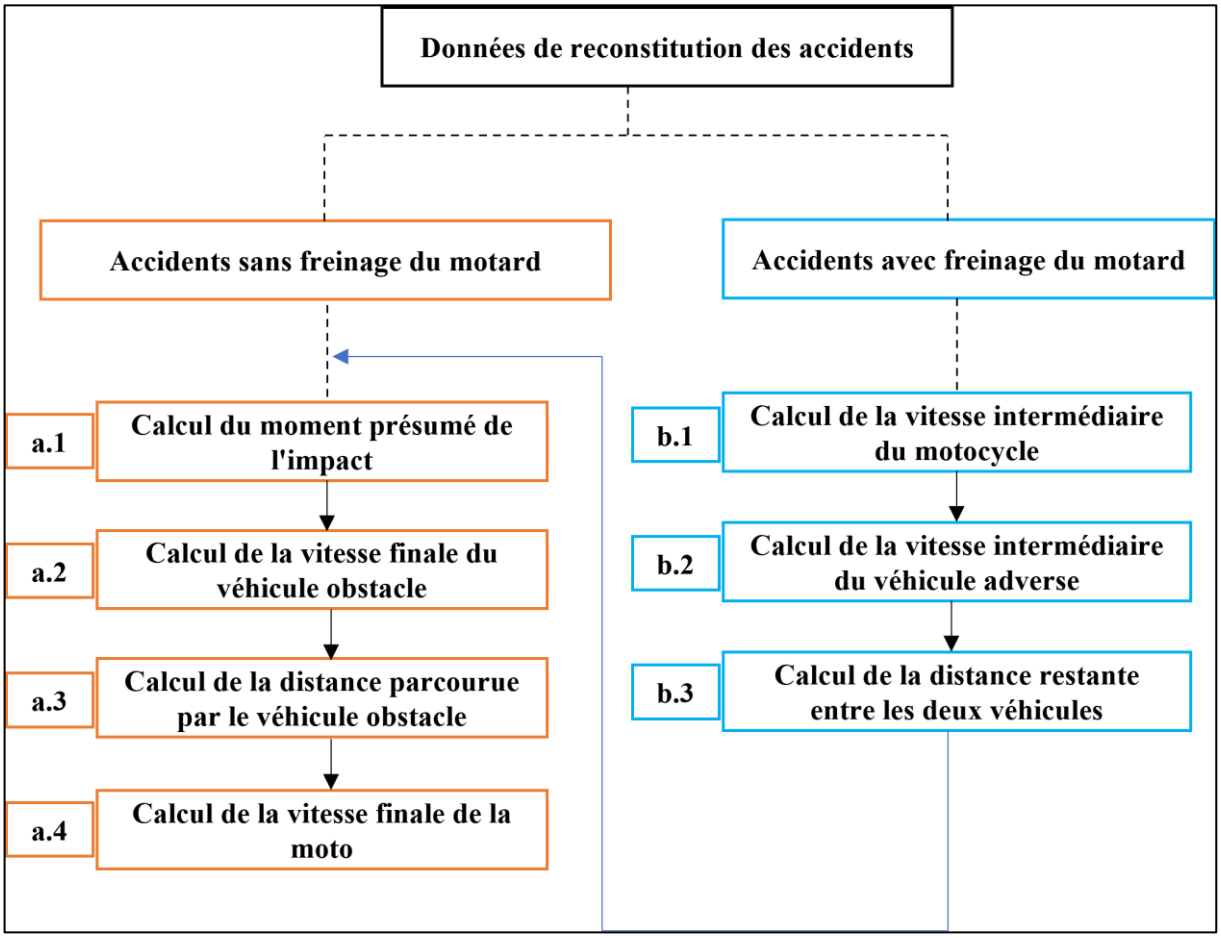


Figure V. 3. Étapes de calcul

V.2.5 Méthodologie de calcul du bénéfice de l'ACC sur les accidentés blessés graves à l'échelle nationale

Afin de répondre à cet objectif, une méthodologie spécifique de calcul a été élaborée. Elle repose sur deux éléments principaux : les courbes de risque et les distributions d'accidents en fonction de la vitesse d'impact (ces deux éléments ont été explicitement détaillés dans le chapitre 3). Ces concepts permettent de relier les résultats de la première analyse des accidents avec et sans ACC à l'évaluation des blessures graves.

Comme expliqué dans le chapitre III, pour appliquer un lissage à l'aide d'une fonction gaussienne, il est nécessaire que les données suivent une loi normale. À cette fin, un test de normalité a été réalisé sur un échantillon de 49 cas d'accidents spécifiques à l'ACC. Le test de Shapiro-Wilk a donné une p-value de 7.774e-0.5, ce qui ne nous permet pas rejeter l'hypothèse nulle indiquant que les données ne suivent pas une distribution normale. La figure V.4 illustre les vitesses d'impact des 49 cas d'accidents sous forme d'une boîte à moustaches, permettant de visualiser la médiane, les quartiles et les valeurs aberrantes. Deux cas d'accidents se distinguent nettement des autres, avec des vitesses d'impact de 130 km/h et 154 km/h respectivement.

Le premier accident, survenu à 130 km/h, a eu lieu sur une route nationale comprenant une ligne droite de 2 km, impliquant un conducteur utilisant une moto sportive. Le second accident, à 154 km/h, concernait un conducteur en état d'ébriété au guidon d'une moto de type « roadster ». Ces deux cas constituent des valeurs aberrantes qui empêchent d'obtenir une distribution normale. Afin de pouvoir appliquer la méthodologie de lissage et d'obtenir des premières estimations qui n'existent pas dans la littérature, nous avons choisi d'exclure ces deux cas de la base de données. Ainsi, l'analyse du bénéfice de l'ACC sur les blessés graves s'est concentrée sur les 47 cas restants.

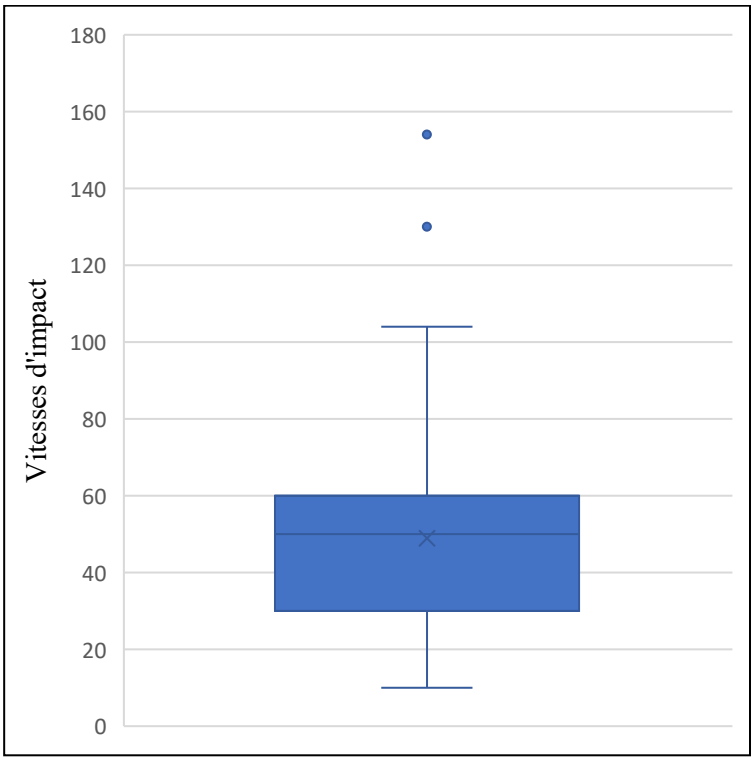


Figure V. 4. Répartition statistique des vitesses d'impact : 49 cas

Une fois les éléments nécessaires à cette méthodologie définis, nous allons maintenant décrire les différentes étapes. Il est important de noter que cette méthodologie a été appliquée aux deux programmes de fonctionnement de l'ACC : Confortable et Dynamique.

Dans un premier temps, nous avons pris la courbe de risque déjà tracée, et ajouté les courbes de distribution des accidents en fonction de la vitesse d'impact dans le même graphique (Figure V.5).

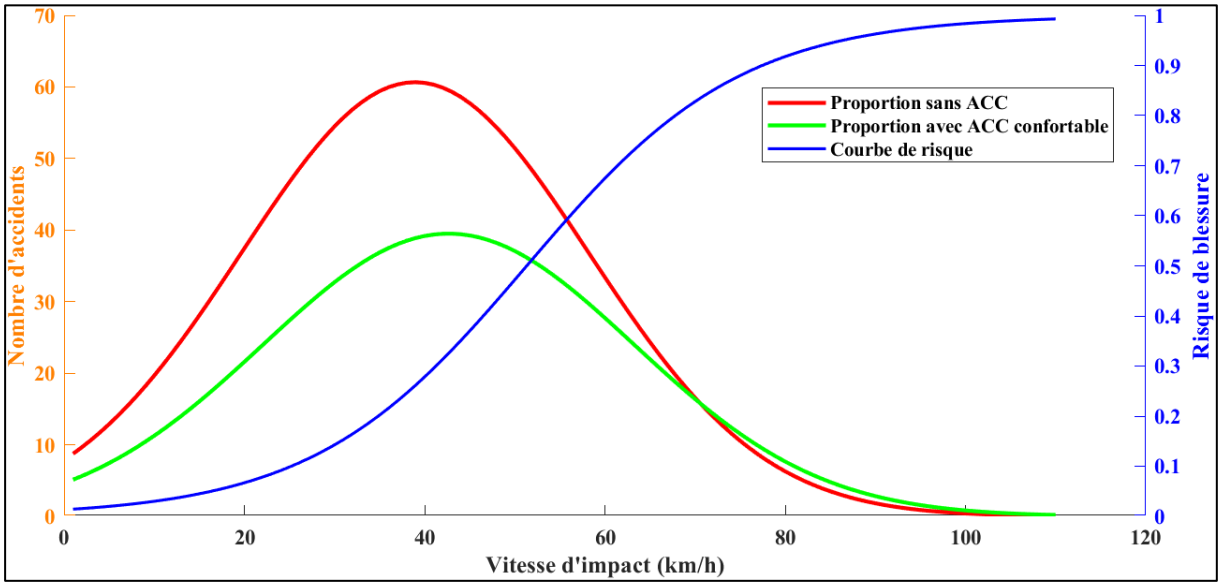


Figure V. 5. Proportion des accidents et risque de blessure en fonction de la vitesse d'impact

Ensuite, le principe utilisé ici repose sur la multiplication des différentes courbes. En multipliant la courbe de risque par la courbe de répartition des accidents sans ACC, nous obtenons une nouvelle courbe qui représente la distribution des blessés graves en fonction de la vitesse d'impact (Figure V.6).

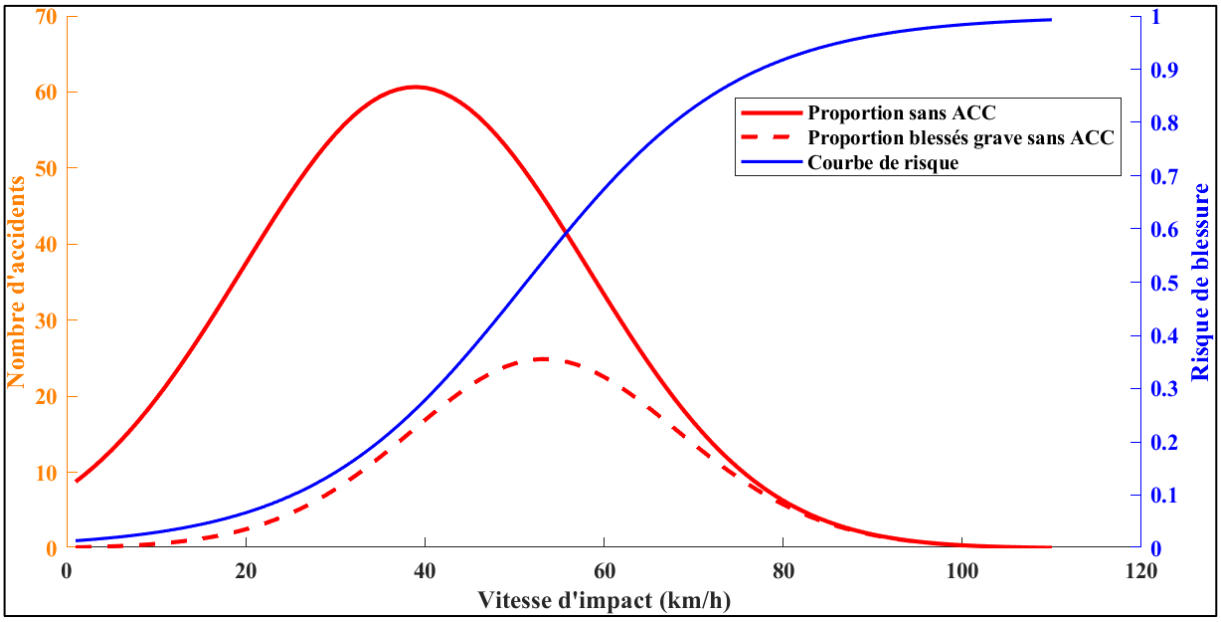


Figure V. 6. Multiplication de la courbe de risque avec les proportions des accidents sans ACC

Par ailleurs, nous appliquons la même méthode en utilisant cette fois-ci la répartition des accidents avec un ACC confortable (Figure V.7).

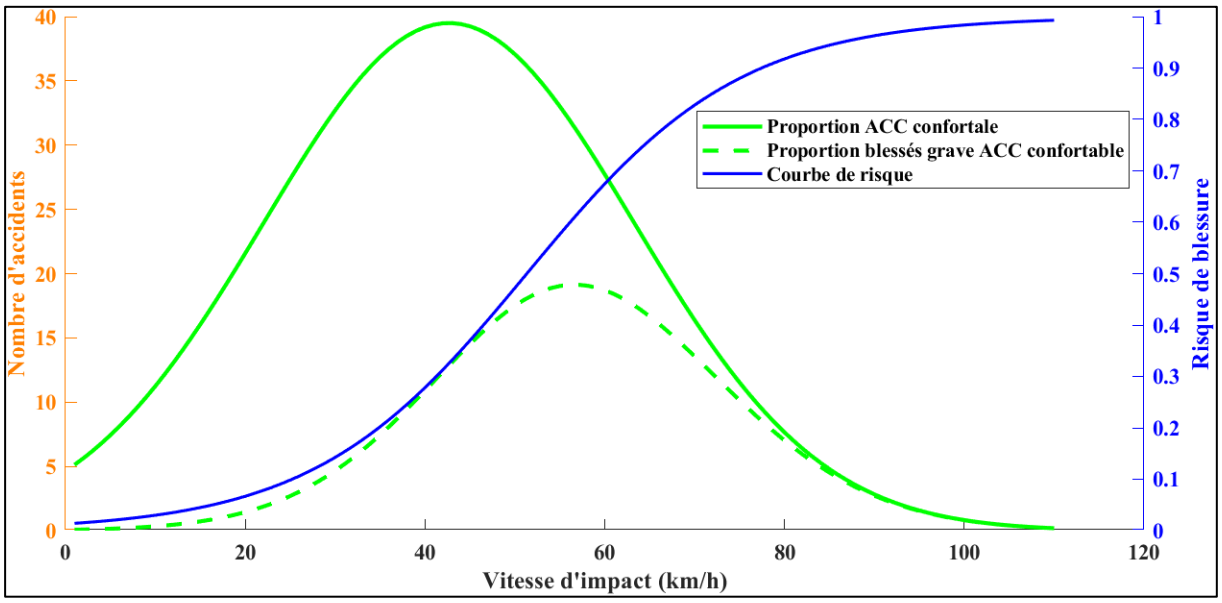


Figure V. 7. Calcul des proportions des accidents avec ACC confortable

La Figure V.8 présente l'ensemble des courbes ainsi obtenues avec et sans ACC Confortable.

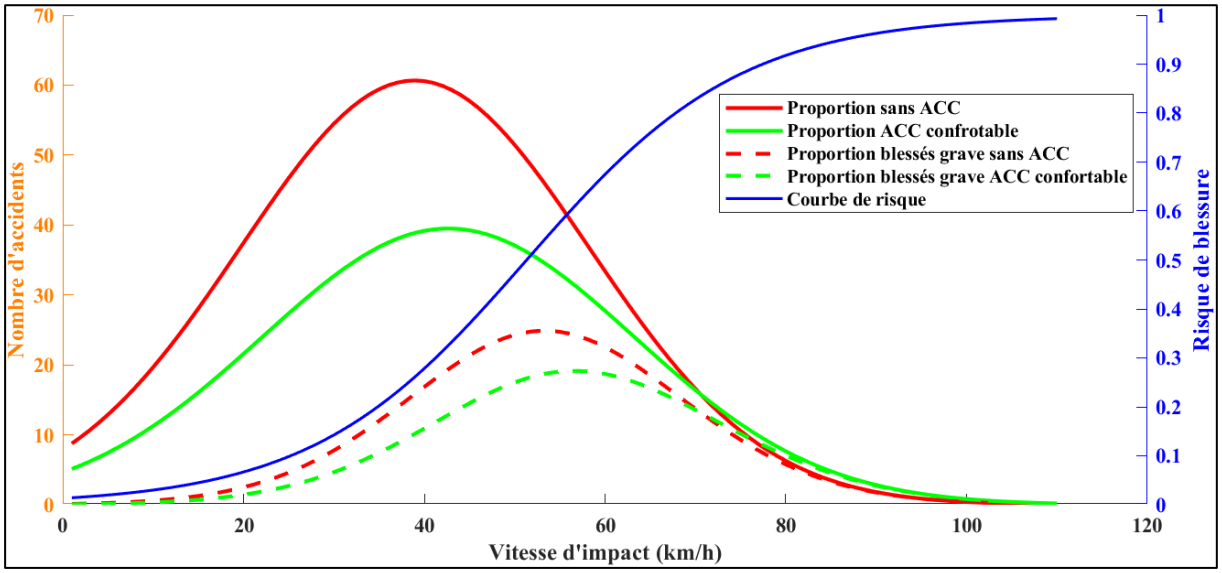


Figure V. 8. Répartitions accidents sans ACC et avec ACC Confortable, courbe de risque, et répartition des blessés graves avec et sans ACC Confortable

Enfin, en isolant les deux courbes représentant la répartition des blessés graves avec et sans ACC Confortable en fonction de la vitesse d'impact (Figure V.9), nous pouvons évaluer le bénéfice de l'ACC Confortable concernant les blessés graves.

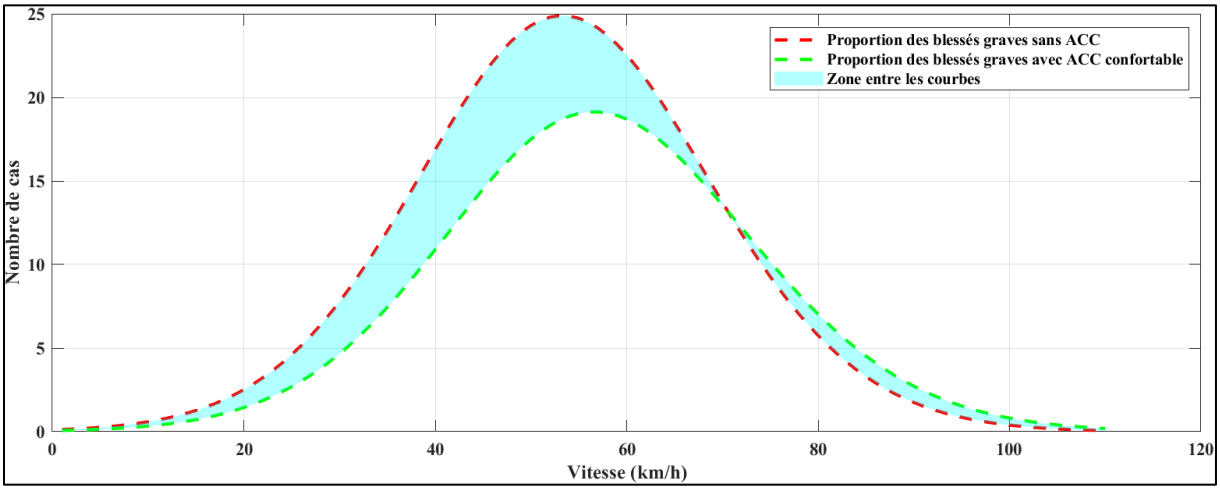


Figure V. 9. Proportions de blessés graves avec et sans ACC.

L'analyse du bénéfice de l'ACC sur les blessés graves consiste à calculer la différence d'aire entre la courbe de répartition des blessés graves sans ACC et celle des blessés graves avec ACC. Le résultat obtenu ici représente le bénéfice que l'ACC apporte en matière de blessures graves, mais uniquement pour les accidents couverts par cette technologie. Un second calcul est effectué en multipliant ce résultat avec l'effet potentiel qualitatif de l'ACC présenté dans le chapitre IV, qui est de 17,3% à l'échelle national. Ce deuxième résultat permet d'obtenir une première estimation du bénéfice de l'ACC sur les blessures graves à l'échelle nationale, dans tous types d'accidents confondus. La même méthodologie a été appliquée pour l'ACC dynamique. Les résultats de cette analyse du bénéfice de l'ACC (confortable et dynamique) ont été donnés dans la section suivante.

V.3 Résultats de l'étude

Cette section présente une synthèse détaillée des résultats obtenus dans le cadre de cette étude visant à évaluer le bénéfice de l'ACC sur la réduction de l'accidentalité des 2RM. Dans un premier temps, les résultats d'une étude paramétrique sont exposés, mettant en lumière l'impact des distances de déclenchement sur les performances du système, selon les différents modes de fonctionnement. Ensuite, une analyse approfondie a été réalisée pour deux distances de déclenchement jugées optimales, offrant une vision plus précise des gains en termes de réduction de vitesse d'impact. Enfin, une troisième partie est consacrée à l'évaluation du bénéfice de l'ACC à l'échelle nationale, en se concentrant sur l'impact sur la réduction des accidents graves impliquant des 2RM.

V.3.1 Étude paramétrique

L'étude paramétrique a été menée afin d'évaluer l'influence des distances de déclenchement d'un système ACC sur la réduction des vitesses d'impact dans des accidents impliquant des 2RM. Deux modes de fonctionnement de l'ACC ont été analysés : le mode confortable et le mode dynamique. Les distances de déclenchement sélectionnées variaient de 10 m à 50 m, par intervalles réguliers de 10 m. Les résultats obtenus sont présentés sous forme

de médianes de réductions de vitesse d'impact à chaque distance étudiée sur l'ensemble des 49 cas d'accidents analysés (Tableau V.1).

Dans le mode confortable, les réductions de vitesse augmentent progressivement avec la distance de déclenchement. À une distance de 10 m, la réduction de vitesse d'impact est de 3,9 km/h. Cette réduction de vitesse augmente pour atteindre 9,8 km/h à 20 m et 17,2 km/h à 30 m. À 40 m, la réduction atteint 20 km/h et se stabilise légèrement autour de 21 km/h à 50 m. Ces résultats mettent en évidence une relation linéaire, jusqu'à 40 m, entre l'augmentation de la distance de déclenchement et la réduction de la vitesse d'impact puis les bénéfices semblent plafonner.

Le mode dynamique, conçu pour des interventions plus intenses de l'ACC, présente des réductions de vitesse supérieures à celles observées en mode confortable pour chaque distance. À 10 m, la réduction est de 6,5 km/h, soit une amélioration nette par rapport au mode confortable pour la même distance. Cette tendance se poursuit avec des réductions de 15,5 km/h à 20 m, 21,9 km/h à 30 m et 25 km/h à 40 m. À 50 m, la réduction de vitesse atteint 25,5 km/h, marquant une stabilisation similaire à celle observée dans le mode confortable.

Tableau V. 1. Médianes des réductions de la vitesse d'impact en fonction du mode et de la distance de déclenchement (49 accidents)

Distances de déclenchements (m)		**10**	**20**	**30**	**40**	**50**
Médianes des réductions de Vitesse d'impact (km/h)	Mode confortable	3,9	9,8	17,2	20	21.1
	Mode dynamique	6,5	15,5	21,9	25	25,5
Nombre de cas où la réduction de la vitesse d'impact = 0	Mode confortable	20	12	8	8	6
	Mode dynamique	19	12	8	8	6

Le tableau V.2 présente les médianes des réductions de vitesse d'impact en excluant les cas où la réduction est nulle. On observe alors que les nouvelles médianes sont plus élevées que celles du tableau V.1, ce qui met en évidence l'effet de chaque distance de déclenchement sur la réduction de vitesse. Il est important de noter que les accidents pour lesquels l'ACC n'a eu aucun effet sur la vitesse d'impact peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs :

- Freinage du motocycliste : Dans certains cas, le motocycliste applique un freinage générant une décélération plus importante que celle définie par l'ACC, rendant l'intervention du système inutile.
- Problèmes de détection du véhicule adverse : Les distances de déclenchement définies correspondent aux valeurs paramétrées a priori dans le 2RM. Cependant, l'ACC ne peut s'activer que lorsque le véhicule adverse est effectivement détecté. Ainsi, même si une distance de déclenchement de 50 m est définie, l'ACC ne s'activera qu'à la distance réelle où le véhicule adverse devient détectable, si celle-ci est inférieure à 50 m.

En résumé, les résultats montrent que l'efficacité du système ACC en termes de réduction des vitesses d'impact est fortement influencée par la distance de déclenchement, avec des performances toujours supérieures dans le mode dynamique. Ces observations soulignent également l'importance des distances de 30 à 40 m dans l'optimisation des bénéfices du système, avant que les gains ne se stabilisent au-delà. Les résultats qui vont suivre se concentreront sur les distances de 30 m et 40 m.

Tableau V. 2. Médianes des réductions de vitesse d'impact pour les cas où l'ACC a eu un effet

Distances de déclenchements (m)		**10**	**20**	**30**	**40**	**50**
Médianes des réductions de Vitesse d'impact (km/h)	Mode confortable	7,4	14,4	20	21,2	25
	Mode dynamique	12,5	21	25	29,3	30
Nombre de cas où la réduction de la vitesse d'impact ≠ 0	Mode confortable	29	37	41	41	43
	Mode dynamique	19	37	41	41	43

V.3.2 Bénéfices de l'ACC à 30 m

V.3.2.1 Tous les accidents de l'échantillon

Les résultats obtenus à partir des courbes de fréquences cumulées des accidents en fonction des vitesses d'impact (Figure V.10) montrent que l'utilisation de l'ACC avec une distance de déclenchement de 30 m contribue à réduire à la fois le nombre d'accidents et les vitesses d'impact. Ces analyses reposent sur les données de 49 accidents simulés, étudiés avec ACC en mode confortable et en mode dynamique.

En mode confortable, l'ACC a permis d'éviter 39% des accidents (accidents à vitesse d'impact nulle), tandis que le mode dynamique a porté ce taux à 47%. Ces chiffres illustrent l'efficacité du mode dynamique dans l'évitement total des collisions. En examinant les vitesses d'impact inférieures à 40 km/h, les résultats montrent que 66% des accidents ont été soit évités, soit atténués avec le mode confortable, contre 75% avec le mode dynamique. À titre de comparaison, sans l'activation de l'ACC, seulement 45% des accidents sont atténués, confirmant ainsi l'avantage d'un contrôle adaptatif pour réduire les risques à basse vitesse.

Pour des vitesses d'impact allant jusqu'à 60 km/h, les deux modes de l'ACC offrent des résultats similaires. Environ 88% des accidents étudiés ont été évités ou atténués, soit une réduction notable. Par ailleurs, la proportion d'accidents présentant une vitesse d'impact supérieure à 60 km/h a été réduite à 13% et 12% respectivement pour les modes confortable et dynamique, contre 22% sans ACC.

Au-delà de 80 km/h, l'effet de l'ACC sur les vitesses d'impact devient marginal. Les analyses indiquent qu'à ce seuil, l'ACC à 30 m n'apporte qu'une amélioration limitée, suggérant que son efficacité est principalement concentrée sur des scénarios d'impact à moyenne ou basse vitesse.

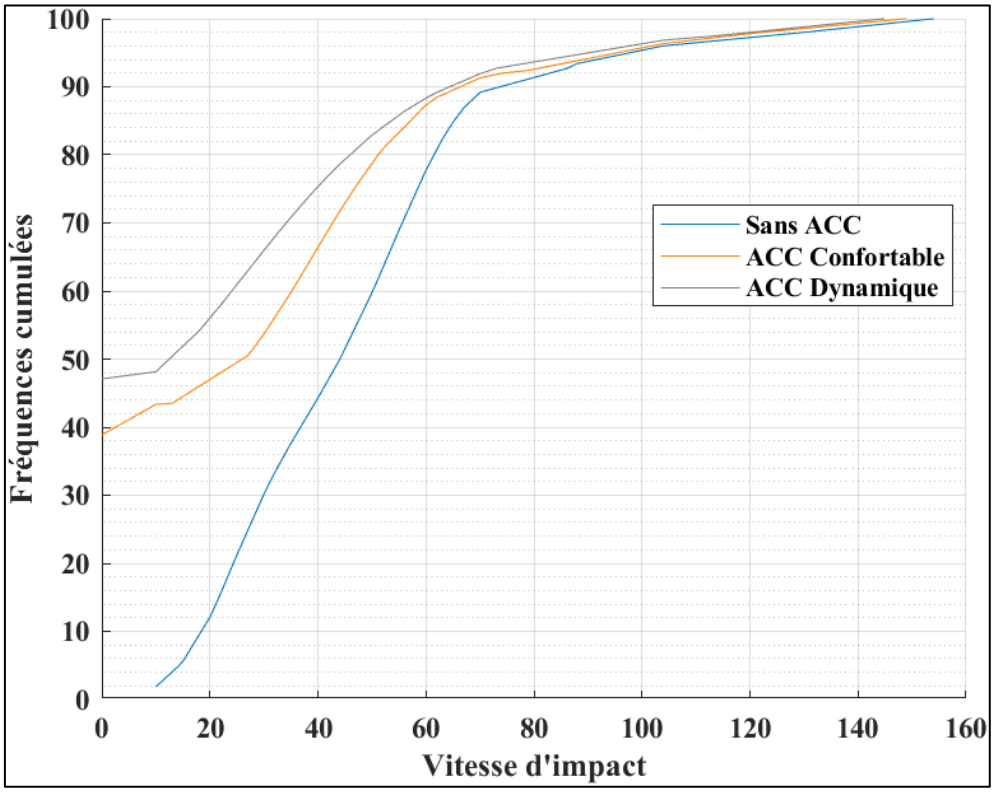


Figure V. 10. Estimation des bénéfices de l'ACC à 30 m pour tous les cas d'accident

V.3.2.2 Les accidents non évitables avec l'ACC

L'analyse des accidents non évités par l'ACC révèle des tendances intéressantes quant à l'impact de ce système sur les vitesses de collision, en déplaçant les accidents vers des plages de vitesse plus faibles. Ces analyses concernent 30 cas d'accidents en mode confortable et 26 cas d'accidents en mode dynamique. Les répartitions des vitesses d'impact pour ces deux modes, illustrées dans les Figure V.11 et 12, permettent de voir l'effet de l'ACC sur la diminution des accidents à des vitesses élevées.

En mode confortable, environ 40% des accidents non évités se situent à des vitesses d'impact de 40 km/h ou moins, contre seulement 23% sans l'activation de l'ACC. Cette proportion souligne une nette diminution des accidents à des vitesses plus élevées grâce à l'ACC. De même, pour les vitesses d'impact supérieures à 60 km/h, 23% des accidents simulés avec l'ACC confortable se trouvent dans cette catégorie, tandis que cette proportion atteint 33% sans ACC. Enfin, au-delà de 80 km/h, l'effet de l'ACC devient limité, mais une légère amélioration reste perceptible, avec 10% des accidents enregistrés contre 17% sans ACC.

Pour le mode dynamique, les résultats suivent une tendance similaire. Environ 50% des accidents non évités se produisent à une vitesse d'impact de 40 km/h ou moins, une amélioration comparée aux 19% observés sans ACC. Pour des vitesses d'impact supérieures à 60 km/h, 23% des accidents non évités surviennent avec l'ACC dynamique, contre 39% sans l'activation de

ce mode. Enfin, pour des vitesses supérieures à 80 km/h, la proportion passe de 19% sans ACC à 12% avec l'ACC dynamique, représentant un gain notable, bien qu'à ce niveau de vitesse, l'effet du système soit globalement plus faible.

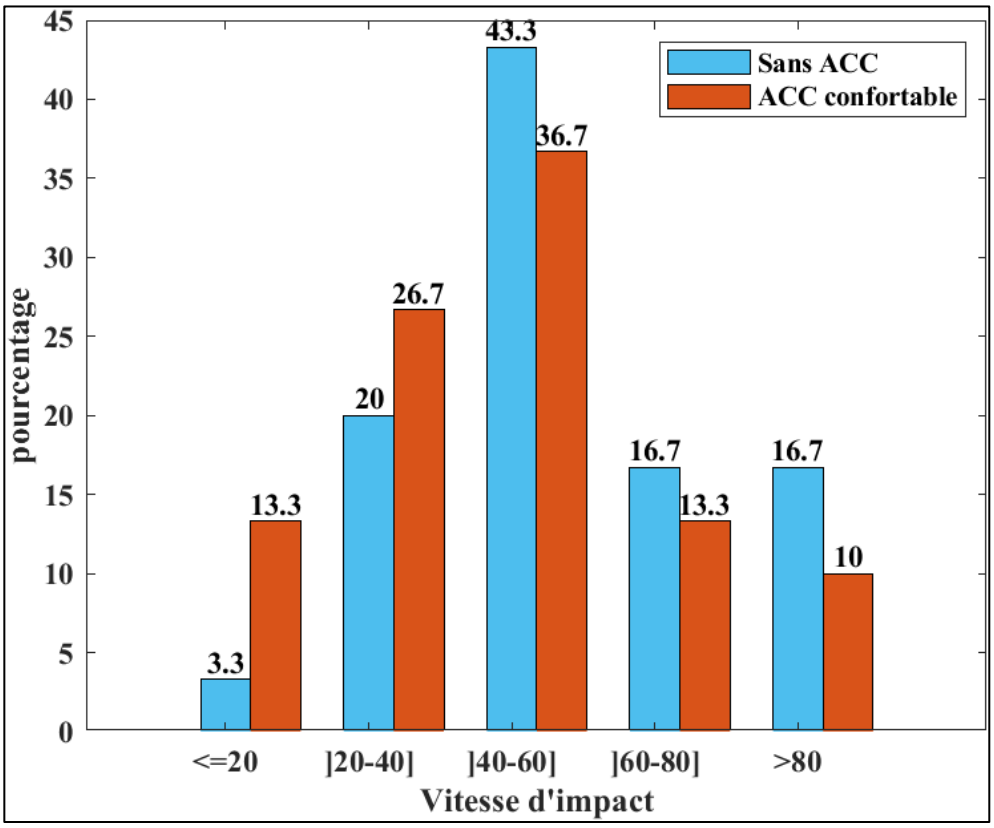


Figure V. 12. Estimation des bénéfices de l'ACC en mode confortable à 30 m pour les cas d'accidents inévitables.

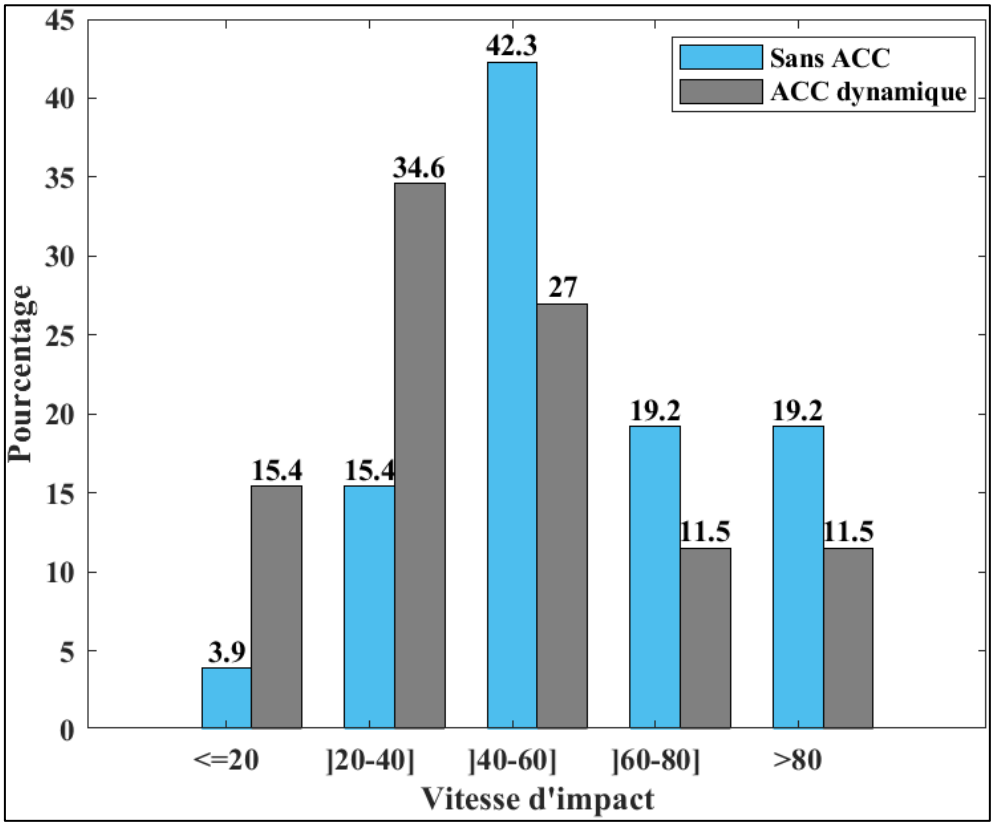


Figure V. 11. Estimation des bénéfices de l'ACC en mode dynamique à 30 m pour les cas d'accidents inévitables.

V.3.3 Bénéfices de l'ACC à 40 m

V.3.3.1 Tous les accidents de l'échantillon

L'analyse des 49 cas d'accidents étudiés pour une distance de déclenchement de 40 mètres met en évidence les effets positifs de l'ACC sur la réduction des accidents et des vitesses d'impact. Les résultats sont présentés selon les deux modes disponibles : confortable et dynamique, et comparés à une situation sans activation de l'ACC (Figure V.13).

Avec le mode confortable, l'ACC a permis d'éviter environ 43 % des accidents, tandis que le mode dynamique a montré une efficacité légèrement supérieure, avec 53 % des accidents évités. Ces proportions traduisent une réduction importante des accidents dans les deux configurations, par rapport au scénario sans ACC.

En examinant les vitesses d'impact restantes, on observe qu'environ 71% des accidents avec le mode confortable et 77% avec le mode dynamique sont soit évités, soit ils se situent à une vitesse d'impact inférieure ou égale à 40 km/h. Ces chiffres représentent une amélioration notable par rapport à la situation sans ACC, où seulement 47% des accidents se trouvaient dans cette plage de vitesse. L'ACC, particulièrement en mode dynamique, semble donc efficace pour baisser la vitesse des accidents.

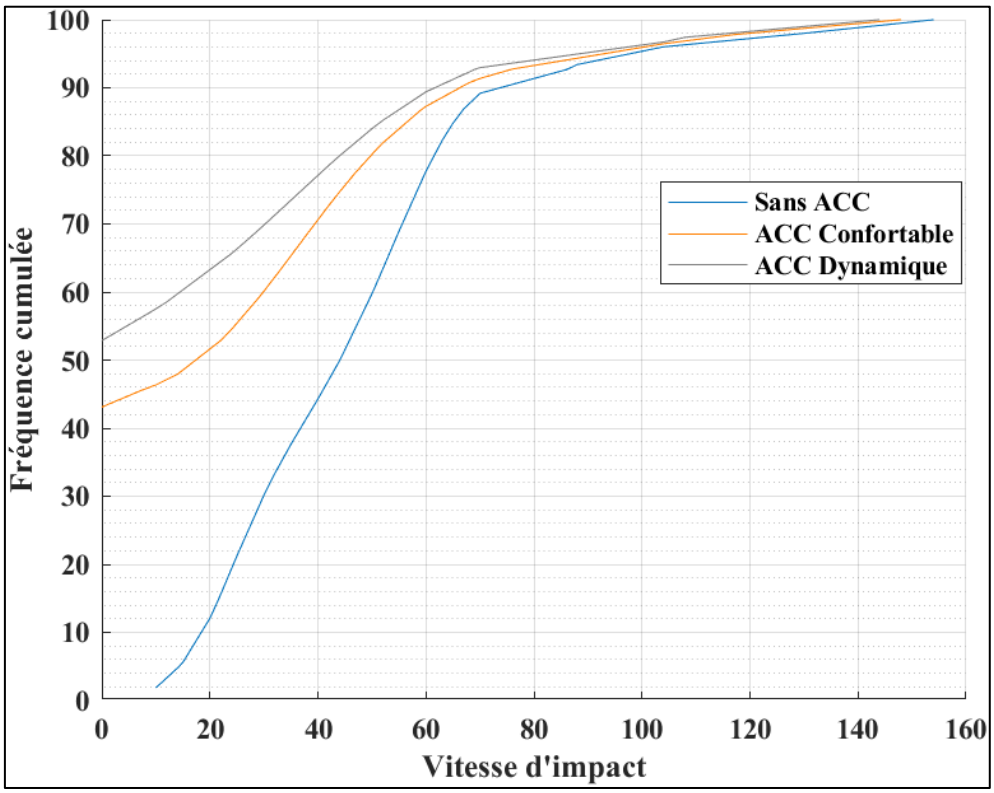


Figure V. 13. Estimation des bénéfices de l'ACC à 40 m pour tous les cas d'accident

Pour des vitesses d'impact supérieures à 60 km/h, l'effet de l'ACC reste marqué. Environ 10% des accidents en mode confortable et 8% en mode dynamique se produisent à ces vitesses, contre 22% des cas sans ACC. Cette réduction témoigne de la capacité de l'ACC à réduire le nombre de cas d'accidents avec des vitesses d'impact élevées, indépendamment du mode sélectionné.

Enfin, au-delà de 80 km/h, l'effet de l'ACC, quelle que soit la configuration, devient marginal. Les proportions d'accidents à ces vitesses restent proches, montrant que l'efficacité du système est principalement concentrée sur les plages de vitesse inférieures à 80 km/h.

V.3.3.2 Les accidents non évitables avec l'ACC

L'étude des accidents non évités pour une distance de déclenchement de 40 m révèle des bénéfices de l'activation de l'ACC, tant en mode confortable qu'en mode dynamique, en déplaçant les accidents à des vitesses d'impact plus faibles. Les résultats couvrent 28 cas pour le mode confortable et 23 cas pour le mode dynamique, comparés à un scénario sans ACC (Figure V.14 et 15).

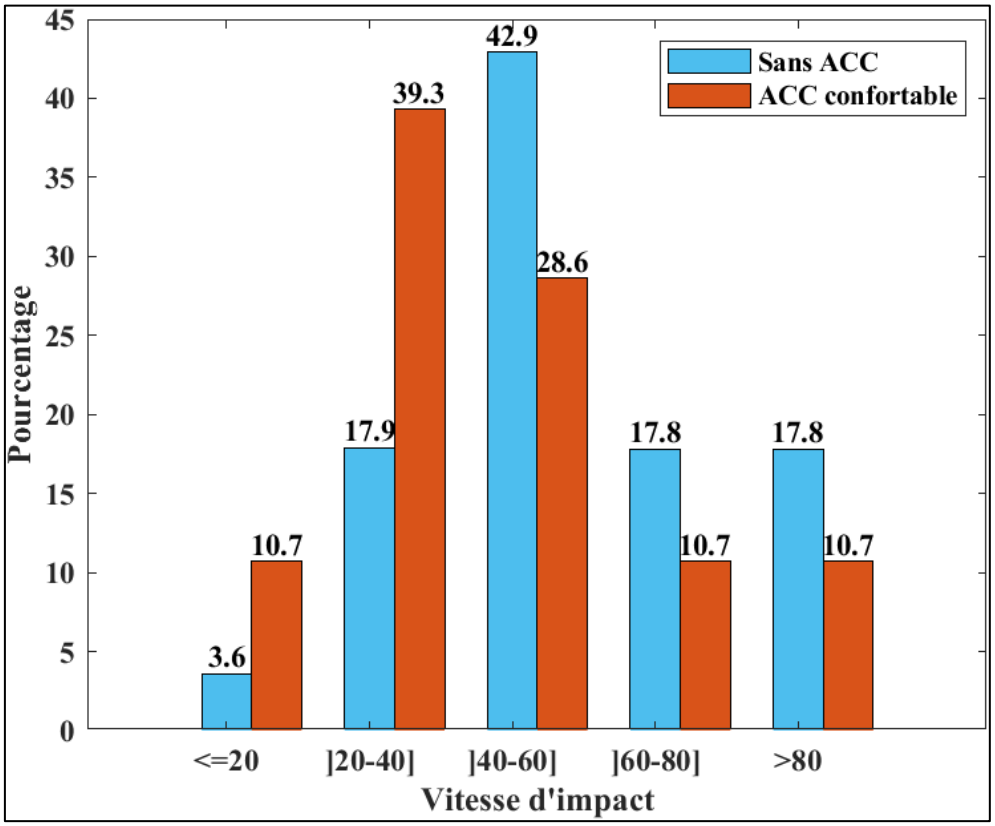


Figure V. 14. Estimation des bénéfices de l'ACC en mode confortable à 40 m pour les cas d'accidents inévitables.

En mode confortable, environ 50% des accidents non évités se produisent à une vitesse d'impact inférieure ou égale à 40 km/h, alors que sans ACC, cette proportion n'est que de 22%. Le mode dynamique montre des performances similaires, avec 48 % des accidents non évités dans cette même plage de vitesse.

Pour des vitesses supérieures à 60 km/h, les bénéfices de l'ACC restent présents. En mode confortable, 21% des accidents non évités dépassent cette limite, contre 36% dans le scénario sans ACC, représentant une réduction de 15%. En mode dynamique, la proportion atteint 22%, soit une diminution de 13% par rapport aux 35% sans ACC. Ces résultats confirment l'efficacité de l'ACC dans les deux modes pour limiter la gravité des accidents à des vitesses intermédiaires.

Au-delà de 80 km/h, l'effet de l'ACC devient marginal mais reste mesurable. En mode confortable, la proportion d'accidents non évités est de 11%, contre 18% sans ACC, tandis

qu'en mode dynamique, elle s'élève à 13%, contre 22% sans ACC. Ces réductions plus modestes indiquent que l'ACC exerce son principal effet dans les plages de vitesse inférieures à 80 km/h.

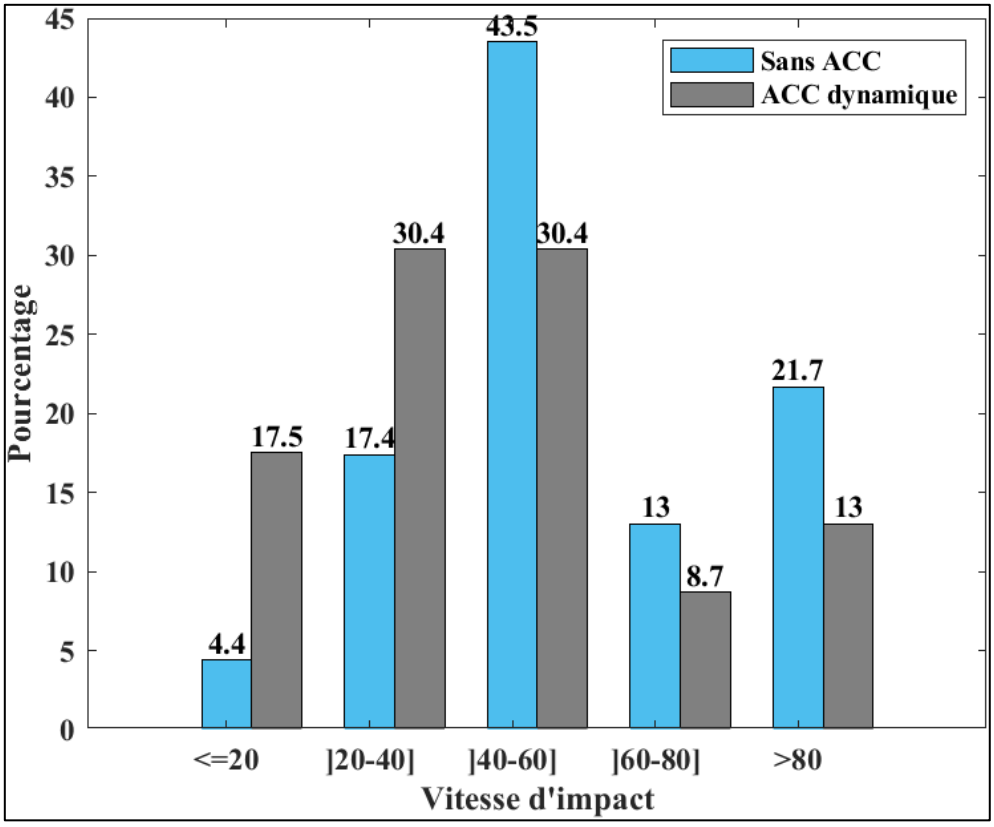


Figure V. 15. Estimation des bénéfices de l'ACC en mode dynamique à 40 m pour les cas d'accidents inévitables.

V.3.4 Les bénéfices de l'ACC sur les blessés graves

Cette section présente les résultats obtenus concernant les bénéfices de l'ACC sur les blessés graves dans les accidents de 2RM. Les résultats incluent à la fois les bénéfices de l'ACC pour les accidents relevant directement de son champ d'application et ceux à une échelle plus générale, englobant tous les types d'accidents de 2RM.

Les résultats sont organisés de la manière suivante :

a) Répartition des accidents en fonction des vitesses d'impact :

Différentes répartitions des accidents ont été analysées en fonction des vitesses d'impact, en distinguant trois catégories :

- Répartition des accidents sans ACC
- Répartition des accidents avec un ACC en mode confortable
- Répartition des accidents avec un ACC en mode dynamique

Ces répartitions ont été calculées pour une base de données comprenant 47 cas d'accidents analysés. Elles ont ensuite été extrapolées à l'échelle nationale en suivant la méthodologie décrite dans le chapitre III.

b) Répartition des blessés graves parmi les 2RM :

Les répartitions de blessés graves ont été calculées selon le processus décrit dans la section VII.3.5.3. Ces calculs permettent de quantifier l'impact de l'ACC sur la réduction des blessures graves, en tenant compte des vitesses d'impact et des scénarios d'intervention de l'ACC.

c) Bénéfices globaux de l'ACC sur les blessés graves :

Une synthèse des résultats globaux est donnée, mettant en évidence les bénéfices de l'ACC en termes de réduction des blessés graves. Cette analyse inclut les deux modes de fonctionnement de l'ACC (confortable et dynamique) et évalue leur efficacité à la fois dans le champ d'application de l'ACC et à l'échelle nationale.

V.3.4.1 Répartition des accidents en fonction des vitesses d'impact

❖ Pour une distance de déclenchement de 30 m

La répartition des accidents en fonction des vitesses d'impact a été analysée pour les 47 cas étudiés et extrapolée à l'échelle nationale (Figure V.16). Ces résultats sont présentés sous forme d'une seule figure regroupant les trois scénarios étudiés : sans ACC, avec l'ACC en mode confortable, et avec l'ACC en mode dynamique. Les intervalles de vitesses d'impact et les fréquences associées sont détaillés ci-dessous.

À l'échelle nationale :

- Sans ACC : les accidents se répartissent principalement dans les intervalles [20-40 km/h] (63 cas) et [40-60 km/h] (59 cas), suivis par les intervalles [0-20 km/h] (22 cas) et [60-80 km/h] (18 cas). Les intervalles supérieurs [80-100 km/h] et >100 km/h comptent respectivement 7 et 4 cas.
- Avec l'ACC en mode confortable : une diminution est observée dans les intervalles [20-40 km/h] (29 cas) et [40-60 km/h] (40 cas), cette diminution est liée aux accidents évités grâce l'ACC en mode confortable. Tandis que les intervalles [0-20 km/h] et [60-80 km/h] comptent chacun 15 cas. Les intervalles supérieurs [80-100 km/h] ne contiennent aucun cas, sauf l'intervalle >100 km/h, avec 4 cas.
- Avec l'ACC en mode dynamique : En plus des accidents évités dans ce mode, une redistribution des accidents a été observée. Celle-ci est marquée par une concentration dans l'intervalle [20-40 km/h] (37 cas), une diminution dans [40-60 km/h] (22 cas) et une baisse dans [60-80 km/h] (10 cas). Les intervalles [0-20 km/h] et >100 km/h comptent respectivement 15 cas et 4 cas, tandis que l'intervalle [80-100 km/h] reste vide.

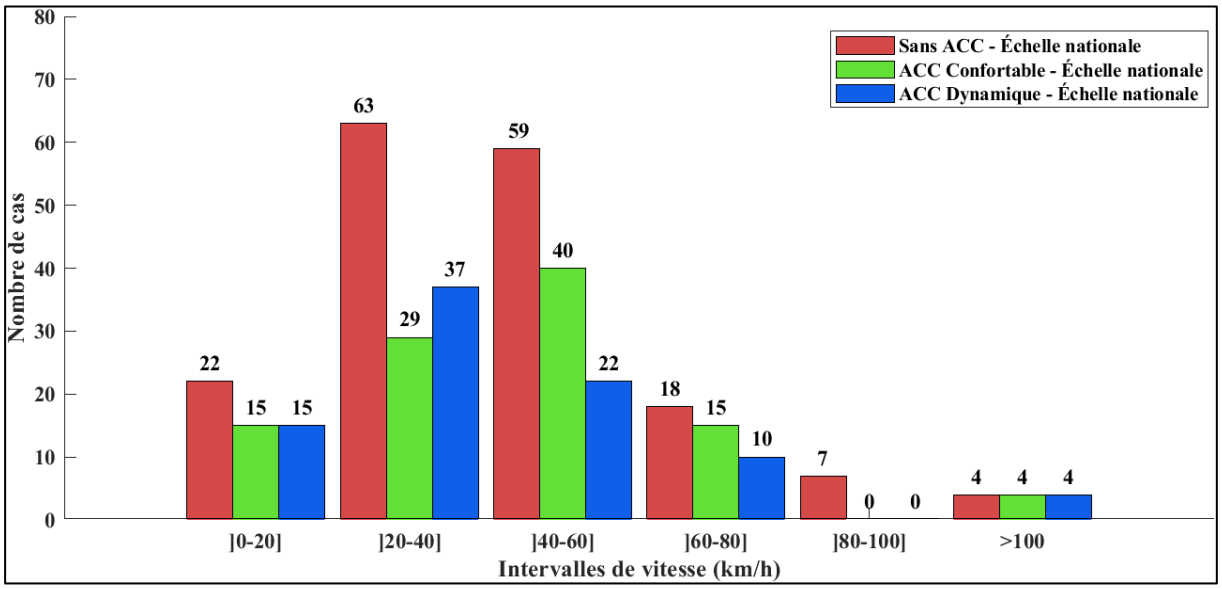


Figure V. 16. Répartition des accidents en fonction de la vitesse d'impact dans les différents modes : Sans ACC (173 cas) - ACC Confortable (103 cas) - ACC Dynamique (88 cas), distance de déclenchement 30 m.

Des tests de normalité de Shapiro-Wilk ont été réalisés pour évaluer si les distributions des vitesses d'impact dans les trois scénarios suivent une loi normale. Les p-values obtenues sont respectivement de 0,13 (sans ACC), (0,67 mode confortable) et (0,73 mode dynamique). Étant toutes supérieures au seuil de significativité de 0,05, ces résultats suggèrent que les distributions des vitesses d'impact peuvent être considérées comme normales dans les trois cas.

Pour chaque scénario, les histogrammes des vitesses d'impact ont été lissés à l'aide de fonctions gaussiennes ajustées (équation V.11, V.12 et V.13). Ces fonctions reflètent fidèlement les distributions observées et permettent de modéliser les tendances des vitesses d'impact dans chaque scénario. La figure V.17 illustre ces distributions et leurs ajustements respectifs, mettant en évidence l'effet de l'ACC sur la répartition des accidents en fonction des vitesses d'impact :

- Sans ACC : avec un $R^2 = 0,99$,

$$f(x) = 60,66 \times e^{\left(-0.5\left(\frac{(x-38,94)}{19,28}\right)^2\right)} \qquad Eq\ V.11$$

- ACC confortable : avec un $R^2 = 0,95$,

$$f(x) = 35,65 \times e^{\left(-0.5\left(\frac{(x-42,66)}{20,61}\right)^2\right)} \qquad Eq\ V.12$$

- ACC dynamique : avec un $R^2 = 0,95$,

$$f(x) = 35,65 \times e^{\left(-0.5\left(\frac{(x-33,78)}{19,12}\right)^2\right)} \qquad Eq\ V.13$$

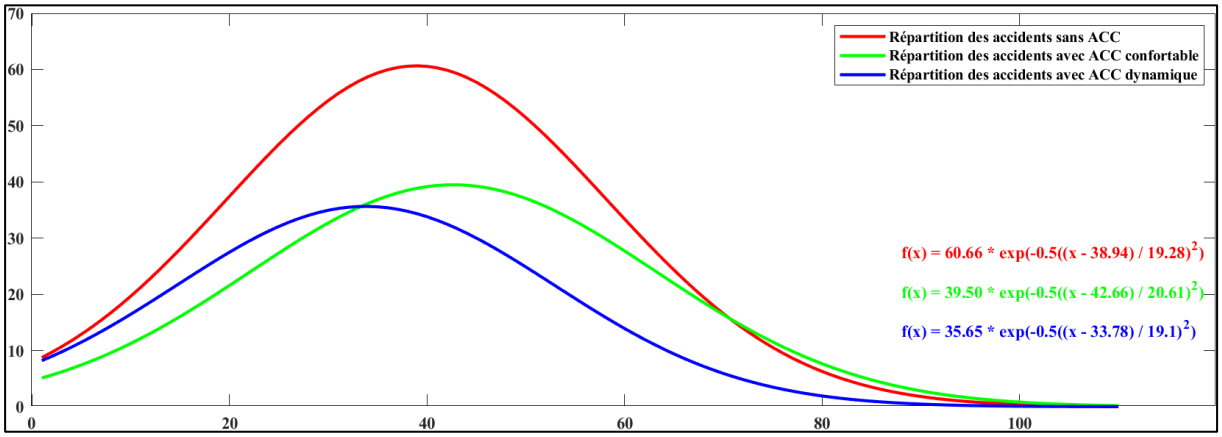


Figure V. 17. Les trois courbes de distribution des accidents en fonction des vitesses d'impact avec et sans ACC, distance de déclenchement 30 m.

❖ Pour une distance de déclenchement de 40 m

L'analyse des accidents en fonction des vitesses d'impact a également été réalisée pour une distance de déclenchement de 40 m, englobant les trois scénarios : sans ACC, avec l'ACC en mode confortable, et avec l'ACC en mode dynamique. Les nouvelles données montrent des variations dans les distributions des vitesses d'impact, notamment avec les deux modes d'ACC à 40 m.

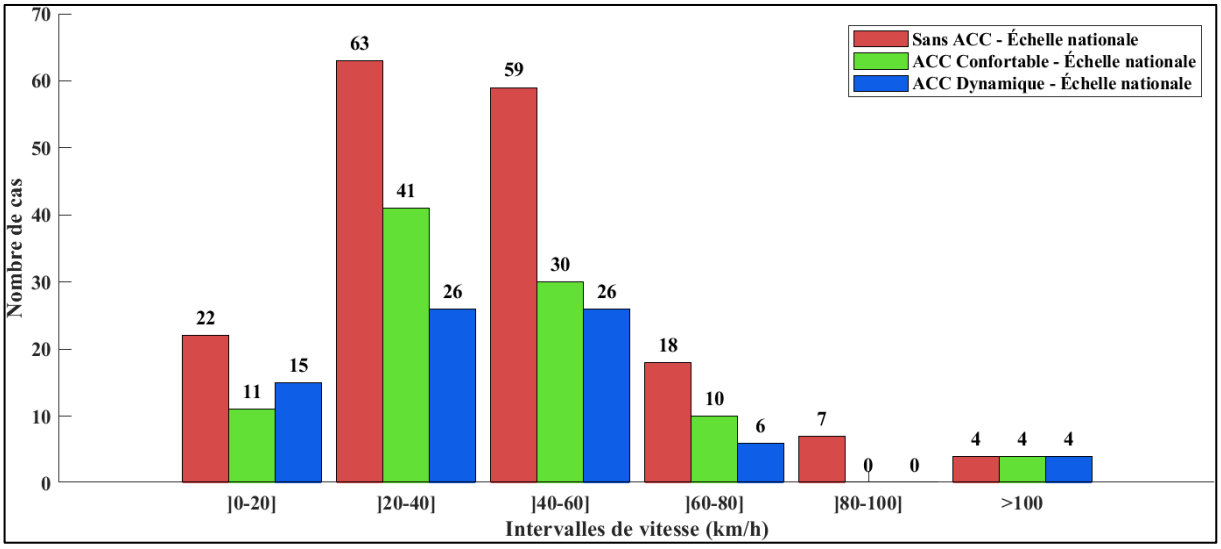


Figure V. 18. Répartition des accidents en fonction de la vitesse d'impact dans les différents modes : Sans ACC (173 cas) - ACC Confortable (96 cas) - ACC Dynamique (77 cas), distance de déclenchement à 40 m

À l'échelle nationale, les fréquences des accidents varient selon le mode d'activation de l'ACC. Avec l'ACC en mode confortable, la répartition change (Figure V.18). L'intervalle de vitesses]20−40km/h] contient le plus grand nombre de cas (41), tandis que les intervalles]40−60km/h] (30 cas) et]0−20km/h] (11 cas) présentent des valeurs réduites par rapport au scénario sans ACC. Les accidents à des vitesses élevées]60−80km/h] disparaissent, à l'exception de quelques occurrences dans les intervalles]80−100km/h] (4 cas) et >100 km/h (4 cas).

Enfin, en mode dynamique, les accidents se répartissent de manière plus uniforme. Les intervalles]20−40km/h] et]40−60km/h] enregistrent chacun 26 cas, suivis de l'intervalle

]0−20km/h] avec 15 cas. Les accidents diminuent nettement dans l'intervalle]60−80km/h] (6 cas), tandis qu'aucun cas n'est relevé entre]80−100km/h] et seulement 4 cas au-delà de 100 km/h.

De la même façon que les distributions analysées à une distance de déclenchement de 30m, des tests de Shapiro-Wilk ont été effectués pour les accidents non évités soit en confortable à 40 m et en dynamique à 40 m. Les résultats obtenus montrent des p-values de (0,31 en mode confortable) et (0,25 en mode dynamique), ce qui nous indique que ces nouvelles répartitions peuvent suivre une distribution normale.

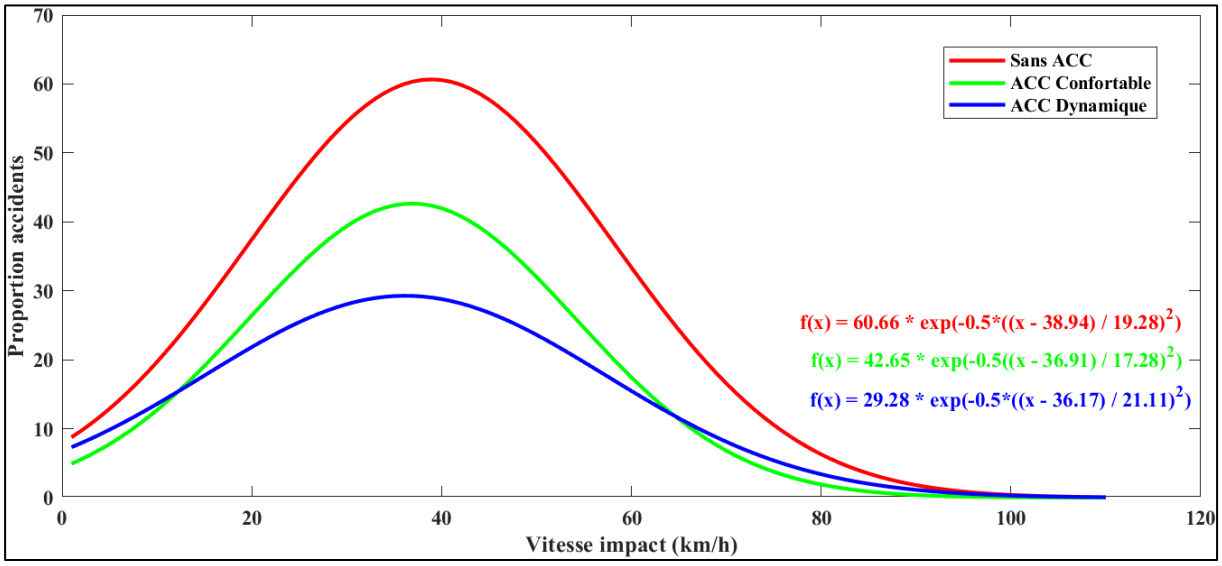


Figure V. 19. Les trois courbes de distribution des accidents en fonction des vitesses d'impact avec et sans ACC pour une distance de déclenchement de 40 m.

Les gaussiennes calculées pour ces nouvelles distributions reflètent fidèlement les distributions observées (équation V.14, V.15, V.16), comme le montrent la figure V.19 :

- Sans ACC : avec un $R^2 = 0{,}99$,

$$f(x) = 60{,}66 \times e^{\left(-0.5\left(\frac{(x-38{,}94)}{19{,}28}\right)^2\right)} \qquad Eq\ V.14$$

- ACC confortable : avec un $R^2 = 0.95$,

$$f(x) = 42{,}65 \times e^{\left(-0.5\left(\frac{(x-36{,}91)}{17{,}28}\right)^2\right)} \qquad Eq\ V.15$$

- ACC dynamique : avec un $R^2 = 0.95$,

$$f(x) = 29{,}28 \times e^{\left(-0.5\left(\frac{(x-36{,}17)}{21{,}11}\right)^2\right)} \qquad Eq\ V.16$$

V.3.4.2 Bénéfices de l'ACC sur les blessés graves

❖ Pour une distance de déclenchement de 30 m

Les résultats révèlent que, parmi les accidents concernés par l'ACC, 34% impliquent des blessés graves. Ce pourcentage a été calculé en établissant le rapport entre la proportion des accidents et celle des blessés graves en fonction de la vitesse d'impact dans les scénarios sans ACC.

De plus, l'analyse de la répartition des blessés graves dans les modes confortable et dynamique met en évidence une réduction importante des blessures grâce à l'utilisation de l'ACC. En mode confortable, une diminution de 20% des blessés graves a été observée (Figure V.20), tandis qu'en mode dynamique, cette réduction atteint 53% (Figure V.21). Ces résultats illustrent l'impact de l'ACC pour limiter la gravité des blessures dans les accidents de 2RM.

Ces pourcentages ont été obtenus en calculant la différence entre les aires sous les courbes de proportion des blessés graves. Pour le mode confortable, la réduction correspond à la différence entre l'aire représentant la proportion des blessés graves sans ACC (la courbe rouge en discontinue) et celle représentant la proportion des blessés graves avec l'ACC confortable (la courbe verte en discontinue). De manière similaire, pour le mode dynamique, la réduction correspond à la différence entre l'aire représentant les proportions des blessés graves sans ACC et celle des blessés graves avec l'ACC dynamique (la courbe violette en discontinue).

Ces calculs reposent sur l'extrapolation des répartitions d'accidents, réalisée en fonction des scénarios d'accidents spécifiques au champ d'application de l'ACC.

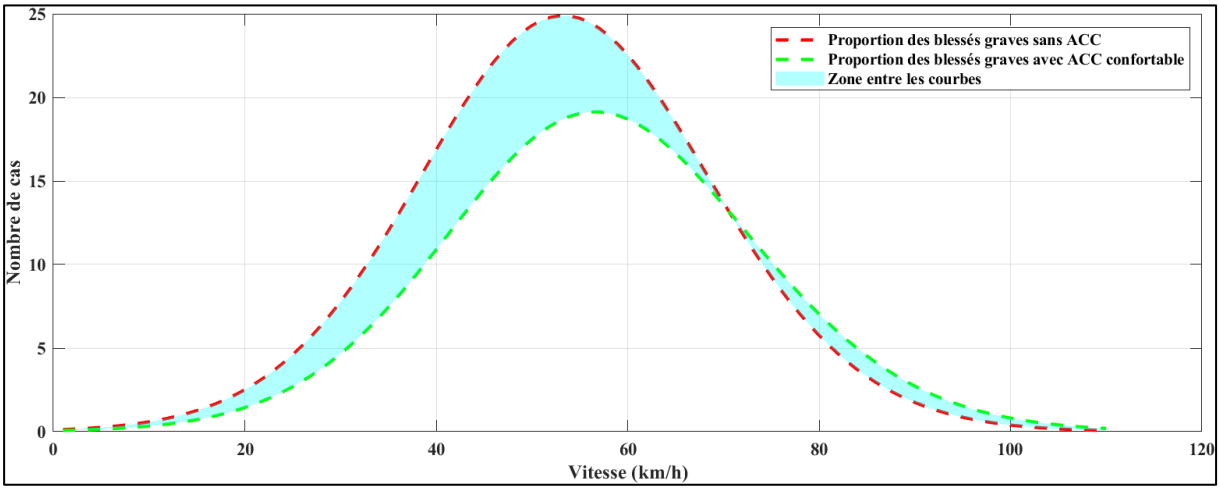


Figure V. 20. Bénéfice de l'ACC en mode confortable à 30 m

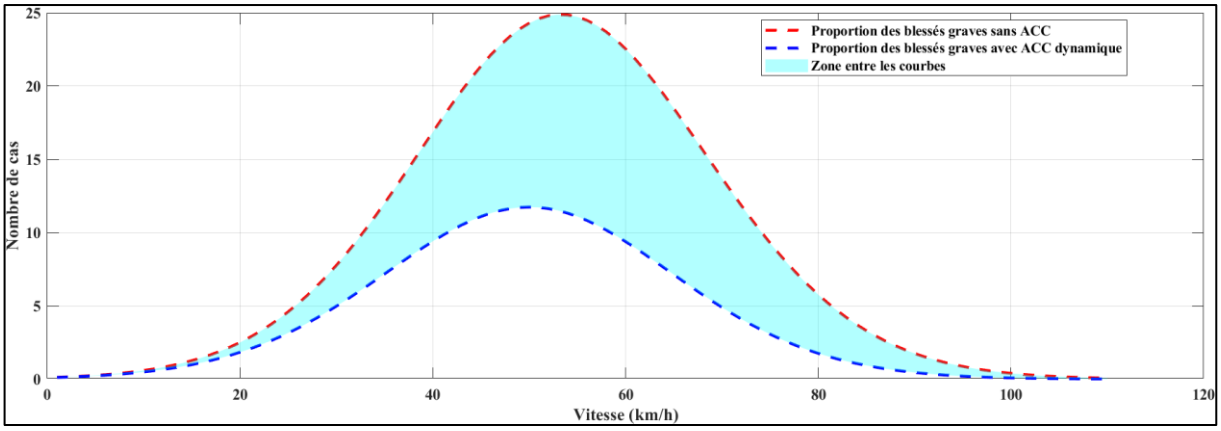


Figure V. 21. Bénéfice de l'ACC en mode dynamique à 30 m

En élargissant l'analyse aux bénéfices de l'ACC sur l'ensemble des accidents de 2RM, un calcul global a été réalisé en suivant le processus décrit dans la section VII.3.5.4. Dans les accidents impliquant des 2RM, il a été estimé que l'ACC pourrait intervenir dans 17,3% des

cas (résultats du chapitre IV, étude qualitative). Parmi ces accidents entrant dans le champ d'application de l'ACC, 34% peuvent impliquer des blessés graves. Sur ces 34%, l'ACC peut réduire la proportion des blessés graves de 20% en mode confortable et de 53% en mode dynamique.

Ainsi, le bénéfice global de l'ACC, tous types d'accidents confondus, a été calculé comme suit :

En mode confortable : $17{,}3\% \times 34\% \times 20\% = 1{,}2\%$

En mode dynamique : $17{,}3\% \times 34\% \times 53\% = 3{,}1\%$

Ces calculs nous montrent que l'ACC peut offrir un bénéfice estimé à 1,2% en mode confortable et de 3.1% en mode dynamique, quel que soit le type de scénario d'accidents impliquant des 2RM, à l'échelle nationale en France.

❖ Pour une distance de déclenchement de 40 m

Les résultats pour une distance de déclenchement de 40 m (Figure V.22 et V.23) mettent en évidence une amélioration des bénéfices de l'ACC en termes de réduction des blessés graves. En mode confortable, l'ACC permet de réduire les blessures graves de 43%, tandis qu'en mode dynamique, cette réduction atteint 51%.

Pour l'ensemble des accidents de 2RM, le bénéfice global de l'ACC a été recalculé selon le même processus que précédemment. Étant donné qu'environ 17,3% des accidents de 2RM relèvent du champ d'application de l'ACC, le bénéfice global estimé s'élève à :

En mode confortable : $17{,}3\% \times 34\% \times 43\% = 2{,}5\%$

En mode dynamique : $17{,}3\% \times 34\% \times 51\% = 3\%$

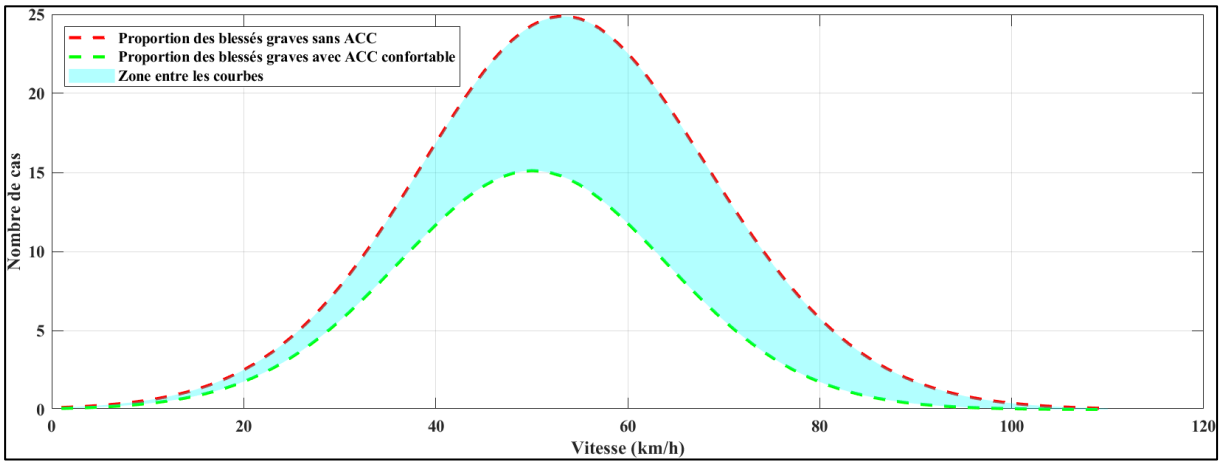


Figure V. 22. Bénéfice de l'ACC en mode confortable à 40 m

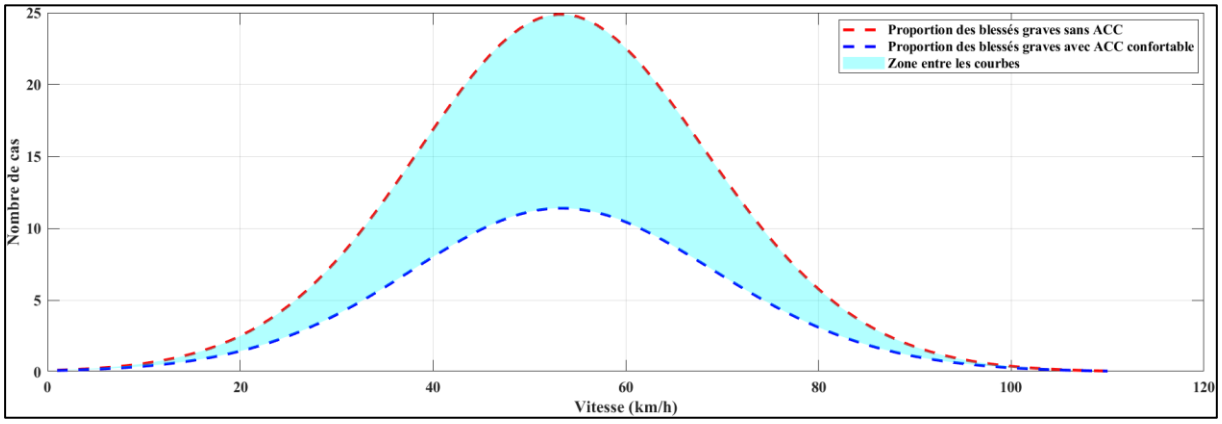


Figure V. 23. Bénéfice de l'ACC en mode dynamique à 40m

V.4 Discussions

❖ Bénéfice global de l'ACC

Les résultats montrent que l'ACC, tant en mode confortable qu'en mode dynamique, joue un rôle dans la réduction des accidents et des vitesses d'impact. Les gains sont particulièrement marqués dans le mode dynamique, permettant une réduction allant jusqu'à 25,5 km/h pour une distance de déclenchement de 50 m. D'autre part, le mode confortable, bien que moins performant, reste efficace avec des réductions atteignant 21 km/h à la même distance. Ces observations confirment que les deux modes contribuent à une amélioration globale de la sécurité routière, avec une efficacité accrue pour le mode dynamique.

Les résultats de cette étude mettent en évidence l'efficacité notable de l'ACC pour réduire les vitesses d'impact et, par conséquent, les risques associés aux accidents impliquant des 2RM. Plusieurs points méritent d'être soulignés :

a) Rôle des distances de déclenchement

Les distances de déclenchement jouent un rôle important dans l'efficacité de l'ACC, comme le confirment les résultats des tests statistiques. Une analyse par régression linéaire a été menée pour examiner la relation entre la distance de déclenchement et la réduction de la vitesse d'impact. Pour le mode confortable, les résultats indiquent qu'à chaque mètre supplémentaire de distance, la vitesse d'impact est réduite en moyenne de 0.45 km/h (p-value=0,0093). Le modèle présente un coefficient de détermination de R^2=0,92 suggérant une forte corrélation entre les deux variables. De même, en mode dynamique, la réduction moyenne de vitesse est légèrement supérieure, atteignant 0,48 km/h par mètre supplémentaire (p-value=0,0173), avec un coefficient de détermination de R^2=0,88. Ces résultats montrent clairement que la distance de déclenchement est un prédicteur statistiquement significatif de la réduction des vitesses d'impact dans les deux modes.

Cependant, au-delà des distances de déclenchement de 30 m et 40 m, les bénéfices en termes de réduction de vitesse semblent plafonner. Cette saturation pourrait s'expliquer par des

limitations inhérentes aux systèmes d'ACC ou par le type d'accidents 2RM étudiés, dans lesquels une augmentation de la distance n'apporte pas de bénéfices supplémentaires. Cela soulève la question de l'optimisation des distances de déclenchement, afin de maximiser les avantages tout en tenant compte des contraintes techniques et des conditions réelles de conduite.

Il est important de noter que ces analyses ont été effectuées sur un échantillon restreint, ce qui pourrait limiter la robustesse et la généralisation des conclusions. Ce faible nombre de données pourrait également expliquer une partie des écarts résiduels observés dans les modèles. Malgré cela, la tendance globale souligne le rôle important des distances de déclenchement dans l'efficacité des systèmes ACC.

b) Bénéfices en termes de réduction des accidents

À des distances de déclenchement de 30 m et 40 m, l'ACC démontre une efficacité notable à la fois dans la prévention des accidents et dans la réduction des vitesses d'impact. À 30 m, l'ACC en mode confortable et en mode dynamique permet d'éviter respectivement 39% et 47% des accidents. Ces résultats mettent en évidence que, même dans une configuration que l'on pourrait considérer comme pessimiste (30 m par rapport à 40 m), cette technologie reste bénéfique. Ce bénéfice à 30 m pourrait s'expliquer par le fait que, dans certains scénarios d'accidents, les motards sous-estiment la gravité de la situation à laquelle ils sont confrontés et n'engagent pas immédiatement une manœuvre de freinage. Dans d'autres cas, ils initient une manœuvre de freinage tardivement, ne disposant alors pas du temps nécessaire pour effectuer un freinage efficace et cohérent face aux conditions rencontrées. Dans les autres types de scénarios que l'on peut qualifier d'optimistes avec une distance de déclenchement de 40 m, l'ACC permet d'éviter environ 43% et 53% en modes confortable et dynamique respectivement, soit une amélioration de 4% et de 6% par rapport à une distance de 30 m.

Par ailleurs, environ 66% (resp. 71%) des accidents en mode confortable à 30 m (resp. 40 m) sont soit évités, soit atténués à une vitesse d'impact inférieure ou égale à 40 km/h. Ces proportions augmentent à 75% et 77% en mode dynamique, soulignant l'efficacité de ce dernier. Ces résultats confirment que l'ACC est particulièrement bénéfique pour prévenir ou limiter les accidents à basse et moyenne vitesse, ce qui représente un enjeu pour la sécurité des 2RM.

Pour évaluer la significativité des différences observées dans les proportions d'accidents évités, un test statistique de comparaison des proportions (test d'indépendance) a été réalisé. Ce test a permis de comparer, d'une part, les modes confortable et dynamique pour chaque distance de déclenchement (30 m et 40 m) et, d'autre part, les distances de 30 m et 40 m pour chaque mode. Les résultats ne montrent qu'aucune de ces différences n'est statistiquement significative (p-value>0,05). Par exemple, bien que le mode dynamique présente une amélioration de 6 % entre 30 m et 40 m (de 47% à 53%), cette variation n'est pas significative et pourrait être attribuée au hasard. Ces résultats peuvent également s'expliquer par le faible nombre de données disponibles, limitant ainsi la puissance statistique des tests effectués. Néanmoins, ces observations confirment que l'efficacité de l'ACC reste globalement cohérente, indépendamment de ces paramètres spécifiques, tout en soulignant son utilité pour réduire les accidents, en particulier à basse et moyenne vitesse.

c) Répartition des accidents non évitables

L'analyse des accidents non évitables montre également des bénéfices remarquables. En modes confortable et dynamique, les accidents tendent à se concentrer à des vitesses d'impact plus faibles. Par exemple, en mode dynamique, environ 50% des accidents non évitables à 30 m se situent à une vitesse d'impact inférieure à 40 km/h, contre seulement 19% sans ACC. Ces résultats démontrent que, même dans les cas où l'ACC ne permet pas d'éviter complètement une collision, il contribue à en réduire la gravité. Au-delà de 80 km/h, l'effet de l'ACC devient marginal, quelle que soit la configuration. Ce constat met en lumière les limites du système pour des scénarios d'impact à haute vitesse, où d'autres approches de sécurité, telles que des systèmes de protection passive, pourraient être plus appropriées.

Enfin, l'absence de différences marquées entre les distances de déclenchement de 30 m et 40 m, combinée au plafonnement des bénéfices à 40 m, suggère qu'une distance optimale pourrait se situer autour de 30 m pour maximiser les gains tout en minimisant les délais d'intervention et les exigences techniques du système.

❖ Bénéfice de l'ACC sur les blessés graves

Les résultats présentés indiquent que l'utilisation de l'ACC, qu'il soit en mode confortable ou dynamique, offre des bénéfices en termes de réduction des blessures graves (MAIS 3+) lors des accidents de 2RM. Ces bénéfices sont particulièrement visibles lorsque l'ACC est appliqué dans les scénarios où il entre directement dans le champ d'application, mais ils s'étendent également à une échelle plus large en tenant compte de l'ensemble des accidents de 2RM.

Dans les analyses basées sur une distance de déclenchement de 30 m, les données révèlent une réduction notable des blessés graves. En mode confortable, la diminution est de 20%, tandis qu'en mode dynamique, cette réduction atteint 53%. Cette amélioration est particulièrement marquée en mode dynamique, ce qui suggère que ce mode pourrait être plus efficace pour prévenir les blessures graves dans des situations de plus grande urgence. Cela pourrait s'expliquer par la décélération (5 m/s^2) qui est plus importante par rapport au mode confortable (3 m/s^2).

Le passage à une distance de déclenchement plus longue (40 m) a révélé une augmentation des bénéfices de l'ACC en mode confortable. La réduction des blessures graves avec ce mode atteint désormais 43%, soit une hausse de 23% par rapport à une distance de déclenchement de 30 m. En revanche, le mode dynamique à 40 m affiche des performances inférieures à celles observées à 30 m. Le bénéfice de l'ACC en mode dynamique à 40 m sur les blessures graves s'élève à 51%, soit une diminution de 2% par rapport à la même configuration à 30 m. Ce résultat, qui peut sembler incohérent ou illogique, s'explique probablement par le fait que l'ACC, avec une distance de déclenchement de 40 m, est plus performant en termes d'évitement des accidents qu'en termes de réduction des blessures graves (MAIS3+).

Les résultats globaux, prenant en compte l'ensemble des accidents de 2RM, suggèrent également que l'ACC peut jouer un rôle dans la réduction des blessures graves. En mode confortable, le bénéfice global est estimé à 1,2% et en mode dynamique à 3,1% pour une distance de déclenchement de 30 m. De plus le bénéfice de l'ACC avec une distance de

déclenchement de 40 m sur les blessés graves est estimé à 2,5% en mode confortable et 3% en mode dynamique. Ces chiffres montrent l'impact limité de l'ACC sur la population globale d'accidents de 2RM, en grande partie en raison du faible pourcentage d'accidents dans lesquels l'ACC est applicable (17,3%).

L'effet positif de l'ACC sur la réduction des blessures graves pourrait également être influencé par d'autres facteurs, tels que la conduite de l'utilisateur et les conditions environnementales. En effet, l'ACC, bien qu'efficace, n'est pas une solution miracle et reste limité par les scénarios auxquels il peut répondre. Il est aussi possible que l'ACC ne soit pas aussi performant dans certaines conditions extrêmes, comme lors de freinages d'urgence à grande vitesse ou dans des environnements de circulation dense où l'espace pour manœuvrer est restreint.

Une autre hypothèse à considérer est l'interaction entre l'ACC et le comportement des conducteurs. En effet, l'ACC peut entraîner un faux sentiment de sécurité, amenant certains conducteurs à adopter un comportement plus risqué (par exemple, des vitesses plus élevées ou une distance de sécurité insuffisante). Ce phénomène pourrait atténuer les bénéfices observés, notamment si le conducteur ne perçoit pas l'ACC comme un dispositif qui doit être utilisé en complément de la vigilance humaine, plutôt que comme un substitut.

En conclusion, bien que les résultats démontrent un impact positif de l'ACC sur la réduction des blessures graves, il reste nécessaire de continuer à explorer l'efficacité de cette technologie dans différents contextes d'accident.

❖ Limites

Cette étude démontre que l'ACC constitue une avancée prometteuse pour la sécurité des 2RM. Toutefois, les résultats soulignent également la nécessité d'approfondir les analyses pour mieux comprendre les facteurs limitant son efficacité, notamment à grande vitesse, et pour affiner les paramètres d'activation du système afin d'en maximiser les bénéfices dans un cadre réel.

Cette étude présente certaines limites qui doivent être prises en compte. Tout d'abord, le faible nombre d'accidents analysés constitue une contrainte limitant la généralisation des résultats. Ensuite, la méthodologie utilisée se concentre exclusivement sur les scénarios d'évitement des accidents par freinage, négligeant d'autres stratégies d'évitement, telles que les manœuvres de contournement ou une combinaison de freinage et de manœuvre d'évitement. L'intégration de ces aspects pourrait enrichir l'analyse et offrir une vision plus complète de l'efficacité de l'ACC. Par ailleurs, l'interaction entre le motard et l'ACC n'a pas été prise en compte. En se focalisant uniquement sur l'efficacité du système, cette étude n'explore pas l'impact potentiel de l'ACC sur le comportement des motards, ni les effets combinés d'autres technologies d'aide à la conduite. Enfin, bien que la méthodologie développée pour cette étude soit adaptée à l'échantillon analysé, elle pourrait être appliquée à des ensembles de données plus larges afin de mieux comprendre l'influence de l'ACC sur une variété de scénarios d'accidents et de conditions réelles de conduite. Ces limites mettent en évidence la nécessité d'approfondir les recherches pour évaluer pleinement l'impact de l'ACC et des technologies associées sur la sécurité des motards.

Il convient de souligner l'absence d'études antérieures traitant spécifiquement de l'influence des systèmes d'ACC sur les accidents impliquant des 2RM. Cette lacune dans la littérature scientifique présente à la fois un défi et une opportunité. L'absence de travaux comparables ne permet pas d'effectuer des comparaisons directes avec des recherches précédentes, ce qui limite la possibilité de valider ou de contextualiser nos résultats. Cette situation rend notre analyse particulièrement novatrice, ouvrant ainsi un nouveau champ d'investigation dans le domaine de la sécurité routière.

V.5 Conclusion

Les résultats de cette étude révèlent que l'ACC a un impact important sur la réduction de la vitesse d'impact des accidents impliquant 2RM qui entrent dans le champ d'application de l'ACC, avec des effets particulièrement marqués dans les scénarios où le système est activé en mode dynamique. En effet, lorsque l'ACC est activé à une distance de déclenchement de 40 m et en mode dynamique, 53% de ces accidents sont évités. Parmi les accidents non évités, la vitesse d'impact est réduite : elle est 28% plus souvent inférieure ou égale à 40 km/h par rapport aux accidents similaires sans ACC, et 15% moins souvent supérieure à 60 km/h. De plus la technologie de l'ACC s'avère particulièrement efficace dans la réduction des blessures graves (MAIS3+), avec une réduction allant jusqu'à 53% pour les scénarios où le système est activé à une distance de déclenchement de 30 m en mode dynamique. Ces résultats montrent clairement l'efficacité de l'ACC pour atténuer la gravité des accidents.

Ces résultats soulignent l'importance du mode dynamique, qui semble être le plus efficace dans des contextes d'urgence. Cependant, ces effets sont principalement observés dans des conditions de basse et moyenne vitesse. À des vitesses plus élevées, l'ACC apparaît eu un impact limité, ce qui suggère que son efficacité pourrait être davantage optimisée en combinaison avec d'autres technologies de sécurité, comme des systèmes de freinage d'urgence ou des protections passives.

Pour approfondir l'évaluation de l'ACC sur les 2RM, plusieurs pistes de recherche peuvent être envisagées en s'inspirant des études menées sur les véhicules à quatre roues. Tout d'abord, des études pourraient explorer l'interaction entre l'ACC et d'autres systèmes d'assistance à la conduite, comme les systèmes de freinage d'urgence (Ma et al., 2005), afin de déterminer si la combinaison de ces technologies améliore davantage la sécurité des motards. Une autre voie intéressante serait d'évaluer l'impact de l'ACC dans des contextes spécifiques de conduite, par exemple, en ville ou sur des routes sinueuses, comme l'a fait Larsson (2012) avec les conducteurs de Volvo, pour comprendre les ajustements comportementaux des motards dans ces environnements. Enfin, des recherches pourraient se concentrer sur les effets du développement des technologies plus avancée que l'ACC, comme cela a été fait pour les 4RM avec la technologie du Contrôle Automatique de la Vitesse et de la Distance (CACC) (Li et al., 2017). L'objectif de cette analyse est de déterminer si la communication entre motos équipées de ce système permettrait d'optimiser la sécurité et de réduire les risques de collisions entre

2RM. Ces études complémentaires pourraient apporter de nouvelles perspectives pour améliorer la conception et l'efficacité de l'ACC sur les motos.

En conclusion, cette étude confirme que l'ACC peut jouer un rôle important dans l'amélioration de la sécurité des motards, en particulier en réduisant la vitesse d'impact des accidents et en évitant un certain nombre d'entre eux. Cependant, des études complémentaires sont nécessaires pour analyser plus précisément cette technologie dans des contextes variés et pour développer des recommandations pratiques pour l'intégration de l'ACC dans les motos afin de maximiser la sécurité routière des 2RM.

Chapitre VI

Analyse de l'effet d'un Motorcycle Stability Control

Table des matières

Chapitre VI

Analyse de l'effet d'un Motorcycle Stability Control

VI.1 Revue de littérature 135

VI.2 Matériels et méthodes 137

VI.2.1 Sélection et préparation des données 138

VI.2.2 Approche mathématique de l'analyse des accidents 138

VI.3 Résultats de l'étude 142

VI.3.1 Effet du MSC et comparaison avec l'ABS 142

VI.3.2 Analyse selon le type du virage 144

VI.4 Discussion et conclusion 146

Parmi les technologies développées pour améliorer la sécurité des 2RM, le système de contrôle de stabilité (MSC - Motorcycle Stability Control) se distingue par sa capacité à ajuster la pression de freinage en fonction de l'angle de roulis, augmentant ainsi la stabilité et le contrôle en courbe.

Ce chapitre vise à évaluer l'impact du MSC sur la prévention et l'atténuation des accidents de 2RM dans des situations de perte de contrôle en virage dues à une manœuvre de freinage inadéquate. La littérature existante a montré que les accidents en virage sont particulièrement dangereux, souvent associés à des blessures graves ou fatales. Les premières évaluations de cette technologie ont montré des effets positifs sur la sécurité des motocyclistes. Notre objectif dans ce chapitre est de fournir plus de résultats sur l'efficacité du MSC, en particulier dans des scénarios d'accidents réels.

En examinant les résultats de cette étude, nous cherchons à déterminer dans quelle mesure le MSC peut contribuer à améliorer la sécurité des motocyclistes. Les conclusions tirées de cette analyse fourniront des insights précieux sur l'importance de l'adoption de technologies de stabilité avancées dans les 2RM et sur les recommandations potentielles pour la réduction des risques d'accidents graves.

Afin de faciliter la compréhension du lecteur, ce chapitre est structuré comme suit : tout d'abord, nous présentons un état de l'art des études précédentes qui analysent l'effet de cette technologie sur les accidents de 2RM en virage. Ensuite, nous détaillons la méthodologie suivie dans cette étude. Enfin, les résultats obtenus sont présentés et discutés dans les sections « résultats » et « discussion ».

VI.1 Revue de littérature

Dans cette section, une revue de littérature générale concernant les études analysant l'impact du MSC sur ce type d'accidents est examinée. Il est à noter que peu d'études ont examiné l'impact des technologies d'assistance à la stabilité des motos en virage sur les accidents de 2RM dus à une perte de contrôle en virage causée par une manœuvre de freinage inadéquate.

Lich et al. (2016) ont conduit une étude visant à évaluer l'impact du MSC sur la sécurité des motocyclistes, notamment dans les virages, et à démontrer comment ces systèmes peuvent améliorer la dynamique de conduite et prévenir les accidents. L'enquête a été réalisée par le groupe de recherche sur les accidents de Bosch en 2007, qui a analysé la situation des accidents impliquant des 2RM en Allemagne en utilisant les données du GIDAS (German In-Depth Accident Study). Une évaluation des avantages potentiels du MSC a été effectuée en recalculant la vitesse de collision en fonction des interventions de freinage hypothétiques des motocyclistes. Les données ont été filtrées pour leur pertinence et vérifiées afin de s'assurer que toutes les informations nécessaires étaient disponibles, notamment les distances de freinage mesurées, le rayon de courbe, les conditions de la surface de la route et la friction au moment

de l'accident. Les scénarios de comportement des motocyclistes dans les courbes ont été analysés pour déterminer les effets du MSC. Cette analyse a révélé que 43% des accidents mortels de 2RM en Allemagne sont dus à une perte de contrôle, souvent provoquée par un freinage excessif en virage. Les systèmes MSC, en combinant l'ABS, le système de freinage combiné électronique (eCBS), le contrôle de traction et des capteurs inertiels, permettent de maintenir la stabilité de la moto même en cas de freinage ou d'accélération en virage. Les résultats ont montré que le MSC pourrait éviter 16% des accidents de 2RM dans les courbes et jusqu'à 5% de tous les accidents impliquant des 2RM en Allemagne. En combinant l'ABS avec le MSC, il serait possible d'éviter environ un tiers des accidents de 2RM avec blessés (32%).

Sevarin et al. (2018) ont mené une étude pour évaluer le potentiel de la même technologie appelée « ABS virage » dans la réduction des accidents, en utilisant une approche intégrée à la fois statistique et expérimentale. Tout d'abord, les scénarios actuels d'accidents pour les motos, basés sur les données de la base nationale autrichienne des accidents de la route, ont été analysés pour observer la pertinence des différentes configurations d'accidents. En outre, environ 100 accidents de moto ont été reconstruits et utilisés comme base pour l'évaluation du système. Des informations sur le fonctionnement du système analysé ont été obtenues en enregistrant et en analysant l'activation des systèmes dans des conditions de conduite par des motocyclistes ayant différents niveaux d'expérience. Un modèle a été développé pour évaluer les conditions de déclenchement des systèmes. Une analyse approfondie des accidents initiaux après l'introduction virtuelle du système a permis de définir le potentiel du système pour les cas sélectionnés. La méthodologie suivie pour effectuer cette analyse était similaire à celle développée par Lich et al. (2016). Les résultats ont ensuite été extrapolés à l'ensemble des statistiques nationales autrichiennes afin d'évaluer le potentiel réel du système. Cette étude aide à définir la pertinence de « l'ABS virage » pour les scénarios d'accidents en virage. L'analyse des données statistiques des accidents a montré que les accidents en virages représentent 26,5% de la base nationale, mais 46,5% des décès, indiquant un risque élevé pour les motocyclistes en virage. Les accidents de véhicules uniques sont les plus fréquents en virage (70% des accidents en virage). Les tests de conduite ont montré que « l'ABS virage » s'active à des angles d'inclinaison supérieurs à 20° et dans une large gamme de vitesses. Les conditions de déclenchement varient entre les scénarios de test de sécurité et les conditions de piste. En comparant les données des accidents reconstruits avec les conditions dans lesquelles le système fonctionne, il a été constaté que « l'ABS virage » pourrait éviter 19% des accidents en virage et réduire la gravité de 13% supplémentaires, ce qui représente un impact potentiel positif dans 32% des accidents en virage.

L'étude menée par Lucci et al. (2022) visait à estimer l'applicabilité, les avantages potentiels et la faisabilité d'un autre système similaire au MSC appelé « Motorcycle Curve Assist (MCA) ». Le système est conçu pour effectuer un contrôle d'urgence de la vitesse d'une moto approchant un virage à une vitesse inappropriée. La méthode utilisée dans cette étude sur le MCA a consisté en deux phases principales. Tout d'abord, l'applicabilité et les avantages potentiels du système ont été évalués à partir d'une base de données d'accidents de motos, en estimant la réduction du risque de blessure. Ensuite, une campagne de tests sur le terrain avec 29 motocyclistes a été menée pour vérifier la faisabilité et l'acceptabilité du système dans des conditions réelles, en utilisant une moto équipée du système MCA afin d'observer son comportement et de recueillir des données subjectives des participants. Les résultats de cette étude indiquent que dans la base de données des accidents, 23% des cas se sont produits en

virage et après une analyse détaillée, le MCA s'est montré bénéfique dans 14% des cas (soit 60% des cas de virages). La réduction potentielle relative du risque de blessure, en considérant uniquement les avantages dus à la réduction de la vitesse de l'accident, variait de 3 à 9% pour les blessures MAIS2+ et de 9 à 27% pour les blessures MAIS3+. Les tests sur le terrain ont été effectués dans des virages abordés à une vitesse moyenne de 28,7 km/h et un angle d'inclinaison moyen de 20°. Le système a fourni une décélération moyenne de 3,3 m/s² atteinte avec un jerk[1] de 17,3 m/s^3, pour une durée totale moyenne de 0,59 s. Pour la composante des tests sur le terrain, les participants ont signalé une bonne contrôlabilité du système, sans perte de contrôle enregistrée ni rapportée par les participants.

Les recherches antérieures sur l'impact du MSC sur la sécurité des motocyclistes, telles que celles menées par Lich et al. (2016), Sevarin et al. (2018), et Lucci et al. (2022), ont toutes montré des effets positifs de cette technologie, avec des taux de réduction d'accidents variant de 16% à 32%. Cependant, ces recherches se sont généralement concentrées sur une large gamme d'accidents en virage sans distinction précise des causes spécifiques de ces accidents. Une lacune notable est l'absence d'analyse approfondie des accidents de perte de contrôle en virage spécifiquement causée par une manœuvre de freinage inadéquate. En ciblant ces scénarios spécifiques, notre étude vise à fournir des résultats plus réalistes et détaillés sur l'efficacité du MSC, en tenant compte des conditions particulières où cette technologie peut avoir le plus grand impact.

De plus, les études précédentes n'ont pas systématiquement examiné les différences entre les virages à gauche et à droite. Notre étude comble cette lacune en analysant séparément ces deux types de virages, ce qui permet de mieux comprendre les dynamiques spécifiques de chaque situation. Les virages à droite, souvent plus dangereux en raison de la visibilité réduite et des angles plus serrés, sont comparés aux virages à gauche, où les motocyclistes ont généralement une meilleure visibilité et peuvent mieux anticiper les courbes. En abordant ces aspects, notre étude offre une évaluation plus complète et nuancée de la contribution du MSC à la sécurité des 2RM, tout en mettant en lumière des zones spécifiques où des améliorations technologiques et comportementales sont nécessaires.

VI.2 Matériels et méthodes

Dans cette section, nous décrivons la méthodologie employée pour analyser l'influence du MSC sur les accidents impliquant des 2RM dus à une perte de contrôle en virage provoquée par une manœuvre de freinage. De plus, nous présentons une définition de la base de données des accidents sélectionnés ainsi que les hypothèses formulées pour cette méthodologie.

[1] Jerk : Dérivée du vecteur accélération par rapport au temps Febvre et al. (2013).

VI.2.1 Sélection et préparation des données

La méthodologie suivie pour cette sélection comprenait plusieurs étapes systématiques. D'abord, les données initiales comprenaient 390 cas d'accidents récupérés à partir des bases de données EDA et IGLAD. Ces bases de données fournissent des informations détaillées sur les accidents de la route, incluant des variables telles que les vitesses, les plans, les conditions de la route et les comportements des conducteurs (voir section III.1.1).

Ensuite, la première étape de sélection consistait à isoler les accidents survenus en virage. Cette étape est déterminante car le MSC est spécifiquement conçu pour améliorer la stabilité des véhicules dans des situations de virage. Sur les 390 cas initiaux, 32 cas répondaient à ce critère. Cette réduction du nombre de cas permet de se concentrer sur les scénarios où le MSC peut potentiellement influencer les résultats.

La deuxième étape de la sélection visait à identifier les accidents dus à des manœuvres de freinage inadéquates. Le MSC est particulièrement pertinent dans ces situations car il ajuste les pressions de freinage entre les roues avant et arrière, et par conséquent il aide à maintenir la stabilité du véhicule lors de freinages brusques ou incorrects en virage. Après cette étape, 23 cas ont été retenus pour l'analyse approfondie.

Enfin, les 23 cas sélectionnés ont été préparés pour une analyse détaillée. Cela incluait la vérification de la complétude et de la qualité des données, l'extraction des variables pertinentes telles que la vitesse, le rayon du virage et les conditions de la route, ainsi que la normalisation des données pour assurer leur compatibilité avec les modèles d'analyse utilisés.

VI.2.2 Approche mathématique de l'analyse des accidents

Pour analyser l'impact de la technologie MSC sur les accidents de 2RM liés à une perte de contrôle en virage due à une manœuvre de freinage inadéquate, il est nécessaire de trouver une méthodologie permettant d'estimer l'effet de cette technologie à partir des données de reconstruction cinématique des accidents de 2RM.

Dans ce contexte, la méthodologie développée par Lich et al. (2016) et reprise par Sevarin et al. (2018) répond à cet objectif. Cette méthodologie utilise les différentes données issues de la reconstruction cinématique de l'accident (telles que les vitesses d'approche ou de chute, le rayon de courbure de la route, l'état de surface de la chaussée, etc) pour recalculer une nouvelle vitesse de chute ou de choc. Ensuite, cette nouvelle vitesse est comparée à la vitesse de choc recensée dans la base de données afin de déterminer si le MSC a permis d'éviter ou d'atténuer l'accident.

Compte tenu des avantages de cette méthodologie, nous avons choisi de l'utiliser pour analyser l'effet du MSC sur les cas d'accidents extraits des bases de données EDA et IGLAD. Dans cette section, une explication détaillée de cette méthodologie est fournie, et chaque équation mathématique est explicitée afin de comprendre comment elle a été obtenue

Cette méthodologie est basée sur quelques hypothèses :

1- L'ABS n'est plus efficace en courbe à partir d'un angle d'inclinaison $\alpha > 20°$ (Lich et al., 2016).
2- La distance de freinage est égale à la distance mesurée sur les lieux de l'accident si celle-ci est disponible ; sinon, elle est équivalente à la distance entre le début de la courbe et le point de début de chute ou de sortie de voie (Figure VI.1).

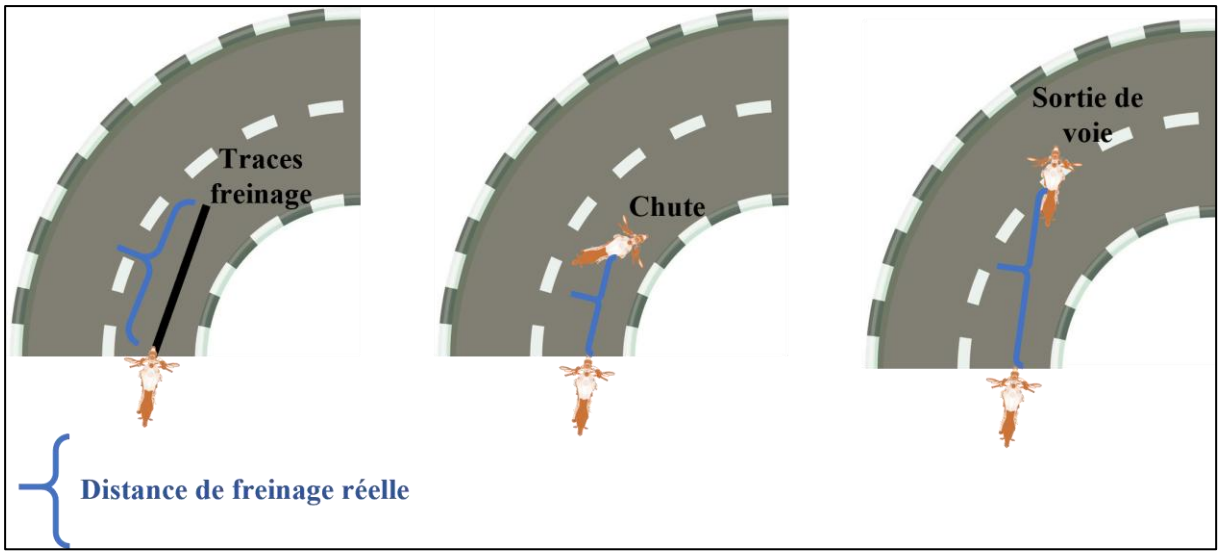


Figure VI. 1. Distance de freinage

La méthodologie de calcul développée par Lich et al. (2016) se décompose en quatre étapes, détaillées ci-dessous :

1. Première étape : Calcul de l'angle d'inclinaison en utilisant la vitesse initiale et le rayon de courbure (équation IV.1).

$$\alpha = \arctan\left(\frac{V_i^2}{g * R}\right) \qquad Eq\ \text{VI. 1}$$

❖ Démonstration :

L'équation (VI.1) a été développée en tenant compte de la dynamique d'un 2RM en virage. Lorsqu'une moto prend un virage, elle est soumise à une force centripète (Fc) dirigée vers l'extérieur du virage (Figure VI.2). Cette force (Fc) s'obtient de la manière suivante :

- La deuxième loi de Newton stipule que la force est le produit de la masse (m) et de l'accélération (γ), ce qui donne (équation VI.2) :

$$F = m \times \gamma \qquad Eq\ \text{VI. 2}$$

- Pour un mouvement circulaire, la moto est soumise à une accélération centripète (γ_c). Donc pour une force centripète (Fc) (équation VI.3) :

$$Fc = m \times \gamma_c \qquad Eq\ \text{VI. 3}$$

L'accélération centripète γ_c nécessaire pour changer la direction de la vitesse de l'objet afin de le maintenir en mouvement circulaire est égale à (équation VI.4) :

$$\gamma_c = \frac{V_i^2}{R} \qquad Eq\ \text{VI.4}$$

Nous obtenons une force centripète (Fc) qui est égale à (équation VI.5) :

$$Fc = m \times \frac{V_i^2}{R} \qquad Eq\ \text{VI.5}$$

Ensuite, comme illustré à la Figure VI.2, il y a aussi la force de la pesanteur ou poids (Fp) qui agit verticalement sur le 2RM. Cette force (Fp) est donnée par (équation VI.6) :

$$Fp = m \times g \qquad Eq\ \text{VI.6}$$

Où g est l'accélération de la pesanteur.

Pour calculer l'angle d'inclinaison (α) de la moto, il suffit de calculer sa tangente (équation VI.7) :

$$\tan(\alpha) = \frac{Fc}{Fp} = \frac{m \times \frac{V_i^2}{R}}{m \times g} = \frac{V_i^2}{g * R} \qquad Eq\ \text{VI.7}$$

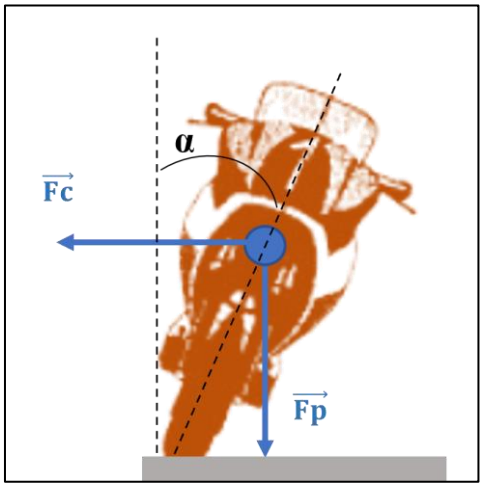


Figure VI. 2. Dynamique d'une moto en virage

$$\text{Par conséquent : } \alpha = \arctan\left(\frac{V_i^2}{g * R}\right) \qquad Eq\ \text{VI.1}$$

2. Deuxième étape : Calcul de la décélération maximale en utilisant le cercle de forces (Kammscher Kreis) (Figure VI.3) (équation VI.8) :

$$\gamma_{max} = \sqrt{(g.\mu)^2 - [g.\tan(\alpha)]^2} \qquad Eq\ \text{VI.8}$$

❖ Démonstration :

Le cercle de forces, également connu sous le nom de cercle d'adhérence ou cercle de Kamm (développé par Wunibald Kamm), est un concept utilisé en dynamique des véhicules pour illustrer les limites d'adhérence disponible entre les pneus et la route. Il sert à évaluer la capacité maximale d'adhérence des pneus lorsqu'ils sont soumis à des forces latérales (comme en virage) et longitudinales (comme en accélération ou en décélération).

- Concept du cercle de forces :

Le cercle de forces est une représentation graphique des forces que les pneus peuvent exercer sur la route. Le rayon du cercle représente la force de friction maximale (Fmax) que les pneus peuvent générer. Sur ce diagramme, l'axe horizontal représente la force longitudinale (accélération ou décélération) et l'axe vertical représente la force latérale (force centripète en virage).

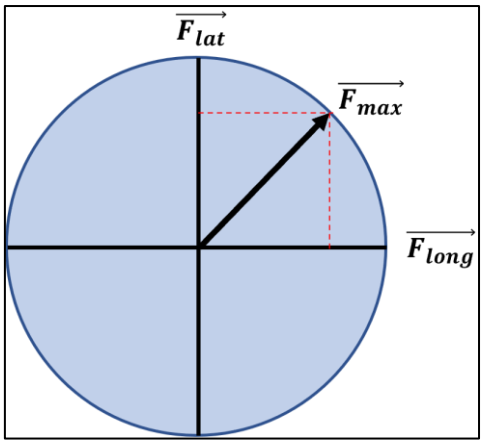


Figure VI. 3. Cercle de Kamm

En utilisant ce concept du cercle de Kamm, l'équation (VI.2) est obtenue comme suit :

- Calcul de la force de friction maximale (Fmax) (eq VI.9) :

La force de friction qui permet à un véhicule de tourner sans déraper dépend de la force normale (F_N) et du coefficient de friction (μ) entre les pneus et la route (équation VI.9) :

$$F_{max} = \mu \times F_N = \mu \times m \times g \qquad Eq\ \text{VI.9}$$

- Composantes de la force de friction :

  Comme illustré à la Figure VI.3, lorsque le véhicule est en virage tout en décélérant, la force de friction disponible est partagée entre la composante latérale (F_{lat}) et la composante longitudinale (F_{long}). Selon le cercle de forces, la somme vectorielle de ces composantes ne peut pas dépasser (Fmax) (équation VI.10).

$$F_{max}^2 = F_{lat}^2 + F_{long}^2 \qquad Eq\ \text{VI.10}$$

$$(\mu \times m \times g)^2 = F_{lat}^2 + (m \times \gamma_{max})^2$$

La force latérale en virage est donnée par la force centripète (équation VI.11) :

$$F_{lat} = Fc = m \times \frac{V_i^2}{R} \qquad Eq\ \text{VI.11}$$

En incorporant cette équation dans le cercle de forces, nous obtenons (équation VI.12) :

$$(\mu \times m \times g)^2 = \left(m \times \frac{V_i^2}{R}\right)^2 + (m \times \gamma_{max})^2 \qquad Eq\ \text{VI.12}$$

Simplification de l'équation (équation VI.13) :

$$\gamma_{max} = \sqrt{(g.\mu)^2 - [g.\tan(\alpha)]^2} \qquad Eq\ \text{VI.13}$$

3. Troisième étape : Calcul de la nouvelle vitesse de collision V_f' en prenant en considération la décélération maximale calculée à l'étape 2 et la distance de freinage relevée sur les lieux de l'accident (équation VI.14) :

$$V_f' = \sqrt{V_i^2 - (2.d.\gamma_{max})} \qquad Eq\ \text{VI.14}$$

4. Dans cette dernière étape de la méthodologie, nous évaluons les résultats estimés pour déterminer l'impact du MSC et de l'ABS standard sur les accidents analysés. Les critères suivants ont été établis pour classifier les résultats :

- Accident évité : Si la vitesse finale recalculée (V_f') est égale à zéro ($V_f' = 0$), cela indique que le véhicule aurait pu s'arrêter complètement avant la collision grâce à l'intervention du MSC ou de l'ABS standard. Par conséquent, l'accident est considéré comme évité.
- Accident évité par un ABS standard : Si la vitesse finale recalculée (V_f') n'est pas égale à zéro ($V_f' \neq 0$) mais l'angle d'inclinaison (α) est inférieur à 20 degrés ($\alpha < 20°$), l'accident aurait pu être évité grâce à l'intervention d'un ABS standard, car cela sort du champ de fonctionnement du MSC, qui est utilisé pour des angles de roulis supérieurs à 20°. Cette condition suggère que la situation était contrôlable avec les capacités de freinage offertes par un ABS standard, sans nécessiter les fonctionnalités supplémentaires du MSC.
- Accident atténué : Si la vitesse finale recalculée avec MSC (V_f') est inférieure à la vitesse finale sans intervention ($V_f' < V_f$), l'accident est considéré comme atténué. Cela signifie que, bien que l'accident n'ait pas pu être complètement évité, l'intervention du MSC ou de l'ABS standard a permis de réduire la vitesse d'impact, diminuant ainsi la gravité des conséquences pour le motocycliste.

VI.3 Résultats de l'étude

VI.3.1 Effet du MSC et comparaison avec l'ABS

Le premier résultat que nous avons examiné concernait l'effet de cette technologie sur l'échantillon d'accidents analysés. Les résultats obtenus sont basés sur l'étude de 23 accidents (Figure VI.4).

Le MSC aurait eu une influence remarquable dans 70% des cas (soit 16 accidents), se traduisant par une prévention complète des accidents ou une atténuation de leur gravité. Les résultats détaillés sont les suivants :

- Évitement d'accidents : Le MSC aurait permis d'éviter 13 des 23 accidents, soit 57% des cas. Ce pourcentage élevé illustre l'efficacité du MSC dans la

prévention des accidents dus à une perte de contrôle en virage causée par un freinage inadéquat.

- Atténuation des impacts : Dans 3 des 10 cas restants non évités (soit 13% des 23 cas étudiés), le MSC aurait contribué à atténuer l'impact de l'accident. Cette atténuation se traduit par une réduction de la vitesse du choc et par conséquent de la violence du choc. Cette capacité du MSC à réduire la gravité des accidents souligne son rôle essentiel non seulement dans la prévention, mais aussi dans la réduction des impacts.
- Absence d'effet : Pour 7 des 23 accidents (30%), le MSC n'aurait eu aucun effet. Cette inefficacité relative peut être attribuée à deux facteurs principaux :
  - Prise de risque et excès de vitesse : Certains conducteurs de 2RM adoptent des comportements à haut risque, incluant des vitesses excessivement élevées, rendant l'intervention du MSC insuffisante. Dans ces cas, les limites physiques et dynamiques du véhicule sont dépassées, et même une technologie avancée comme le MSC ne peut compenser les comportements extrêmes.
  - Vulnérabilité intrinsèque des 2RM : La nature même des 2RM, caractérisée par leur faible stabilité et leur exposition aux conditions de la route, les rend particulièrement vulnérables. Même avec des technologies avancées, certains scénarios d'accident ne peuvent être entièrement évités.

La même figure VI.4 montre une comparaison entre le MSC et l'ABS standard sur les 16 cas où il y a un impact positif (évitement ou atténuation). Ce résultat révèle une nette supériorité du MSC en termes d'efficacité. Alors que le MSC a montré une influence positive dans la totalité des 16 cas, l'ABS standard n'a joué un rôle que dans 6 de ces situations. Cette différence importante met en évidence les avancées technologiques et les bénéfices pratiques apportés par le MSC.

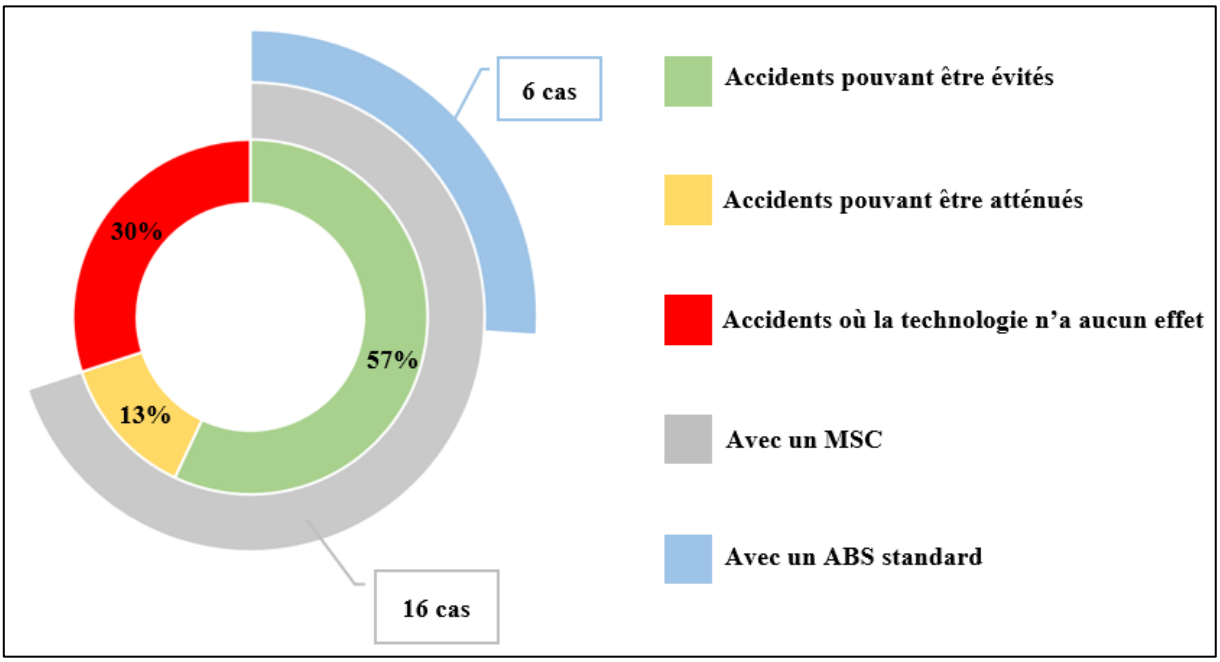


Figure VI. 4. Effet du MSC

Une analyse descriptive des cas où l'ARAS est intervenu (16 cas) permet d'évaluer l'impact de cette technologie sur la vitesse d'impact des accidents étudiés (tableau VI.1). Les valeurs minimales, maximales et médianes de la vitesse d'impact ont été comparées entre les situations avec et sans ARAS. Les résultats montrent que, sans l'ARAS, la vitesse d'impact variait entre 11 km/h et 42 km/h, avec une médiane de 18 km/h. En présence de l'ARAS, ces valeurs sont réduites, avec une vitesse minimale de 0 km/h, une vitesse maximale de 41 km/h et une médiane de 12 km/h. De plus, l'analyse de la variation de la vitesse d'impact met en évidence une réduction allant de 1 km/h à 19 km/h, avec une médiane de 9 km/h, illustrant ainsi l'influence de l'ARAS sur la diminution de la sévérité des collisions.

Tableau VI. 1. Analyse descriptive

	Vitesse d'impact/chute sans ARAS	Vitesse d'impact/chute avec ARAS	Variation de la réduction de la vitesse d'impact
Minimum (km/h)	11	0	1
Maximum (km/h)	42	41	19
Médiane (km/h)	19	12	9

VI.3.2 Analyse selon le type du virage

Dans cette section, nous présentons les résultats de notre analyse sur la répartition des accidents de 2RM en fonction du type de virage, à droite et à gauche (Figure VI.5). L'analyse inclut l'impact de la technologie MSC par rapport à l'ABS standard. Les résultats sont basés sur un échantillon de 23 cas d'accidents.

Sur ces 23 accidents analysés, 13 (environ 57%) se sont produits dans des virages à droite. Parmi ces 13 accidents, le MSC aurait permis d'éviter 8 de ces accidents (environ 62%). Parmi ces 8 accidents évités, 4 auraient également pu être évités par un ABS standard, ce qui

montre une certaine efficacité de l'ABS mais met en évidence l'amélioration apportée par le MSC. Aucun accident n'a été atténué par le MSC dans les virages à droite. Pour 5 des 13 accidents (environ 38%), le MSC n'aurait eu aucun effet, principalement en raison de comportements à haut risque et de vitesses excessives, limitant ainsi l'efficacité de l'intervention technologique.

Les virages à gauche représentent 10 des 23 accidents analysés (environ 43%). Parmi ces 10 accidents, le MSC aurait pu éviter 5 accidents (environ 50%). Parmi ces 5 accidents évités, 2 auraient également pu être évités par un ABS standard. Le MSC aurait pu atténuer l'impact de 3 accidents (environ 30%), réduisant ainsi les conséquences pour les conducteurs et les véhicules. Pour 2 des 10 accidents (environ 20%), le MSC n'aurait eu aucun effet. Cette proportion plus faible par rapport aux virages à droite s'explique par le fait que les motocyclistes bénéficient d'une meilleure visibilité en virage à gauche par rapport aux virages à droite, ce qui leur permet de mieux anticiper la négociation du virage.

Les résultats montrent que le MSC a un impact important sur la sécurité des 2RM, en particulier dans les virages. Dans les virages à droite, où les risques sont souvent plus élevés en raison de la nature des courbes, le MSC démontre une efficacité supérieure. Cependant, l'ABS standard reste pertinent pour prévenir le blocage des roues à des angles de roulis inférieurs à 20°. Les données soulignent également l'importance des technologies avancées comme le MSC pour améliorer la sécurité des 2RM. Toutefois, il est important de sensibiliser les conducteurs aux dangers liés à la prise de risque et à la vitesse excessive, facteurs limitant l'efficacité de ces systèmes.

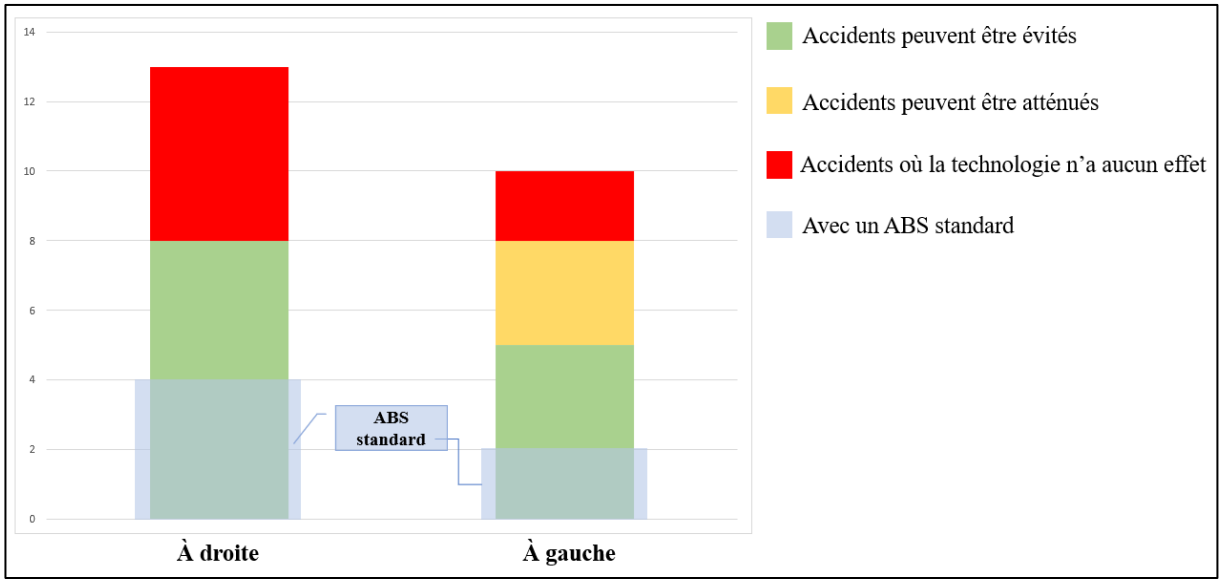


Figure VI. 5. Effets potentiels du MSC en virage à droite et en virage à gauche

VI.4 Discussion et conclusion

Ce chapitre s'est concentré sur l'évaluation de l'impact MSC sur la sécurité des motocyclistes, en particulier dans les scénarios d'accidents impliquant une perte de contrôle en virage due à une manœuvre de freinage inadéquate. L'objectif principal était d'analyser comment le MSC contribue à prévenir ou à atténuer ces types spécifiques d'accidents, en comparant son efficacité avec celle de l'ABS standard et en évaluant ses implications pour la sécurité des motocyclistes.

La méthodologie suivie dans cette étude a consisté en l'analyse approfondie de 23 cas d'accidents réels impliquant des motocyclistes, sélectionnés pour leur pertinence spécifique comme pertes de contrôle en virage causées par un freinage inapproprié. Chaque accident a été reconstruit à partir des rapports d'accidents et des données disponibles, permettant une évaluation de l'effet du MSC dans ces situations critiques. Les avantages de cette méthodologie incluent sa capacité à quantifier de manière précise les effets du MSC. Les calculs basés sur les principes de la dynamique des véhicules permettent de simuler des conditions réalistes et d'évaluer l'efficacité du MSC dans des situations où la perte de contrôle est courante. Cependant, une des limitations de cette méthodologie pourrait résider dans la simplification des conditions réelles de terrain, notamment en ne prenant pas en compte toutes les variables externes qui pourraient influencer le comportement du véhicule et du motocycliste.

L'analyse globale des résultats montre que le MSC aurait eu un impact notable sur la prévention et l'atténuation des accidents de motocyclistes. Environ 70% des accidents analysés auraient bénéficié de l'intervention du MSC, se traduisant par un évitement complet ou une réduction de la gravité de l'accident, comme l'indique l'analyse descriptive des vitesses d'impact avec et sans ARAS. En effet cette analyse met en évidence une différence entre les médianes des vitesses d'impact : 12 km/h avec ARAS contre 18 km/h sans assistance. Cette diminution de la médiane de 6 km/h souligne l'efficacité du MSC et de l'ABS dans la gestion du freinage en courbe. La réduction maximale observée atteint 19 km/h, ce qui montre que, dans certains cas, le MSC permet une réduction plus importante. Comparé à l'ABS standard, le MSC a démontré une efficacité supérieure. L'une des principales améliorations du MSC par rapport à l'ABS standard réside dans sa capacité à ajuster la pression de freinage en fonction de l'angle de roulis. Cette fonctionnalité permet de maintenir la stabilité et le contrôle du véhicule lors de manœuvres de freinage en courbe, une situation où l'ABS standard peut parfois être insuffisant dans des angles de roulis supérieur à 20°. En prenant en compte l'angle de roulis, le MSC optimise la répartition des forces de freinage entre les roues avant et arrière, réduisant ainsi le risque de perte de contrôle et d'accident. Ces résultats s'inscrivent dans la continuité des tendances observées dans la littérature sur les systèmes d'assistance au freinage, qui démontrent généralement une réduction des vitesses d'impact et, par conséquent, une diminution de la gravité des blessures.

Comparé à la littérature existante, il est notable que plusieurs études antérieures, telles que celles de Lich et al. (2016), Sevarin et al. (2018), et Lucci et al. (2022), ont mis en évidence un impact positif du système MSC sur les accidents de motocyclistes en virage. Lich et al.

(2016) et Sevarin et al. (2018) ont estimé que le MSC pourrait influencer jusqu'à environ 30% des accidents de motocyclistes en virage, tandis que Lucci et al. (2022) ont rapporté un impact encore plus élevé, atteignant jusqu'à 60%. Une similitude observée dans ces études réside dans l'effet bénéfique du MSC sur les accidents de virages des motocyclistes, une catégorie où les accidents sont moins fréquents mais souvent plus graves en termes de blessures et de tués. Cependant, il est important de noter que les estimations d'efficacité varient d'une étude à l'autre. Cette variabilité peut s'expliquer par les différences dans les types d'accidents sélectionnés pour l'analyse. Par exemple, Lich et al. (2016) et Sevarin et al. (2018) se sont concentrés sur les accidents en virage de manière générale, tandis que notre étude s'est spécifiquement focalisée sur les accidents de type perte de contrôle en virage causée par une manœuvre de freinage inadéquate. Cette sélection spécifique de scénarios d'accidents dans notre étude a permis d'évaluer directement l'efficacité du MSC dans des situations où le motocycliste est engagé dans une manœuvre de freinage critique en virage. Cependant, cette approche a également limité le nombre d'accidents analysés, ce qui représente une contrainte méthodologique. Une plus grande diversité d'accidents aurait pu fournir une vue plus exhaustive de l'efficacité du MSC dans divers contextes de conduite.

Les résultats montrent des différences subtiles entre les accidents survenant dans des virages à droite et à gauche. Bien que les motocyclistes aient une meilleure visibilité et donc une capacité potentielle de négociation plus sûre des virages à gauche, le MSC a montré une efficacité similaire dans les deux types de virages. Cependant, il est intéressant de noter que dans les virages à droite, où les risques sont souvent plus élevés, le MSC a été légèrement plus efficace, évitant un pourcentage légèrement plus élevé d'accidents. À noter que ce résultat repose sur un très faible échantillon, ce qui représente une limite à l’étude.

En conclusion, cette étude confirme l'importance croissante du MSC comme une technologie pertinente pour améliorer la sécurité des motocyclistes. Les résultats montrent non seulement l'efficacité du MSC dans la prévention des accidents en virage, mais aussi son potentiel à réduire la gravité des blessures en cas d'accident. Cependant, il est essentiel de continuer à sensibiliser les motocyclistes aux dangers associés à la prise de risques excessifs et à l'excès de vitesse, qui peuvent compromettre même les technologies de sécurité avancées comme le MSC. Les recherches futures devraient également explorer d'autres variables et contextes d'accidents pour améliorer notre compréhension et renforcer les mesures de sécurité pour tous les motocyclistes.

Chapitre VII

Analyse de la technologie de détection de collision pour les 2RM

Sommaire

Chapitre VII

Analyse de la technologie de détection de collision pour les 2RM

VII.1 Revue de littérature 150

VII.2 Matériel et méthodes 154

VII.2.1 Sélection et préparation des données 155

VII.2.2 Méthodologie de simulation du fonctionnement du système d'alertes aux collisions 155

VII.3 Résultats de l'étude 157

VII.3.1 Données globales 157

VII.3.2 En agglomération 159

VII.3.3 Hors agglomération 161

VII.4 Discussions 164

VII.5 Conclusion 167

Ce chapitre se concentre sur l'analyse d'un système d'ARAS destiné à détecter l'approche des véhicules adverses, et par conséquent à identifier les risques de collision.

Dans cette étude, des cas d'accidents réels issus des bases de données EDA et IGLAD ont été minutieusement analysés. L'objectif était de fournir des recommandations techniques pour le développement de cette technologie. Une méthodologie spécifique de reconstitution et d'analyse des accidents a été élaborée, permettant d'examiner simultanément l'approche de tous les véhicules impliqués dans ces accidents. Cette approche a permis de dégager des recommandations en termes de distances optimales et de positions critiques des véhicules adverses à l'approche de la collision.

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord une revue de la littérature, qui recense des études sur les technologies de détection de collision et de surveillance des angles morts pour les 2RM et des recherches sur les temps de réaction des motocyclistes. La deuxième partie présente les méthodes, décrivant la sélection des accidents et la méthodologie adoptée pour leur analyse. Les résultats de cette étude sont ensuite exposés, avec une distinction claire entre les accidents en agglomération et hors agglomération. Enfin, une discussion approfondie des résultats est proposée, accompagnée de recommandations techniques pour améliorer la sécurité des usagers de 2RM.

VII.1 Revue de littérature

L'étude présentée par Zadry et al. (2022) explore l'augmentation du nombre de véhicules motorisés en Indonésie et son impact sur la hausse des accidents de la route. Elle souligne l'importance des efforts de prévention pour réduire les accidents et les pertes associées. L'étude identifie plusieurs facteurs contributifs aux accidents de la route, notamment des facteurs humains, des facteurs liés aux installations, des facteurs infrastructurels, des facteurs environnementaux... Mais surtout les auteurs proposent des mesures de réduction et des recommandations pour diminuer le nombre d'accidents, notamment l'identification des angles morts comme cause fréquente d'accidents latéraux. Elle met en avant l'utilité des technologies de détection et de visualisation des angles morts (BSD- Blind Spot Detection/BSV-Blind Spot Visualisation), qui permettraient une détection précoce des collisions potentielles avec des motocyclistes. Selon les prévisions, l'adoption généralisée de cette technologie pourrait éviter 37% des collisions.

Zaman et al. (2020) ont évalué comment les conducteurs en Malaisie perçoivent et gèrent les risques liés aux angles morts des véhicules, spécifiquement en ce qui concerne la sécurité des motocyclistes. Les auteurs ont interrogé 397 répondants répartis en trois groupes : automobilistes, motocyclistes et conducteurs à la fois de voitures et de motos. Les participants ont répondu à 21 questions portant sur leur sensibilisation aux angles morts, les difficultés de conduite associées, les types d'accidents impliquant des motocyclistes et leur perception des comportements des autres usagers de la route. Les résultats indiquent que 98,2% des répondants sont conscients des angles morts, mais 43% rencontrent des difficultés de conduite à cause de

ceux-ci. 75% des accidents ou quasi-accidents impliquant des motocyclistes sont attribués aux angles morts, principalement des collisions latérales (63%). Les automobilistes sont souvent perçus comme responsables des accidents par les motocyclistes et les conducteurs des deux types de véhicules. Enfin, une forte majorité (89%) des répondants estiment que l'intégration de technologies peut réduire les accidents de la route, avec un accent sur les solutions technologiques abordables pour améliorer la sécurité des motocyclistes en Malaisie.

Teoh (2018) examine l'impact potentiel de trois technologies de prévention des collisions sur les véhicules de tourisme pour réduire les accidents impliquant des motos. L'objectif principal est de quantifier les accidents de moto qui pourraient être évités grâce à la prévention des collisions frontales, au maintien de voie et à la détection des angles morts. Les données d'accidents survenus entre 2011 et 2015 ont été extraites des bases de données FARS (Fatality Analysis Reporting System) et NASS-GES (National Automotive Sampling System – General Estimates System), et les accidents impliquant des motos et des véhicules de tourisme ont été classés par type et pertinence par rapport aux technologies étudiées. Les résultats montrent que la détection des angles morts pourrait prévenir environ 1% des accidents mortels impliquant deux véhicules, 6% des accidents avec blessures non mortelles, et 6% des accidents signalés à la police. Bien que ces technologies puissent éviter jusqu'à 10% des accidents de motos signalés à la police lorsqu'elles sont combinées, elles ne représentent qu'une petite fraction de tous les accidents de motos. La prévention des collisions frontales et le maintien de voie présentent un potentiel similaire, soulignant la nécessité d'améliorer la détection des motos par ces systèmes. Ces résultats mettent en évidence l'importance d'une technologie de détection améliorée pour la sécurité des motocyclistes et le besoin de contre-mesures supplémentaires, telles que le port du casque.

L'étude menée par Song et al. (2017) vise à évaluer l'acceptation et l'efficacité des prototypes de systèmes d'alerte de collision (CWS-Crash Warning System) pour les 2RM, en se basant sur la technologie des véhicules connectés (CVT-Connected Vehicle Technologie), avec un accent particulier sur leur impact potentiel sur la prévention des accidents. L'objectif principal était de déterminer comment les motards perçoivent et utilisent les différents types de CWS lors de simulations de scénarios réalistes, en analysant spécifiquement leur capacité à réduire les risques d'accident. La méthodologie de l'étude comprend l'évaluation de quatre prototypes de CWS, utilisant des modes d'avertissement visuel, auditif et haptique. Les participants ont été soumis à des situations simulées représentant des scénarios d'accidents courants, avec différents prototypes de CWS. Des caméras de mouvement ont été utilisées pour enregistrer les réactions des participants en situation de conduite, avec des tests réalisés à une vitesse de 40 km/h. Différents types de 2RM (sport, cruiser, touring) ont été utilisés, avec la mise en œuvre d'un protocole expérimental mixte, incluant des questionnaires pré- et post-essai pour évaluer l'acceptation des motards. L'analyse des données a inclus des tests statistiques tels que l'ANOVA et le test de Friedman/Wilcoxon pour évaluer les différences de performance entre les interfaces. Les résultats indiquent une réception positive des motards envers les CWS testés, avec une préférence marquée pour les systèmes combinant alertes auditives et haptiques. Ces systèmes ont été jugés efficaces pour attirer l'attention des motards sans provoquer de distraction visuelle excessive. En particulier, les alertes auditives intégrées dans le casque ont été appréciées pour leur capacité à transmettre des informations directionnelles claires, tandis

que les alertes haptiques ont été saluées pour leur réponse rapide et leur non-interférence avec la vision du motard.

Certaines études se sont concentrées sur la détection des motocyclistes par les automobilistes dans les angles morts. Pour ce type d'accident avec non détection d'un véhicule dans un angle mort, des technologies ont été développées principalement pour les voitures. Bien que notre étude se concentre sur les technologies conçues spécifiquement pour les 2M, nous avons accordé une attention particulière aux travaux traitant de la détection des motos par les automobiles, reconnaissant leur importance dans l'amélioration de la sécurité routière. L'étude menée par Farooq et al., (2019) explore les facteurs contribuant à la visibilité réduite des motocyclistes du point de vue des conducteurs de voitures lors des accidents voiture-moto, en mettant l'accent sur l'impact des angles morts. Les accidents survenus dans des zones urbaines entre 2011 et 2014 ont été analysés, et ont été classés en six types dominants. 25 accidents représentatifs ont été simulés avec le logiciel Virtual Crash pour évaluer les facteurs de visibilité. Les résultats montrent que les obstructions de vue, les angles morts et la vitesse élevée réduisent notablement la visibilité des motocyclistes. Les obstructions de vue (stationnaires et mobiles) ont été identifiées comme facteurs contribuant respectivement à 28% et 24% des accidents. Les angles morts étaient responsables de 36% des cas d'accidents analysés. La simulation a également révélé que la majorité des conducteurs de voitures n'ont pas effectué de manœuvres d'évitement en raison de ces problèmes de visibilité. Ces résultats soulignent l'importance des systèmes de détection d'angles morts, qui pourraient avertir les conducteurs de la présence des motocyclistes dans les zones invisibles, améliorant ainsi la sécurité routière. Les systèmes proposés incluent des capteurs embarqués et la communication véhicule à véhicule, pouvant alerter les conducteurs des véhicules environnants et ainsi réduire le risque de collisions.

D'autres auteurs ont travaillé sur le temps de réaction des conducteurs de 2RM dans le but d'engager une manœuvre d'évitement dans les situations d'urgences. Davoodi et al. (2012) ont mené une étude sur l'évaluation du temps de réaction des motards (PRT- Perception Response Time) dans des situations de distance d'arrêt sécurisée (SSD - Safe Stopping sight Distance) afin d'améliorer la sécurité des voies exclusives pour motos. Deux expériences distinctes ont été conduites pour mesurer le PRT. La première a impliqué 89 motards répartis en deux groupes d'âge, évaluant leur réaction à un signal lumineux anticipé. Les résultats ont révélé un PRT moyen de 0,68 s, avec un 85e percentile à 1 s, indiquant que la plupart des motards pouvaient réagir rapidement dans ces conditions prévisibles. La deuxième expérience a porté sur 16 motards confrontés à un obstacle inattendu, montrant un PRT moyen de 1,29 s et un 85e percentile à 2,12 s. Ces résultats suggèrent que la majorité des motards peuvent répondre efficacement à des situations d'arrêt d'urgence en moins de 2,5 s. Les mêmes auteurs ont mené une autre étude qui vise à évaluer les PRT de base des motocyclistes dans des situations de collision arrière. Cinquante-neuf participants, divisés en deux groupes d'âge (16-30 ans et 50-60 ans), ont été observés alors qu'ils attendaient l'activation des feux stop d'une voiture stationnée devant eux. Les PRT des motocyclistes ont été enregistrés à partir de caméras vidéo lorsqu'ils actionnaient leurs freins immédiatement après l'activation des feux de la voiture. Les résultats montrent un PRT moyen de 0,44 s, avec une faible variation selon l'âge et le genre des participants. Les différences entre les jeunes et les plus âgés ainsi qu'entre les hommes et les femmes n'étaient pas significatives. Cette étude suggère que l'utilisation de feux de freinage plus puissants sur les motos pourrait être efficace pour prévenir les collisions arrière, en

adaptant les infrastructures de trafic aux PRT des conducteurs de voitures particulières pour assurer la sécurité des motocyclistes.

L'étude intitulée "Time and Distance Required for a Motorcycle to Turn Away from an Obstacle" de Bartlett et al. (2014) examine les capacités d'évitement des motocyclistes face à des obstacles, en se concentrant sur le temps et la distance longitudinale nécessaires pour effectuer une déviation latérale. L'objectif de cette étude est d'analyser et de quantifier ces paramètres. La méthodologie a impliqué des tests avec quatre motocyclistes expérimentés sur quatre motos différentes, effectuant une déviation de 2 m à gauche à des vitesses variant entre 40 et 88 km/h après avoir passé un portail. Les résultats montrent une grande variabilité dans les performances individuelles, même parmi des pilotes qualifiés, ce qui met en évidence l'importance du facteur humain. Le temps de réaction, séparé de l'analyse du mouvement d'évitement proprement dit, a été une source de variation remarquable. Les données empiriques recueillies indiquent que les motocyclistes les plus qualifiés peuvent réaliser ces manœuvres en moins de 1 s, une valeur inférieure aux estimations précédentes suggérant des temps de 1,15 s à 1,36 s pour des manœuvres similaires.

Wong et al. (2022) ont mené une étude qui vise à analyser les temps de réaction (RT-Reaction Times) des motocyclistes face à des situations de danger, en particulier lors de manœuvres d'évitement. L'objectif principal est de mieux comprendre les variations des temps de réaction en fonction de la nature des scénarios de danger et de la réponse des motocyclistes. La méthodologie adoptée implique des tests de manœuvre d'évitement sur différents types de motos à des vitesses variées, en mesurant les temps de réaction totaux ainsi que les temps spécifiques à chaque phase du mouvement. Les résultats montrent que les temps de réaction totaux étaient plus rapides pour les scénarios d'apparition brutale des dangers comparés aux scénarios d'apparition progressive. Cette rapidité dans les scénarios brusques semble être due à une attention accrue captée par le danger soudain et à un champ visuel plus restreint, facilitant une réponse plus rapide. Les temps de réaction moyens observés dans les tests de manœuvre d'évitement à une distance latérale de 2 m étaient d'environ 1 s, ce qui est cohérent avec des études antérieures, mais inférieur aux valeurs plus élevées trouvées dans d'autres recherches, suggérant une variabilité importante selon le niveau de compétence et la motivation des pilotes.

Dans une autre étude menée par Bougard et al. (2021) l'objectif était d'analyser l'impact de la privation de sommeil et de l'heure de la journée sur les performances de motocyclistes, en se concentrant spécifiquement sur les manœuvres d'évitement d'accidents telles que le freinage d'urgence et l'évitement d'obstacles. La méthodologie employée impliquait l'utilisation d'un simulateur dynamique pour évaluer les réactions des participants lors de manœuvres à différentes vitesses (20 km/h et 40 km/h) et à divers moments de la journée (06:00, 10:00, 14:00, 18:00), après une nuit de sommeil normal et une nuit sans sommeil. Les résultats ont montré que la privation de sommeil affectait les temps de réaction, notamment à 40 km/h où les temps de réaction après une nuit sans sommeil étaient plus lents (0.62 s contre 0.39 s à 20 km/h). De plus, les temps de réaction variaient également selon l'heure de la journée, avec des réactions plus lentes observées tôt le matin (06:00) par rapport aux autres moments de la journée, en particulier à 40 km/h. En termes de distances d'arrêt, celles-ci augmentaient avec la vitesse et étaient également plus longues après une nuit sans sommeil. Cependant, les performances de manœuvre d'évitement, bien que globalement inchangées par la privation de

sommeil, montraient des réactions plus lentes le matin à 40 km/h, ce qui confirmait la fluctuation diurne de l'attention.

Ce début de chapitre a passé en revue diverses études explorant l'effet des technologies de détection de collision sur la réduction des accidents impliquant des 2RM. Les études présentées permettent de cerner les effets apportés par ces technologies sur la sécurité des usagers de 2RM. Les travaux de Zadry et al., Zaman et al., Teoh, et Song et al. ont montré que des systèmes comme la détection des angles morts (BSD/BSV) et les systèmes d'alerte de collision (CWS) peuvent réduire les collisions, bien que leur efficacité reste partielle. Des recherches sur les temps de réaction des motards, notamment celles de Davoodi et al., Bartlett et al., et Wong et al., ont révélé des temps de réponse variés face à des situations d'urgence, allant de 0,44 s à plus de 2 s selon les conditions et l'expérience des conducteurs. Farooq et al. ont souligné l'importance des systèmes de détection des angles morts pour améliorer la visibilité des motocyclistes par les automobilistes. Malgré ces avancées, il existe un manque d'études proposant des recommandations techniques sur des aspects essentiels tels que la distance optimale de détection, les positions d'approche des véhicules par rapport aux 2RM en conduite, et les différences entre les accidents en milieu urbain et hors urbain. L'objectif de cette étude est donc de combler ces lacunes, en fournissant des orientations techniques spécifiques.

À l'heure actuelle, aucune étude n'a fourni des recommandations techniques spécifiques aux constructeurs concernant la conception des systèmes de détection de collision pour les 2RM. Cette absence de directives dans la littérature scientifique souligne un besoin important de recherches approfondies pour développer des technologies de sécurité plus efficaces pour ces usagers vulnérables de la route. Les technologies de détection et d'alerte de collision représentent une avancée importante dans l'amélioration de la sécurité routière pour les 2RM, comme le montrent plusieurs études. D'autres études ont souligné l'importance de prendre en compte les temps de réaction des motards dans la conception de ces systèmes. Par exemple, Davoodi et al. (2012) ont montré que le temps moyen de réaction des motards pour engager une manœuvre d'évitement dans des situations d'urgence est d'environ 1 s. Ce temps de réaction, couplé à la distance de freinage nécessaire, doit être un facteur important dans la définition de la portée des systèmes de détection.

VII.2 Matériel et méthodes

Pour atteindre les deux objectifs de ce chapitre -analyser de la distance et la position des véhicules adverses par rapport aux 2RM en situation d’accident - nous avons adopté une méthodologie d’analyse des accidents réels impliquant un 2RM. Cette approche s’appuie sur la reconstitution cinématique des accidents (voir III.1.2).

Notre démarche s'est déroulée en deux étapes principales :

- Sélection des cas d'accidents : Nous avons constitué un échantillon d'analyse en puisant dans les bases de données EDA et IGLAD.

- Reconstitution : Chaque accident a été reconstitué en détail pour déterminer le continuum spatio-temporel des véhicules impliqués. Cette reconstitution permet une analyse précise de la distance et de la position des véhicules adverses par rapport au 2RM tout au long de la séquence accidentelle.

VII.2.1 Sélection et préparation des données

Dans le cadre de notre étude, un processus méthodique a été suivi pour sélectionner les accidents pertinents à analyser parmi les 390 cas d'accidents de 2RM inclus dans les bases de données EDA et IGLAD. Dans un premier temps, nous avons exclu tous les accidents où le 2RM était seul impliqué, soit 125 cas. Ainsi, nous avons réduit notre échantillon à 265 cas d'accidents impliquant au moins un autre véhicule.

Ensuite, parmi ces 265 cas restants, nous nous sommes concentrés sur les accidents pour lesquels la technologie de détection des collisions (CAT) pourrait potentiellement intervenir, tels qu'analysés dans le cadre de l'étude qualitative présentée dans le chapitre IV. Cela signifie que nous avons éliminé tous les cas où le véhicule adverse était caché par un obstacle tel qu'une habitation, un arbre, etc., car ces scénarios ne permettent pas une détection précoce par la technologie du CAT.

En outre, nous avons également pris en compte la disponibilité des données nécessaires pour effectuer une reconstitution cinématique précise de l'accident. Pour chaque cas retenu, il était essentiel d'avoir suffisamment d'informations sur les positions initiales et finales des véhicules, les plans de l'accident, ainsi que d'autres détails contextuels pertinents.

Après avoir appliqué ces critères de sélection, nous avons obtenu un échantillon final de 90 cas d'accidents à analyser. Ce processus de sélection nous assure de travailler avec un ensemble de données utilisable pour nos objectifs d'analyse et de recommandation technique.

VII.2.2 Méthodologie de simulation du fonctionnement du système d'alertes aux collisions

La méthodologie développée pour analyser le fonctionnement de la technologie CAT sur les accidents impliquant un 2RM repose sur le principe de la simulation de l'approche de chaque véhicule adverse par rapport à la moto. L'objectif principal de cette méthodologie est de tracer simultanément la trajectoire d'approche de tous les véhicules adverses dans les 90 cas d'accidents sélectionnés par rapport au 2RM, durant la phase de pré-collision. Cette approche permet d'analyser en détail la distance et la position des véhicules adverses par rapport au 2RM à différents instants avant la collision.

Pour accomplir cet objectif, un processus de changement de repère a été suivi. Ce processus comprend plusieurs étapes :

❖ Étape 1 : Reconstitution des trajectoires

Dans un premier temps, nous avons utilisé les données de reconstitution de chaque accident pour simuler les trajectoires des véhicules impliqués, le 2RM et les véhicules adverses. Cette reconstitution a été réalisée à partir des positions initiales et finales des véhicules, des plans d'accident et des informations contextuelles détaillées fournies par les bases de données EDA et IGLAD (voir section III.1.1). Les trajectoires ont été modélisées pour représenter fidèlement les mouvements des véhicules jusqu'au point de collision.

❖ Étape 2 : Changement de repère

Ensuite, nous avons procédé à un changement de repère pour analyser les trajectoires des véhicules adverses par rapport au 2RM. Ce changement de repère est nécessaire pour permettre une analyse précise de l'approche des véhicules adverses. Le repère de base de chaque accident, désigné comme R_0, a été transformé en un nouveau repère centré sur le 2RM, désigné comme R_1 (Figure VII.1). Ce changement de repère a été effectué à des instants spécifiques avant la collision : de -5 s à -0,5 s avec un pas de 0,5 s. En repositionnant le repère sur le 2RM, nous avons pu suivre de manière cohérente la trajectoire de chaque véhicule adverse en relation directe avec le 2RM.

❖ Étape 3 : Analyse des distances et angles

La dernière étape de ce processus consiste à mesurer la distance (r) et l'angle (θ) des véhicules adverses par rapport au 2RM à chaque instant précité. Pour chaque cas d'accident, les distances ainsi que les angles d'approche ont été relevés. Ces mesures permettent de déterminer les paramètres critiques qui influencent la performance de la technologie CAT dans la détection précoce des collisions. En effectuant ces relevés à des intervalles réguliers avant la collision, nous pouvons analyser comment les technologies de CAT pourraient intervenir pour prévenir l'accident

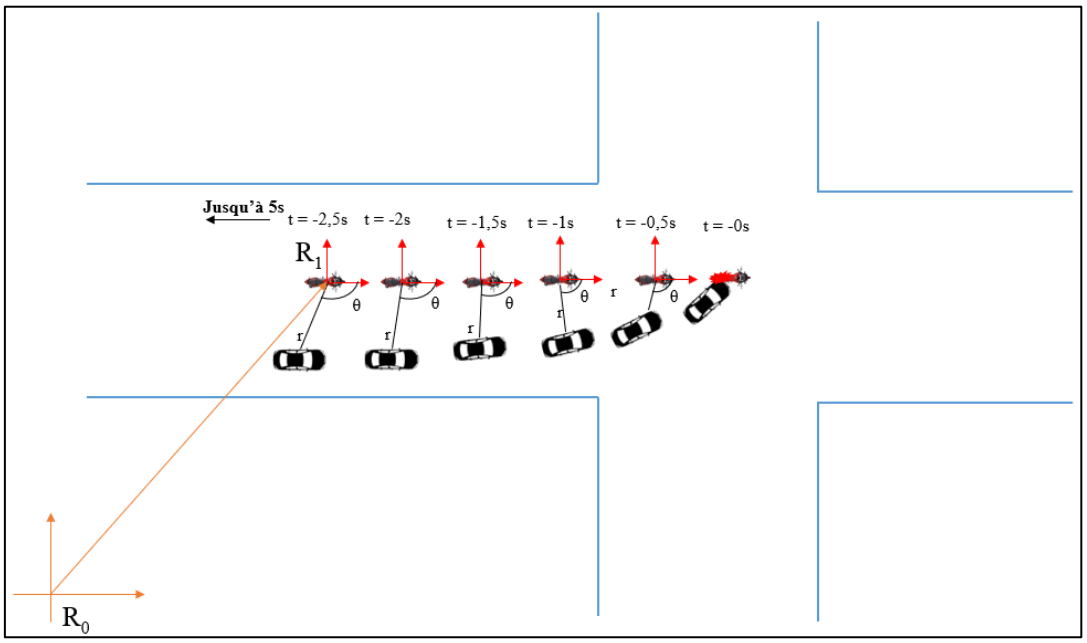


Figure VII. 1. Méthodologie de changement de repère pour les reconstitutions des accidents

VII.3 Résultats de l'étude

Les résultats obtenus dans cette étude corroborent les analyses statistiques présentées au chapitre I. En effet, dans l'échantillon de 90 cas d'accidents, il a été identifié que 55 cas (61%) représentent des accidents survenus en agglomération, et 35 cas (39%) en dehors des agglomérations. Dans le but de mieux comprendre les résultats obtenus, ils ont été répartis en trois sections différentes, chacune correspondant à un échantillon de données spécifique.

VII.3.1 Données globales

L'analyse de la technologie du CAT pour l'ensemble des 90 cas d'accidents a permis de déterminer la répartition des distances d'approche des véhicules adverses ainsi que leurs positions par rapport aux 2RM à différents moments avant la collision.

L'évolution des distances entre le 2RM et les véhicules adverses met en évidence une tendance claire (Figure VII.2) : plus l'impact approche, plus ces distances diminuent. Entre 5 s et 3,5 s avant l'impact, la majorité des véhicules adverses (plus de 50%) se trouvent à une distance égale ou supérieure à 50 m. Cependant, à partir de 3 s avant la collision, cette proportion diminue fortement, et les véhicules se rapprochent progressivement du 2RM. Dès 2,5 s avant l'impact, la majorité des véhicules adverses (30%) se situent entre 30 m et 40 m. En outre, nous remarquons aussi qu'une grande partie des véhicules se trouve dans un intervalle de 20 m à 40 m lors des instants compris entre 2,5 s et 1,5 s avant l'impact. Cette tendance se poursuit, et à 1,5 s avant la collision, seuls 23% des véhicules sont encore à plus de 30 m.

Dans les toutes dernières secondes avant l'impact, la concentration des véhicules à faible distance devient plus marquée : à 1 s, 54% des véhicules sont situés entre 10 m et 20 m, et à 0,5 s, 66% sont à moins de 10 m du 2RM.

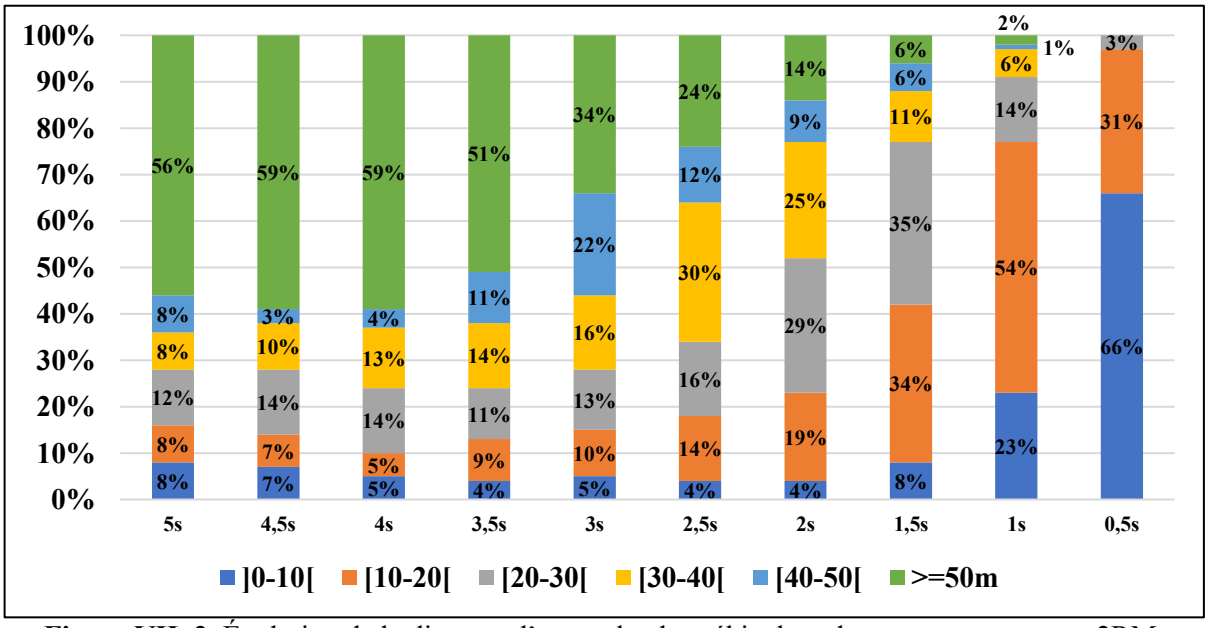


Figure VII. 2. Évolution de la distance d'approche des véhicules adverses par rapport au 2RM. Données globales = 90 cas.

Par ailleurs l'évolution de la position des véhicules adverses par rapport au 2RM révèle des tendances marquées (Figure VII.3). Il est important de préciser qu'à chaque instant, la taille des cercles varie. En effet, à mesure que l'instant d'impact approche, les véhicules adverses se rapprochent. Les cercles sont donc agrandis progressivement afin d'assurer une visualisation claire. L'analyse de ces résultats montrent que, même à défaut qu'on est loin du moment d'impact, presque la moitié des véhicules adverses (48%) se trouvent dans un angle étroit directement devant le 2RM, soit entre -5° et 5°. En dehors de cette zone, la majorité des véhicules sont positionnés davantage sur le côté droit (20%) que sur le côté gauche (12%).

À mesure que la collision approche, cette répartition reste globalement stable, avec une concentration des véhicules à l'avant du 2RM variant entre 40% et 50%. De même, les véhicules situés sur les côtés droit et gauche devant le 2RM conservent la même tendance observée : la proportion de véhicules à droite est supérieure de 5% à 10% par rapport à celle à gauche.

Par ailleurs nous remarquons aussi qu'il existe un pourcentage de véhicule adverse qui se situe à l'arrière de la moto. La majorité d'entre eux se trouvent dans la zone comprise entre 175° et 185°, avec une proportion initiale de 12%, qui diminue progressivement pour atteindre seulement 2% juste avant l'impact. De plus, une présence stable de véhicules est observée sur le côté arrière gauche, avec un taux avoisinant 5% jusqu'à l'impact. En revanche, la zone arrière droite est quasiment vide de tout véhicule, à l'exception d'un faible pourcentage (1%) observé 1,5 s avant la collision.

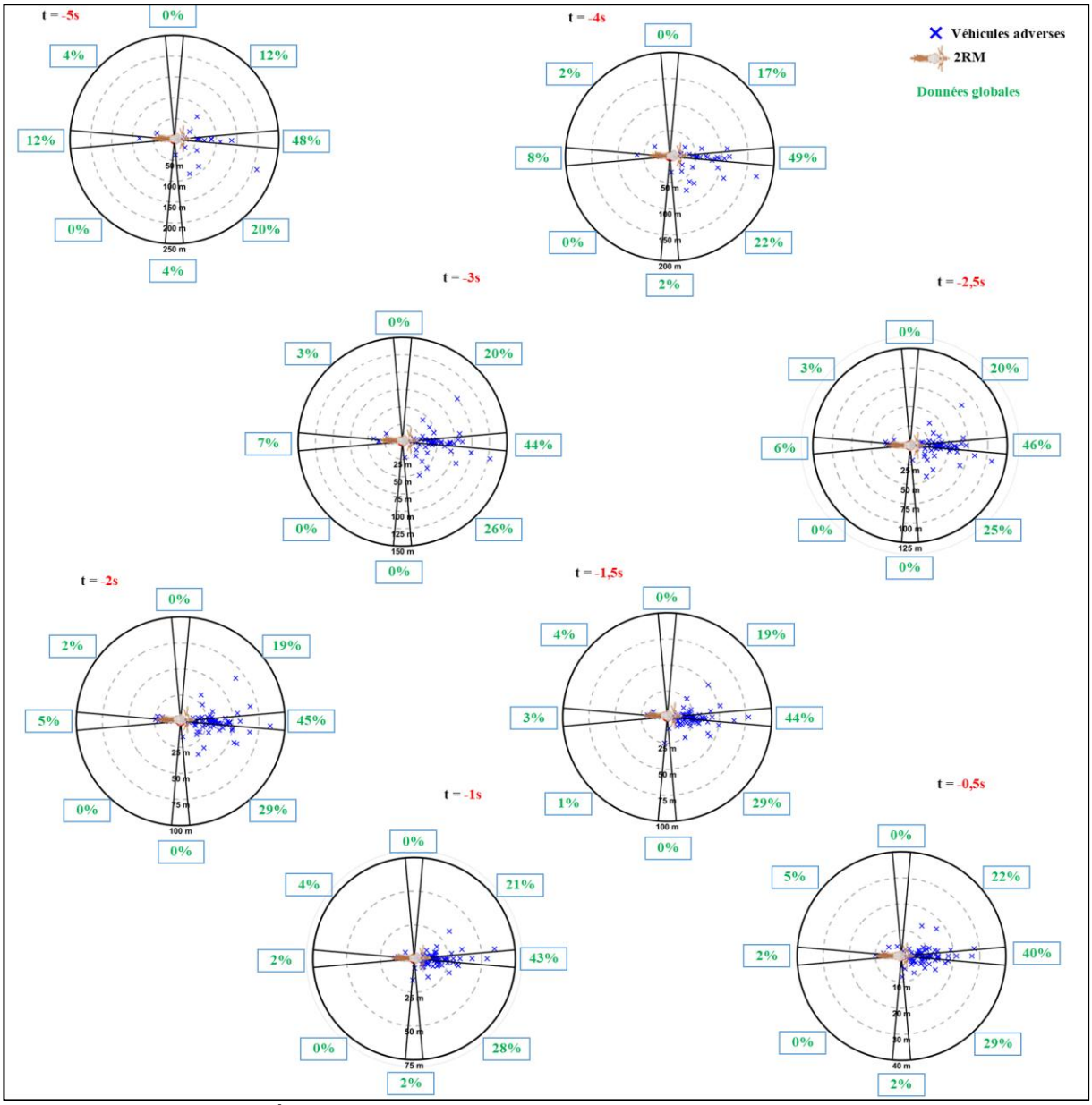


Figure VII. 3. Évolution de la position des véhicules adverses par rapport au 2RM.
Données globales = 90 cas

VII.3.2 En agglomération

Sur la base des 55 cas d'accidents analysés en agglomération, les résultats obtenus suivent globalement la même tendance que ceux observés sur l'ensemble des données, avec toutefois quelques différences notables (Figure VII.4). Pour ce type d'accidents, il faut remonter jusqu'à 4 s avant l'impact, voire plus, pour observer environ la moitié des véhicules adverses à des distances égales ou supérieures à 50 m : 48% à 4 s et 53% entre 4,5 s et 5 s avant l'impact. En examinant les autres distances, certaines divergences apparaissent par rapport aux données globales. Par exemple, 18% des véhicules adverses se situent entre 10 m et 20 m à 5 s avant l'impact, contre 13% sur l'ensemble des données. Cette différence reste relativement stable entre 5 s et 4 s avant l'impact, puis elle se réduit progressivement entre 3,5 s et 1,5 s, avant de connaître une hausse entre 1 s et 0,5 s avant l'impact.

Une autre distinction concerne les distances comprises entre 20 m et 30 m. Entre 5 s et 3 s avant l'impact, l'évolution du pourcentage de véhicules dans cet intervalle est similaire à celle observée sur les données globales. Toutefois, à partir de 2,5 s avant l'impact, les pourcentages deviennent plus élevés en agglomération.

Les derniers instants avant l'impact, plus exactement à 1 s, montre qu'aucune voiture ne se trouve à plus de 40 m, contrairement aux résultats globaux. De plus, les distances comprises entre 20 m et 40 m présentent des proportions plus faibles en agglomération (11% contre 20%). Enfin, à 0,5 s avant l'impact, une différence marquée apparaît sur les distances inférieures à 10 m, avec 76% des véhicules adverses dans cet intervalle contre 66% pour l'ensemble des données.

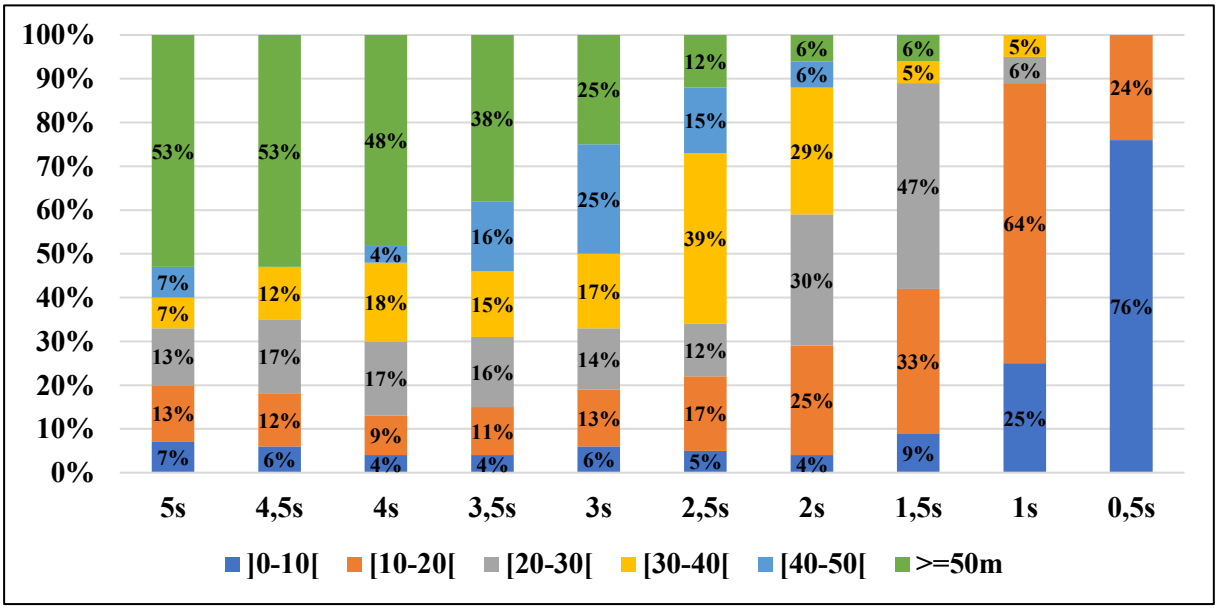


Figure VII. 4. Évolution de la distance d'approche des véhicules adverses par rapport au 2RM. Données en agglomération = 55 cas.

L'analyse de l'évolution des positions des véhicules adverses par rapport au 2RM pour les données en agglomération met en évidence une concentration importante de véhicules devant le 2RM (dans l'intervalle de -5° à 5°), comprise entre 42% et 53% et ce, durant toute la reconstitution (Figure VII.5). Les chiffres montrent que l'écart avec l'analyse des données globales reste stable, autour de 5%, avec une légère supériorité pour les données en agglomération. En examinant la zone située devant à droite du 2RM, on observe une différence d'environ 10% entre les instants 5 s et 4 s avant l'impact. Cependant, à partir de 3 s avant l'impact, cette différence se réduit progressivement et ne dépasse pas 4%.

Du côté gauche devant la moto, une différence d'environ 10% est observée entre les données issues en agglomération et les données globales. Toutefois, dès 3 s avant l'impact, cet écart se rétrécie et il reste relativement stable tout au long de la reconstitution jusqu'à 0,5 s, avec une légère supériorité pour les données en agglomération.

Les résultats concernant la présence de véhicules à l'arrière de la moto pour les données en agglomération suivent globalement la même tendance que les données globales. Une présence de véhicules adverses est observée sur les côtés arrière (entre 175° et -175°) ainsi qu'à l'arrière gauche (entre 95° et 175°). L'écart entre les données en agglomération et les données globales ne dépasse pas 5%, avec une légère supériorité pour ces dernières. Enfin, il est à noter qu'aucun véhicule n'a été observé sur le côté arrière droit de la moto durant toute la reconstitution.

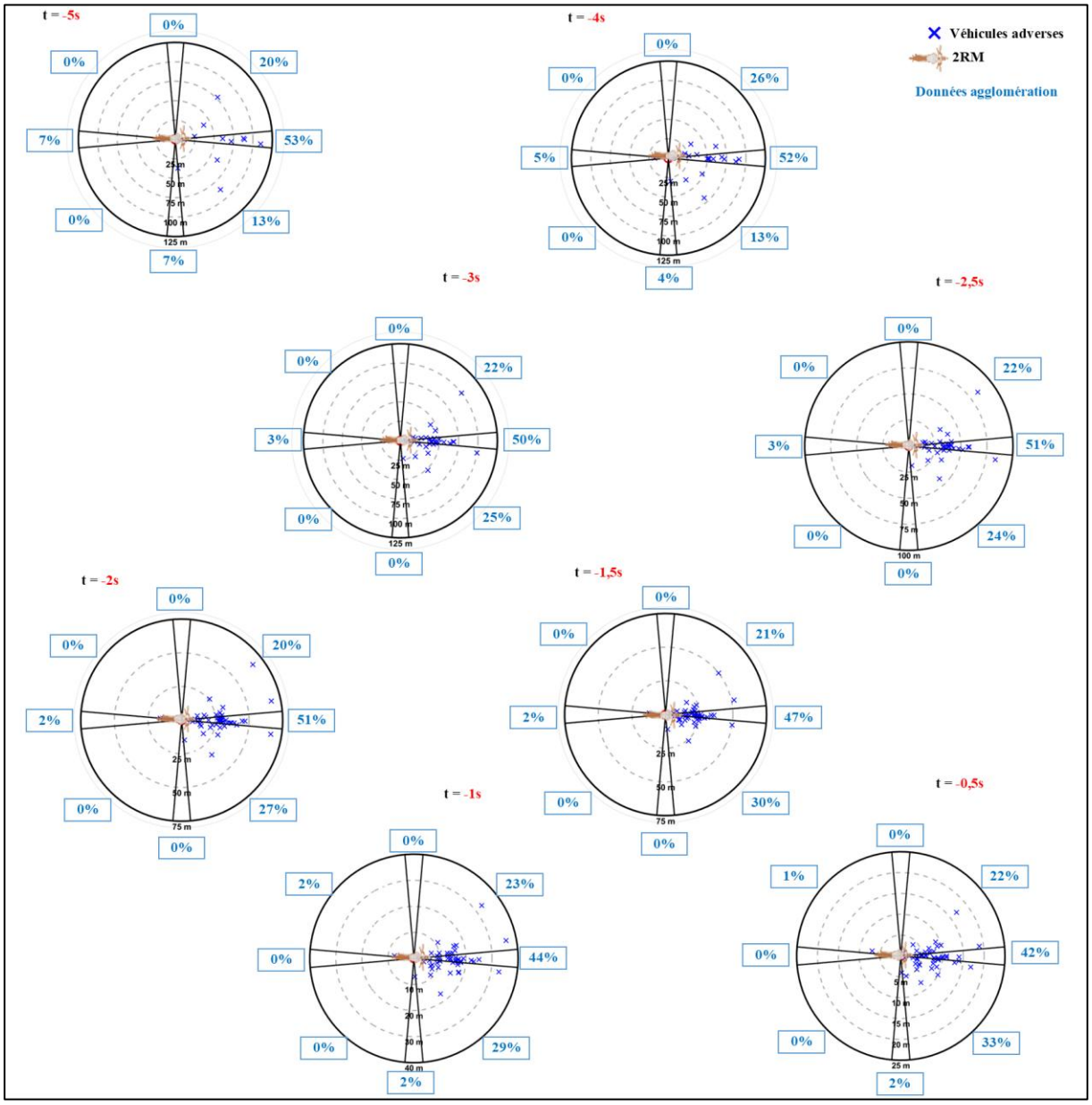


Figure VII. 5. Évolution de la position des véhicules adverses par rapport au 2RM. Données en agglomération = 55 cas.

VII.3.3 Hors agglomération

L'analyse des 35 cas d'accidents survenus hors agglomération met en évidence une concentration des véhicules adverses à des distances plus importantes que celles observées dans les données globales et en agglomération (Figure VII.6). En effet, l'évolution des distances montre qu'entre 5 s et 3 s avant l'impact, une grande partie des véhicules adverses se situent à des distances égales ou supérieures à 50 m. À titre de comparaison, cette tendance n'apparaît

qu'à partir de 4 s en agglomération et de 3,5 s dans les données globales. De plus, les données hors agglomération révèlent des pourcentages de véhicules adverses atteignant des valeurs non observées dans les autres échantillons : 72% à 4 s et 68% à 3,5 s. Ces valeurs sont supérieures d'environ 15% aux données globales et de 20% aux données en agglomération. Par ailleurs, la présence de véhicules adverses à des distances égales ou supérieures à 50 m est presque deux fois plus élevée à 3 s dans cet échantillon par rapport aux données en agglomération et trois fois plus importante aux instants 2,5 s et 2 s. En outre, on observe encore des véhicules adverses à ces distances à des instants très proches de l'impact, avec 6% des cas à 1,5 s et 1 s avant l'impact.

Les autres distances présentent des tendances plus faibles à des instants loin de l'impact, par rapport aux autres échantillons. Il est à noter qu'à 1 s avant l'impact, 43% des véhicules adverses se trouvent à des distances égales ou supérieures à 20 m, contre seulement 11% en agglomération et 23% dans les données globales. Enfin, dans les derniers instants avant l'impact, la proportion de véhicules adverses à faible distance est plus faible que dans les autres échantillons : à 1 s, 37% des véhicules se situent entre 10 m et 20 m, contre 64% en agglomération, et à -0,5 s, 49% des véhicules sont à des distances inférieures à 10 m, contre 76% en agglomération.

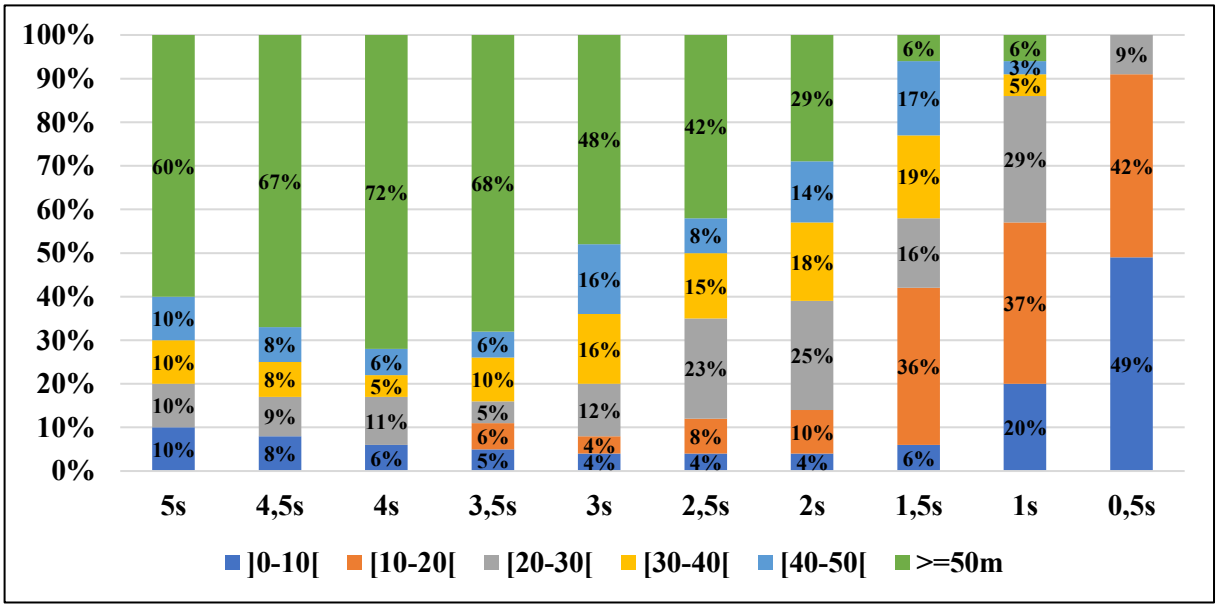


Figure VII. 6. Évolution de la distance d'approche des véhicules adverses par rapport au 2RM. Données hors agglomération = 35 cas.

La figure VII.7 illustre la progression des positions des véhicules adverses par rapport au 2RM. Comme observé dans les autres échantillons, une grande partie des véhicules se trouve à l'avant de la moto (entre -5° et 5°). Néanmoins, cette tendance tend à s'équilibrer avec le côté devant à droite. Par exemple, à 2 s avant l'impact, la différence entre les pourcentages de véhicules situés devant la moto (entre -5° et 5°) et ceux à droite (entre -5° et -85°) est de 4%, contre 14% dans les données en agglomération.

Une des particularités des données hors agglomération par rapport aux autres échantillons est que, lorsqu'on compare les pourcentages des véhicules adverses entre les côtés avant gauche et avant droit, on observe une concentration plus importante du côté droit de la

moto tout au long de la reconstitution. En effet, entre 5 s et 1 s avant l'impact, l'écart entre les deux côtés est d'au moins 8%, atteignant jusqu'à 30% à 5 s, avec une supériorité pour le côté droit. En revanche, dans les données en agglomération, cet écart est de 4% au minimum et monte jusqu'à 13%, avec une supériorité pour le côté gauche. Il est à noter qu'à 0,5 s avant l'impact, il y a autant de véhicules avant à gauche qu'à droite, avec un pourcentage de 23% de chaque côté.

Une autre différence entre les données hors agglomération et celles en agglomération concerne les pourcentages de véhicules adverses situés à l'arrière de la moto. Dans la plage située entre 95° et -95°, le pourcentage de véhicules adverses atteint un maximum de 30% (observé à 5 s avant l'impact), contre seulement 7% dans les données en agglomération. Cette concentration est répartie entre les plages situées entre 175° et -175° et entre 95° et 175° dans les deux échantillons. Par ailleurs, il est observé que presque aucun véhicule ne se trouve sur le côté arrière droit de la moto (entre -95° et -175°), sauf à 1,5 s avant l'impact, où 3% des véhicules se situent dans cette plage.

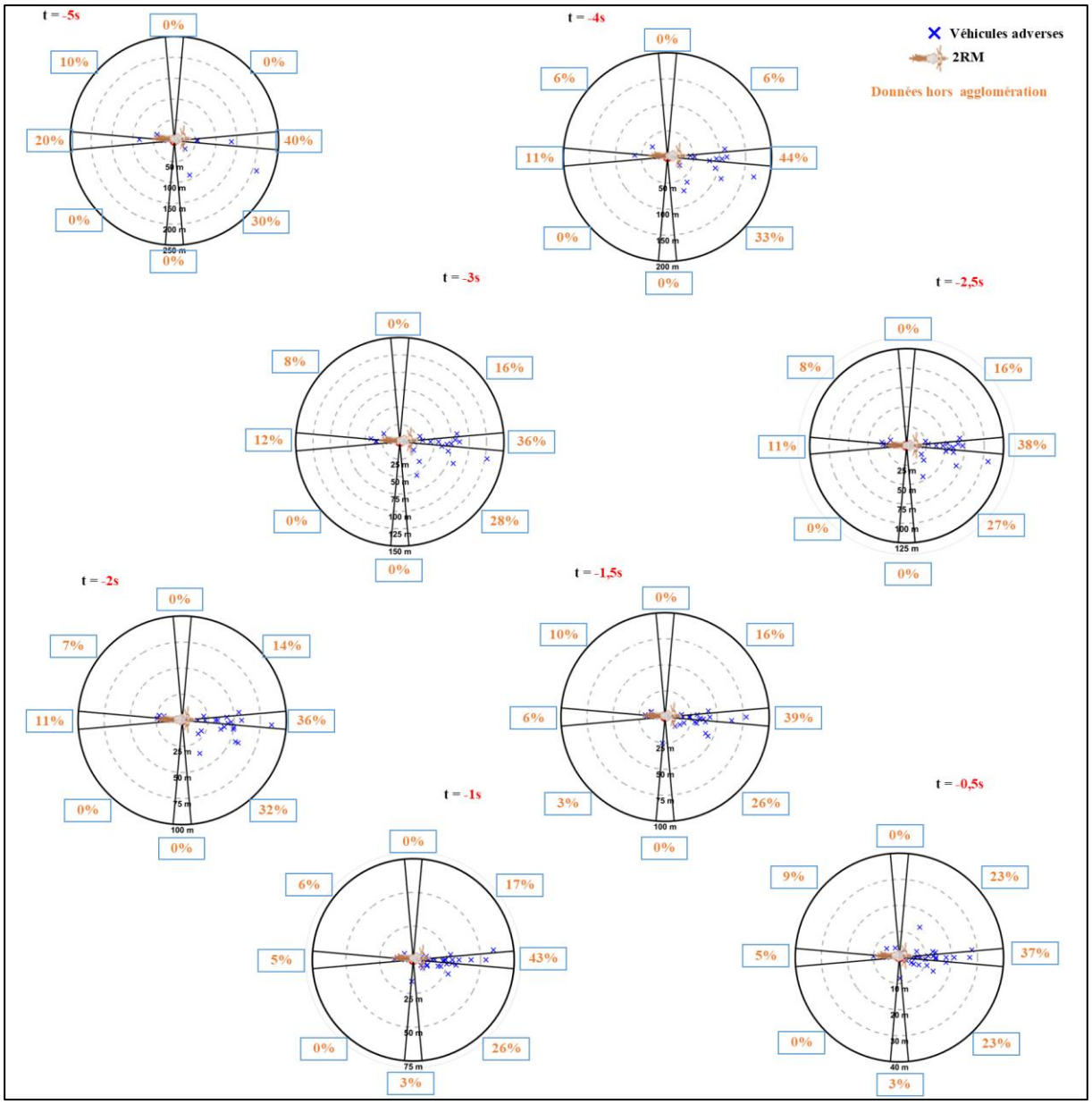


Figure VII. 7. Évolution de la position des véhicules adverses par rapport au 2RM.
Données hors agglomération = 35 cas.

VII.4 Discussions

❖ Analyse de la distance d'approche

L'analyse des distances d'approche entre le 2RM et les véhicules adverses des trois échantillons permet d'étudier l'évolution de ces distances en fonction du temps, en se basant sur des accidents réels. Il est clair qu'à mesure que le moment du choc se rapproche, les distances diminuent. Toutefois, il est intéressant d'analyser quelles sont les distances les plus marquantes : autrement dit, à quelle distance se trouvent la plupart des véhicules et à quel instant, sur les différents échantillons.

De manière générale, nous observons que dans la phase lointaine (de 5 s à 3,5 s avant l'impact), la plupart des véhicules adverses se trouvent à des distances égales ou supérieures à 50 m (dépassant les 50%). Ensuite, cette tendance diminue rapidement dans les phases intermédiaires (de 3 s à 2 s avant l'impact), avec un point de basculement marqué à 3 s avant l'impact. Dans les 90 cas d'accidents analysés, les pourcentages des différents intervalles restent presque stables entre 5 s et 3,5 s avant l'impact. Cependant, à partir de 3 s avant l'impact, on observe une diminution du pourcentage des véhicules situés à plus de 50 m (passant de 51% à 34%) et une augmentation du pourcentage des véhicules situés entre 40 m et 50 m (passant de 11% à 22%). Cette évolution suggère qu'en général, il n'est pas nécessaire de remonter jusqu'à 5 s avant l'impact pour analyser l'interaction entre les 2RM et les véhicules adverses.

À partir de 3 s avant l'impact, nous remarquons que le pourcentage des véhicules situés à des distances supérieures ou égales à 50 m diminue de 10% entre 3 s et 2,5 s avant l'impact. Une baisse similaire est observée pour les véhicules situés entre 40 m et 50 m. En revanche, le pourcentage des véhicules situés entre 30 m et 40 m augmente de 14%, ce qui peut traduire un début de ralentissement des 2RM ou des véhicules adverses situés à plus de 40 m, ainsi que des vitesses moins élevées pour ces derniers lorsqu'ils se trouvent à une inter-distance comprise entre 30 m et 40 m. À 2 s avant l'impact, le pourcentage des véhicules situés à plus de 50 m diminue à nouveau de 10%, tandis que la proportion de ceux entre 40 m et 50 m baisse légèrement (de 12% à 2,5 s à 9% à 2 s). Par ailleurs, le pourcentage des véhicules entre 30 m et 40 m commence à diminuer (de 30% à 25%), tandis que celui des véhicules entre 20 m et 30 m augmente considérablement (de 16% à 29%). Cela suggère que les 2RM et les véhicules adverses situés à plus de 40 m poursuivent un rapprochement stable après une première phase de ralentissement à 2,5 s avant l'impact, tandis qu'un début de ralentissement apparaît pour les véhicules situés entre 20 m et 30 m. À partir de 1,5 s avant l'impact, une augmentation du pourcentage des véhicules situés entre 10 m et 30 m est observée, ce qui peut indiquer une nouvelle phase de ralentissement entre les 2RM et les véhicules adverses. Enfin, 0,5 s avant l'impact, on observe une augmentation significative (43%) du nombre de véhicules situés à moins de 10 m, ce qui peut être expliqué par les manœuvres de freinage engagées juste avant le choc.

Dans les accidents survenus en agglomération, les tendances générales sont similaires, bien que quelques différences soient notables. La phase stable se situe entre 5 s et 4 s avant l'impact, tandis qu'un changement de tendance apparaît dès 3,5 s avant l'impact, contre 3 s pour l'ensemble des données. Cela suggère qu'en agglomération, il serait pertinent de remonter plus loin dans la reconstitution cinématique pour mieux analyser les interactions avant l'accident. Les principales phases de ralentissement observées dans ces résultats correspondent à celles des données globales, notamment à 2,5 s avant l'impact, où la proportion de véhicules situés entre 20 m et 30 m augmente de 22% (passant de 17% à 3 s à 39% à 2,5 s). Une poursuite du ralentissement est ensuite observée dans la phase critique (entre 2 s et 0,5 s avant l'impact) pour les faibles distances.

En revanche, pour les accidents survenus hors agglomération, le changement de tendance apparaît à 3 s avant l'impact, indiquant qu'il n'est pas nécessaire de remonter plus loin dans la reconstitution, contrairement aux observations en agglomération. À partir de 3 s et jusqu'à 2 s avant l'impact, une forte baisse du pourcentage des véhicules adverses situés à plus de 50 m est observée, tandis que les pourcentages des véhicules situés entre 30 m et 50 m restent relativement stables. C'est la proportion des véhicules situés entre 20 m et 30 m qui augmente, ce qui peut être dû à un ralentissement tardif ou à des vitesses plus élevées dans ces situations.

❖ Analyse de la position angulaire

L'analyse globale des positions des véhicules adverses révèle que la majorité des véhicules adverses se trouvent dans un angle étroit devant le 2RM, compris entre -5° et 5°. Cette tendance persiste jusqu'à l'impact, bien que l'on observe une dispersion progressive des véhicules vers les côtés avant gauche et avant droite situant dans les intervalles]5°;85°[et]-85°;-5°[. Ces résultats indiquent une concentration initiale des véhicules dans la direction de déplacement du 2RM à mesure que la collision devient inévitable.

Les résultats spécifiques aux accidents survenus en agglomération montrent une tendance similaire à celle observée globalement, avec toutefois quelques distinctions notables. 5 s avant l'impact, une plus grande proportion de véhicules adverses (53%) se trouve dans l'angle frontal [-5°;5°]. Cette concentration dans l'angle frontal persiste jusque 3 s avant l'impact, avec environ 50% des véhicules dans cette zone. Cependant, à partir de 2 s avant l'impact, on observe une dispersion notable des véhicules vers les angles latéraux, notamment dans la zone avant droite, qui atteint 30% 1,5 s avant l'impact. Cette répartition plus marquée dans les angles latéraux peut s'expliquer par les conditions de circulation en agglomération, où les véhicules adverses sont plus susceptibles d'interagir avec le 2RM depuis différentes directions, ainsi que par les manœuvres de dépassement et de remontée de file des usagers de 2RM.

Dans les accidents survenus hors agglomération, la distribution des positions des véhicules adverses diffère sensiblement de celle observée en agglomération et globalement. À 5 s avant l'impact, seulement 40% des véhicules adverses se trouvent dans l'angle frontal [-5°;5°], ce qui est inférieur aux proportions observées dans les autres contextes. En revanche, une proportion notable de véhicules adverses se répartit dans les intervalles]95°;175°[et]-85°;-5°[, représentant respectivement 10% et 30% des cas. Cette tendance se maintient à mesure que le temps avant l'impact diminue, avec une concentration relativement faible dans

l'angle frontal comparée aux intervalles latéraux. Les conditions de circulation hors agglomération, souvent caractérisées par des routes à grande vitesse et des interactions moins prévisibles entre les véhicules, expliquent en partie cette répartition. La forte concentration des véhicules adverses dans la zone arrière gauche]95°;175°[peut s'expliquer par les manœuvres de dépassement employées par ces véhicules, ainsi que par les manœuvres de tournant à gauche des motocyclistes sans s'apercevoir qu'un véhicule se trouve derrière eux.

❖ Recommandations

Sur la base des études présentées dans la revue de littérature sur les temps de réaction, qui préconisent un temps moyen d'une seconde pour les motocyclistes pour effectuer une manœuvre d'évitement ou de freinage, il est recommandé aux constructeurs de développer des systèmes de détection de collision pour les 2RM avec une portée allant jusqu'à 20 m en agglomération et jusqu'à 30 m hors agglomération. Ces distances sont adaptées aux vitesses moyennes pratiquées dans ces environnements et tiennent compte du temps de réaction typique des motards, leur permettant ainsi d'effectuer une manœuvre d'évitement efficace. Cette recommandation vise à maximiser la protection des motards tout en s'intégrant aux réalités des conditions de circulation, contribuant ainsi à réduire le risque de collision pour les usagers de 2RM.

Les résultats de l'analyse montrent une différence dans la répartition angulaire des véhicules adverses autour des 2RM en fonction de l'environnement, en particulier entre les zones urbaines et non urbaines. Ces observations suggèrent des recommandations spécifiques pour la formation des conducteurs de 2RM afin d'améliorer leur vigilance et leur capacité d'anticipation des dangers potentiels :

1. Vigilance accrue sur les côtés et à l'arrière hors agglomération

En dehors des agglomérations, les véhicules adverses sont souvent répartis de manière plus large autour des 2RM, avec une proportion notable se trouvant sur les côtés et à l'arrière du motocycliste. 5 s avant l'impact, seulement 40% des véhicules adverses sont situés dans l'intervalle frontal étroit [-5°;5°], tandis que les intervalles latéraux et arrière]95°;175°[et]-85°;-5°[, contiennent respectivement 10% et 30% des véhicules. Ces données indiquent que les motocyclistes doivent être particulièrement attentifs à leur environnement latéral et arrière lorsqu'ils circulent hors agglomération.

Les programmes de formation devraient inclure des exercices spécifiques pour entraîner les motards à surveiller régulièrement leurs rétroviseurs et à apprendre à bien réagir à la détection de collision par des systèmes spécifiques, en particulier lorsqu'ils roulent hors agglomération. Les instructeurs devraient insister sur l'importance d'une prise de conscience à 360° de la circulation environnante, car les véhicules adverses peuvent surgir de n'importe quel côté, souvent de manière inattendue.

2. Renforcement de l'attention dans les intervalles latéraux en agglomération

En agglomération, bien que la concentration des véhicules adverses soit plus élevée dans l'intervalle frontal [-5°;5°], les résultats montrent également une présence notable dans les intervalles latéraux, en particulier dans l'intervalle]-85°;-5°[. 4,5 s avant l'impact, 33 % des

véhicules se trouvent dans cet intervalle latéral, ce qui démontre que les motocyclistes doivent être attentifs non seulement à l'avant, mais aussi aux véhicules approchants latéralement.

Il est recommandé d'incorporer dans la formation des motards des scénarios de simulation qui reproduisent les situations où les véhicules apparaissent soudainement dans les angles morts latéraux, notamment en zone urbaine. Ces exercices doivent être conçus pour améliorer la réactivité des conducteurs et leur apprendre à anticiper les mouvements des véhicules dans les voies adjacentes, surtout lors des changements de direction ou des traversées d'intersections.

3. Adaptation de la formation aux différentes situations routières

Les conducteurs de 2RM doivent être formés à adapter leur niveau de vigilance et leur comportement en fonction de l'environnement. En zone urbaine, où les véhicules adverses sont plus concentrés à l'avant, il faut porter une attention particulière aux dangers frontaux immédiats. En revanche, hors agglomération, où les véhicules adverses sont plus souvent répartis sur les côtés et à l'arrière, les motocyclistes doivent apprendre à surveiller leur environnement de manière plus globale.

La formation devrait inclure des modules spécifiques pour chaque type d'environnement, urbain et non urbain, avec des conseils pratiques sur l'utilisation des équipements de sécurité, comme les rétroviseurs et les systèmes de détection d'angles morts, ainsi que sur la mise en œuvre des manœuvres d’évitement appropriées. Les motards devraient être encouragés à maintenir une distance de sécurité accrue et à adopter une posture de conduite qui facilite la surveillance continue des zones latérales et arrière.

VII.5 Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif de fournir une analyse détaillée des dynamiques d'interaction entre 2RM et les véhicules adverses, en particulier en ce qui concerne la répartition angulaire et les distances avant impact. En abordant cette question essentielle, le but était d’enrichir la compréhension des conditions menant aux collisions, en mettant l'accent sur les différences entre les environnements urbains et non urbains.

Pour atteindre cet objectif, nous avons mis en œuvre une méthodologie rigoureuse qui a inclus une collecte et une analyse des données de collision, en se concentrant sur la répartition angulaire des véhicules adverses et les distances de rapprochement avant l'impact. Les données ont été segmentées en contextes d'agglomération et hors agglomération afin d’évaluer les variations dans les comportements des véhicules adverses et les besoins spécifiques en matière de détection de collision.

Les résultats montrent des tendances remarquables concernant la répartition des véhicules adverses autour des 2RM. 5 s avant l'impact, 48% des véhicules adverses se trouvaient dans un angle frontal étroit [-5°;5°], ce qui indique une concentration initiale des véhicules

directement devant le 2RM. Cependant, cette concentration diminue progressivement à mesure que l'impact approche, avec une dispersion croissante vers les angles latéraux. 0,5 s avant l'impact, les intervalles latéraux et arrière montrent une présence notable des véhicules adverses, atteignant jusqu'à 22% dans l'intervalle avant droit et 29% dans l'intervalle avant gauche.

Concernant les distances de rapprochement, nous avons constaté une diminution importante des distances entre les véhicules adverses et les 2RM à l'approche de l'impact. 5 s avant l'impact, une majorité des véhicules se trouvent à plus de 50 m du 2RM, mais cette proportion décroît rapidement, atteignant seulement 14% 2 s avant l'impact et 0% 1 s avant l'impact. Les distances inférieures à 10 m montrent une augmentation marquée, atteignant 66% 0,5 s avant l'impact, soulignant l'importance de systèmes de détection capables de réagir rapidement.

En analysant les résultats spécifiques à chaque contexte, il apparaît que les environnements urbains et non urbains présentent des caractéristiques distinctes. En agglomération, les véhicules adverses se rapprochent plus rapidement et sont plus concentrés dans l'angle frontal, nécessitant des systèmes de détection avec une portée efficace jusqu'à 20 m. En revanche, hors agglomération, où les véhicules se déplacent à des vitesses plus élevées, une portée de détection allant jusqu'à 30 m est recommandée pour anticiper les mouvements à des distances plus longues. Ces conclusions soulignent la nécessité de développer des systèmes de détection de collision adaptés aux conditions spécifiques de circulation. En agglomération, où les distances se réduisent rapidement, les systèmes doivent offrir une réactivité accrue à courte distance. Hors agglomération, les systèmes doivent être capables de détecter des véhicules à des distances plus grandes pour compenser les vitesses plus élevées et les interactions plus variées. En somme, les résultats de ce chapitre mettent en évidence l'importance de personnaliser les technologies de sécurité pour améliorer la protection des motards et réduire les risques de collision dans différents environnements routiers.

Chapitre VIII

Analyse de l'effet d'un Autonomous Emergency Braking

Table des matières

Chapitre VIII

Analyse de l'effet d'un Autonomous Emergency Braking

VIII.1 Revue de littérature 171

VIII.2 Matériels et méthodes 175

VIII.2.1 Méthodologie d'analyse des effets de l'AEB 176

VIII.2.2 Méthodologie de calcul du bénéfice de l'AEB sur les blessés graves 180

VIII.3 Résultats de l'étude 182

VIII.3.1 Analyse paramétrique 182

VIII.3.2 Bénéfices de l'AEB en configuration pessimiste 186

VIII.3.3 Bénéfices de l'AEB en configuration optimiste 188

VIII.3.4 Bénéfice de l'AEB sur les blessés graves 190

VIII.3.4.1 Distribution des accidents en fonction de la vitesse d'impact 191

VIII.3.4.2 Calcul des bénéfices sur les blessés graves 193

VIII.4 Discussions 195

VIII.5 Conclusion 197

Cette étude porte sur l'impact d'un système de freinage d'urgence automatisé (AEB) sur les accidents impliquant des 2RM. Pour évaluer cet impact, une méthodologie spécifique a été développée. Elle repose sur l'analyse de bases de données d'accidents réels et des simulations effectuées à l'aide d'un simulateur développé sous Matlab. Ce simulateur a permis de reproduire en 2D, cas par cas, les scénarios d'accidents, avec et sans l'intégration de la technologie AEB.

L'étude s'articule autour de deux objectifs principaux :

- Analyser l'impact de l'AEB sur les taux d'évitement des accidents et sur la réduction des vitesses d'impact, afin d'évaluer son efficacité en matière de prévention des collisions.
- Étudier l'effet de cette technologie sur la diminution des blessures graves, notamment celles classées MAIS3+.

Ce chapitre est organisé comme suit : une revue de littérature approfondie est d'abord présentée pour situer cette recherche dans le contexte scientifique actuel. Ensuite, les outils utilisés, les échantillons sélectionnés et les méthodologies développées sont décrits en détail. Enfin, les résultats obtenus sont exposés et analysés, mettant en lumière les implications et les contributions de cette étude.

VIII.1 Revue de littérature

Plusieurs études ont déjà été consacrées au système AEB appliqué aux 2RM. Certaines se concentrent sur la modélisation de cette technologie, comme cela a été présenté au chapitre II, tandis que d'autres évaluent son impact sur l'accidentalité des 2RM. Par ailleurs, certaines études analysent l'interaction entre les motocyclistes et l'activation automatique du système AEB, ainsi que son acceptabilité par les usagers.

L'AEB est un système qui active automatiquement le freinage du véhicule après détection d'une collision imminente (Labayrade et al., 2007). Le premier prototype de l'AEB pour les 2RM, appelé « Active Braking (AB)», a été développé dans le projet PISa (Powered Two-wheelers Integrated Safety) (C. van der Zweep and J. Vandenhoudt, 2006). Par la suite, plusieurs études visant à évaluer cette technologie ont été menées.

❖ Études sur l'évaluation des bénéfices de l'AEB :

En se basant sur l'analyse des échantillons de cas réels d'accidents reconstitués impliquant un 2RM, plusieurs méthodologies ont été utilisées pour simuler des collisions avec et sans l'AEB. Savino et al. (2010) ont examiné l'influence de plusieurs technologies dont l'AB sur une soixantaine de cas d'accidents. Leurs résultats ont montré que la réduction de la vitesse d'approche variait entre 20% et 48,5%, avec des décélérations allant de 3 m/s² à 9 m/s².

Dans une autre étude (Savino et al., 2013a) ont évalué l'impact d'un MAEB (Motorcycle Autonomous Emergency Braking) sur sept cas d'accidents de 2RM mortels. Ils ont ensuite procédé à une simulation de plusieurs configurations de cette technologie. Les auteurs ont conclu que le MAEB réduisait la vitesse d'impact dans cinq cas sur sept, avec une réduction maximale de 1,1 km/h.

Les mêmes auteurs, Savino et al. (2013b) ont analysé l'influence de cette technologie sur un échantillon de cinquante-huit cas reconstitués, répartis en deux catégories : des collisions avec un objet fixe et des collisions avec un objet traversant la trajectoire du 2RM. Les résultats ont révélé que dans 67% des cas, l'application du système AB aurait pu atténuer les conséquences de l'accident. De plus, une réaction rapide et correcte du conducteur aurait permis d'éviter environ 50% de ces collisions.

Dans la même optique d'analyse de cas d'accident impliquant un 2RM, Savino et al. (2014a) ont constaté que le MAEB permettait une réduction moyenne de la vitesse d'impact de 5,5 km/h, avec des variations allant de 0,3 à 6,2 km/h selon les cas. En outre, dans 50% des variantes, la réduction de la vitesse d'impact dépassait 4 km/h, démontrant son efficacité dans des contextes variés. Bien qu'une corrélation précise entre la réduction de la vitesse d'impact et la diminution des blessures reste à établir, l'étude suggère également que le déplacement du point d'impact pourrait influencer positivement les résultats en termes de gravité des blessures. Cette méthode, malgré les incertitudes liées aux données issues des accidents réels, offre un cadre robuste pour évaluer les impacts potentiels du MAEB avant son déploiement commercial.

Par ailleurs et avec un échantillon de quatre-vingt-onze cas d'accidents, comprenant des accidents d'intersections, des accidents en virages, des chocs latéraux et des collisions frontales, Savino et al. (2014b) ont indiqué que le MAEB a pu détecter un état de collision inévitable dans 89% des cas simulés, avec une réduction moyenne de la vitesse d'impact de 3,5 km/h, et allant jusqu'à 6 km/h dans certains scénarios. La réduction de la vitesse d'impact était plus importante pour les collisions où le conducteur avait déjà commencé à freiner (mode Active Braking + Enhanced Braking). Les résultats suggèrent que l'activation du MAEB pourrait réduire le risque de blessures, en particulier dans les collisions à faible et moyenne vitesse, mais que ses avantages sont limités par des facteurs tels que le temps court entre l'activation et la collision, ainsi que la décélération limitée du système.

Savino et al. (2016) ont utilisé une méthode dite Monte Carlo pour estimer l'effet du MAEB sur un échantillon de cas d'accidents impliquant un 2RM. Cette méthode consiste à simuler un grand nombre de scénarios en générant des variables aléatoires pour estimer l'incertitude et évaluer les résultats probabilistes pour chaque cas. Chaque scénario a été simulé avec et sans MAEB pour évaluer la réduction de la vitesse d'impact du motocycliste, en tenant compte de facteurs comme l'activation du système de détection d'obstacles et le moment où le freinage était déclenché. Les résultats ont montré que le MAEB aurait pu réduire la vitesse d'impact moyenne de 4,2 km/h (réduction relative de 9%) dans les configurations de base, avec des variations allant de 1% à 32% selon les cas.

Les résultats de Lucci et al. (2021, 2022) confirment ceux obtenus par Savino et al (2010-2016a) sur le potentiel de la technologie du freinage d'urgence dans les accidents de 2RM. Une analyse fine d'un échantillon d'accidents survenus en Australie a permis à Lucci et al. (2021) de montrer que le MAEB, lorsqu'il est utilisé seul, permet de réduire les blessures de

type MAIS2+ d'environ 10% et les blessures mortelles de 22%. Par ailleurs, en combinant cette technologie avec un freinage manuel effectué par le motocycliste, ces réductions atteignent 16% pour les blessures de type MAIS2+ et 21% pour les blessures mortelles. De plus une réduction de la vitesse d'impact de l'ordre de 15 km/h et une diminution de 15% les blessures graves de types MAIS3+ ont été observé dans l'étude (Lucci et al., 2022b), avec un système offrant une décélération de l'ordre de 5 m/s² et un jerk de 20 m/s^3.

❖ Études concernent la réduction des blessures :

Les analyses portant sur l'influence de l'AEB sur les accidents de 2RM se sont également intéressées aux zones du corps où l'atténuation de l'impact est importante. L'étude menée par Piantini et al. (2020) a démontré que l'AEB peut également contribuer à réduire la vitesse d'impact de la tête, ce qui permet d'atténuer les blessures crâniennes des motocyclistes lors d'accidents impliquant des 2RM. Les mêmes auteurs (Piantini et al., 2022) ont évalué l'impact de plusieurs configurations de cette technologie sur vingt-trois cas d'accident réels provenant de la base de données InSAFE. Il ressort de cette étude que cette technologie a permis d'éviter deux accidents parmi les vingt-trois cas analysés et de réduire la vitesse d'impact de 8,6 km/h en cas de déclenchement conservatif (TTC-Time To Collision ≤ 0,6 s), et de 19,1 km/h en cas de déclenchement progressif (TTC ≤ 1 s).

❖ Bénéfices de l'AEB en virage :

L'étude de Savino et al. (2015) visait à étendre l'applicabilité du MAEB aux scénarios de virage. Les auteurs ont équipé une motocyclette virtuelle d'un MAEB et d'un contrôle actif du freinage (ABC pour Active Braking Control) pour stabiliser le véhicule en courbe. L'ABC est un système similaire au MSC, développé pour assister les motocyclistes dans les freinages en virage. Les simulations ont montré que le MAEB+ (MAEB+ABC) réduisait la vitesse d'impact de la motocyclette et maintenait sa stabilité, avec des réductions de vitesse allant jusqu'à 6,1 km/h par rapport à MAEB seul dans les accidents en virage. Les résultats ont également suggéré que MAEB+ pourrait être plus efficace lorsque le conducteur applique un freinage précoce et faible, et que les angles de roulis sont éloignés des limites.

❖ Bénéfices du PCB :

Par ailleurs d'autres études se sont focalisées sur l'effet d'un système de freinage pré-collision (PCB) sur les accidents de 2RM. Ce système est similaire à l'AEB dans la mesure où il engage une manœuvre de freinage lorsqu'il détecte une collision imminente. La différence réside dans le fait que le PCB est conçu pour freiner au dernier moment, son objectif principal étant d'atténuer l'impact, bien qu'il puisse, dans certains cas, permettre de l'éviter. Savino et al. (2019) ont utilisé des données issues de InSAFE pour évaluer l'impact de cette technologie. Les résultats montrent qu'une intervention tardive du PCB, avec une décélération de 3 m/s², pourrait réduire la vitesse d'impact de 3,2 km/h, tandis qu'une intervention plus rapide et une plus grande décélération (5 m/s²) pourraient réduire cette vitesse de 5,4 km/h. Les simulations ont également montré qu'une combinaison d'intervention précoce et de forte décélération pourrait entraîner une réduction de la vitesse d'impact de jusqu'à 8,6 km/h. Enfin, bien que l'impact sur la réduction des blessures graves soit modeste, estimé à une réduction de 2,4% du risque de blessures MAIS3+F, cela pourrait entraîner une réduction des victimes dans des scénarios réels d'accident. De plus Naude et al. (2022) ont examiné l'influence de la même

technologie mais sur des données issues de deux bases de données différentes : EDA et InSAFE. Les résultats obtenus dans cette étude soulignent l'importance de paramètres spécifiques tels que le champ de vision et la portée pour obtenir des réductions de la vitesse d'impact, atteignant jusqu'à 11,6 km/h.

- Études traitant l'acceptabilité de l'AEB :

Les problématiques de la technologie de l'AEB ne s'arrêtent pas seulement à son effet potentiel dans la réduction ou l'atténuation des accidents impliquant un 2RM, mais aussi à l'acceptabilité de cette technologie par les motocyclistes. Plusieurs études ont été menées dans ce sens (Biffoli et al., 2021; Cassese et al., 2022; Lucci et al., 2022b; Marra et al., 2021; Savino et al., 2013b) afin d'analyser l'interaction entre l'AEB et des motocyclistes. Pour effectuer l'évaluation de l'acceptabilité, des essais sur pistes ont été effectués avec plusieurs participants. Les résultats obtenus mettent en lumière que la technologie de l'AEB n'entraine pas de perte de stabilité de la moto lors de l'activation du freinage d'urgence automatique, et l'ensemble des participants ont exprimé une bonne acceptabilité de cette technologie.

Les études présentées précédemment mettent en évidence l'impact potentiel de la technologie de l'AEB sur les accidents impliquant les 2RM, notamment en termes d'atténuation des conséquences. Cependant, pour renforcer ces résultats et pallier les lacunes identifiées dans la littérature, il est important d'examiner l'influence simultanée de plusieurs paramètres essentiels de l'AEB tels que la portée, le champ de vision, la décélération et les stratégies de déclenchement.

C'est dans cette optique que la présente étude a été menée, visant à déterminer l'effet combiné de ces paramètres sur les accidents de 2RM (étude paramétrique). Deux objectifs complémentaires ont été définis :

- Analyse de l'impact de l'AEB : Un échantillon représentatif d'accidents a été simulé en faisant varier simultanément plusieurs paramètres de l'AEB. Cette analyse avait pour but de quantifier l'efficacité de cette technologie, à la fois en termes d'évitement d'accidents et de réduction de la vitesse d'impact.
- Etude de configurations pessimistes et optimistes ?
- Effet sur la diminution des blessures graves : Dans la continuité des travaux réalisés dans ce chapitre, et comme cela a été fait sur la technologie ACC au chapitre V, une étude complémentaire a été conduite pour analyser l'effet de différentes configurations de l'AEB sur la réduction des blessures graves (MAIS3+).

VIII.2 Matériels et méthodes

Afin d'atteindre l'objectif principal de cette étude, qui est d'évaluer l'influence de la technologie AEB sur l'accidentalité des 2RM, une méthodologie structurée en deux étapes complémentaires a été développée :

- ❖ Première étape : simulation de l'AEB sur des cas d'accidents

Un échantillon de cas d'accidents réels impliquant des 2RM a été identifié et simulé. Cette analyse visait à évaluer l'effet de l'AEB en termes d'évitement et d'atténuation des impacts dans les scénarios accidentels sélectionnés. Pour répondre à cet objectif, un outil de simulation 2D a été développé sous MATLAB au sein du laboratoire dans le cadre d'études précédentes (Naude et al., 2022; PIONEERS, 2020) pour le PCB. Une réadaptation de cet outil a été réalisée afin de l'adapter à un AEB. Cet outil a permis :

- ➢ De reconstituer les scénarios accidentels à partir des données existantes, en modélisant les interactions entre le 2RM et le véhicule adverse.
- ➢ De simuler l'application d'un système AEB sur le 2RM, en intégrant les paramètres essentiels de cette technologie (portée, champ de vision, décélération maximale, stratégie de déclenchement).
- ➢ De calculer les nouvelles vitesses d'impact en générant toutes les combinaisons possibles des paramètres définis pour l'AEB.

- ❖ Deuxième étape : évaluation de la réduction des blessures graves (MAIS3+)

Une étude complémentaire a été menée pour quantifier l'effet de l'AEB sur la réduction des blessures graves de type MAIS3+. Cette analyse a suivi une méthodologie similaire à celle employée pour l'étude de l'ACC dans le chapitre V, adaptée pour les accidents impliquant des systèmes AEB.

Il est important de rappeler que l'AEB pour les 2RM repose sur l'utilisation de technologies avancées telles que les radars, les capteurs laser et, parfois, des caméras. Ces dispositifs permettent de détecter de manière proactive une situation imminente de collision. En réponse, le système active automatiquement un freinage d'urgence, capable de générer une décélération rapide afin de prévenir l'accident ou, à défaut, d'en réduire la gravité. De plus, l'AEB défini dans cette étude ne se distingue pas du MAEB et des systèmes mentionnés dans la revue de littérature.

VIII.2.1 Méthodologie d'analyse des effets de l'AEB

❖ Sélection des cas

La sélection des cas d'accidents pour constituer l'échantillon d'étude destiné à analyser l'impact de la technologie de l'AEB a suivi le même protocole que celui décrit pour l'ACC au chapitre V. Deux bases de données d'accidents réels, EDA et IGLAD, ont été utilisées. Les cas d'accidents retenus pour l'analyse de l'AEB ont été sélectionnés sur la base des résultats du chapitre IV, qui présentait une analyse qualitative des effets des technologies ARAS sur les accidents impliquant des 2RM. Cette analyse a identifié que le système AEB pourrait avoir une influence potentielle sur 109 cas d'accidents parmi les 309 étudiés.

Ces 109 cas représentent un échantillon varié, incluant différents types de scénarios d'accidents :

- Collisions frontaux-arrière impliquant un véhicule précédant le 2RM,
- Collisions frontaux-frontales avec un véhicule arrivant en sens inverse,
- Collisions frontaux-latérales où un véhicule coupe la trajectoire du 2RM.

La méthodologie développée pour simuler les accidents avec et sans l'AEB repose sur la disponibilité d'un ensemble de données essentielles aux calculs, incluant :

- Les vitesses d'approche et d'impact des différents véhicules impliqués (2RM et autres véhicules en conflit),
- Le continuum spatio-temporel détaillant l'évolution des trajectoires des véhicules,
- Une cartographie des lieux de l'accident pour contextualiser la dynamique.

Les 109 cas d'accidents initialement identifiés ne disposaient pas tous des données nécessaires à une reconstruction complète et fiable. Après vérification de la disponibilité de ces informations, l'échantillon a été réduit à 82 cas d'accidents exploitables pour la simulation et l'évaluation des effets de l'AEB.

❖ Algorithme

Pour modéliser l'impact du système de l'AEB sur les accidents impliquant des 2RM, une simulation basée sur les données de reconstruction cinématique des accidents a été mise en œuvre. Cette simulation s'appuie sur les trajectoires des véhicules impliqués, leur évolution temporelle de quelques secondes avant l'impact jusqu'à quelques secondes après, ainsi que sur la synchronisation temporelle au moment de l'impact. Les obstacles, qu'ils soient fixes ou mobiles, sont intégrés dans le modèle, car ils influencent la détection du véhicule adverse par rapport à la moto. Dans le cas d'obstacles mobiles, tels qu'un troisième véhicule, leurs trajectoires synchronisées avec celles des deux autres véhicules sont prises en compte dans l'algorithme de détection.

La simulation est structurée en trois phases principales : détection, déclenchement de l'AEB, et activation du freinage de l'AEB. Le pas de simulation est fixé à 0,02 s afin d'assurer

une précision suffisante dans la modélisation des interactions dynamiques. Ces étapes, décrites ci-dessous, sont illustrées dans la Figure VIII.1.

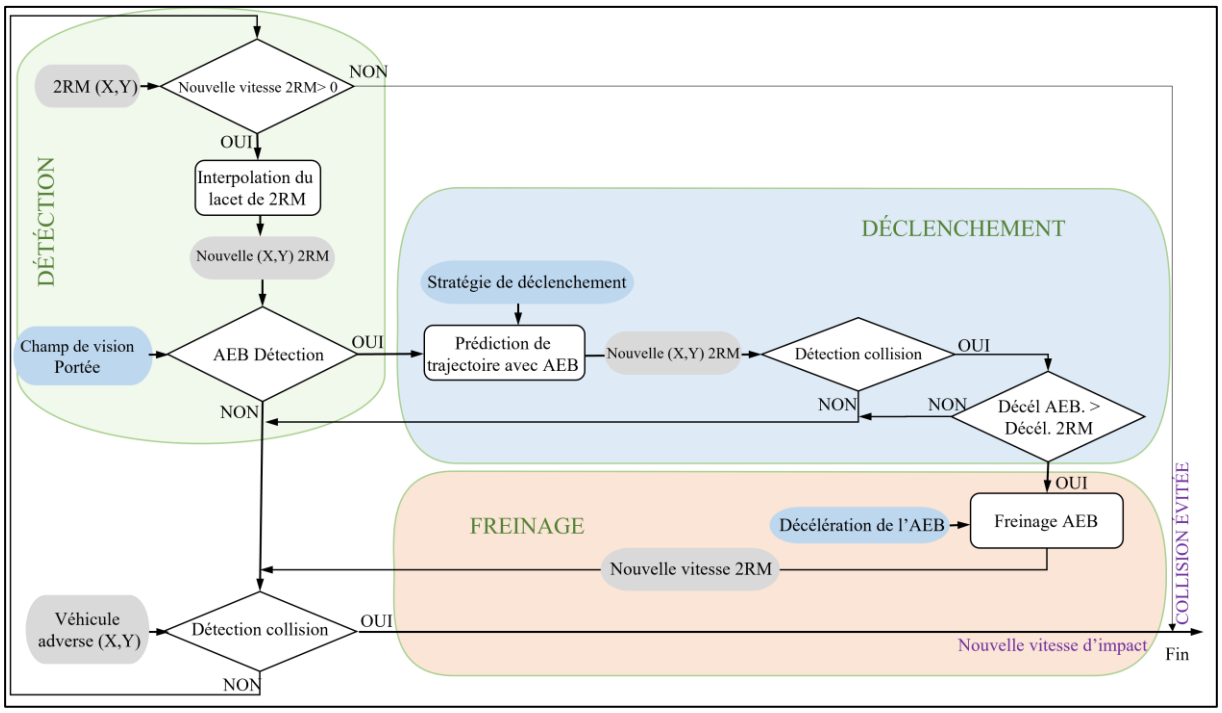


Figure VIII. 1. Algorithme de l'AEB (Naude et al., 2022)

a. Phase de détection

La détection repose sur un capteur modélisé sous forme d'un cône situé à l'avant de la moto. Ce cône est défini par deux paramètres essentiels :

- ❖ Le champ de vision : L'angle d'ouverture du cône, qui détermine la largeur de la zone devant la moto où un obstacle peut être détecté.
- ❖ La portée : La distance maximale à laquelle le système peut détecter un obstacle.

Les positions relatives des véhicules et la présence éventuelle d'obstacles masquant la visibilité sont analysées. L'algorithme permet de détecter le véhicule adverse, modélisé comme un rectangle dont les quatre coins et le centre sont des points de référence. Un véhicule est considéré comme détecté si au moins trois des cinq points de référence se trouvent dans le cône de détection et ne sont pas masqués par un obstacle. Cette phase intègre également des vérifications dynamiques pour ajuster les paramètres de détection en fonction des trajectoires en temps réel.

b. Phase de déclenchement de l'AEB

Le déclenchement du système de l'AEB intervient lorsque le freinage autonome devient nécessaire pour éviter une collision imminente. Cette étape repose sur une simulation continue de la prédiction de la trajectoire de la moto, basée sur un modèle de freinage jusqu'à l'arrêt complet.

- ❖ Critère de déclenchement : Si la trajectoire simulée montre que l'arrêt complet de la moto ne peut pas être réalisé avant l'impact, l'AEB est activé. Ce critère est appliqué de manière récurrente à chaque instant pendant la simulation, permettant une évaluation en temps réel.

c. Phase d'activation du freinage de l'AEB

Une fois l'AEB activé, le système initie un freinage en deux étapes :

- ❖ Phase de progression : Un freinage progressif, caractérisé par une variation d'accélération initiale (jerk) de 25 m/s³, pour réduire progressivement la vitesse sans déséquilibrer le 2RM.
- ❖ Phase constante : Une décélération constante est ensuite appliquée, conformément aux paramètres définis pour la simulation.

Des règles spécifiques sont intégrées pour modéliser les conditions réelles de l'accident :

- ❖ Interaction avec le freinage du conducteur : Si le motocycliste applique déjà un freinage, l'AEB se déclenche uniquement si la décélération prévue par le système dépasse celle initiée par le conducteur. Sinon, la décélération du conducteur est utilisée pour ne pas interférer négativement.
- ❖ Perte de détection : Si le véhicule adverse sort du champ de détection de l'AEB en raison des trajectoires respectives des véhicules, aucun freinage automatique n'est appliqué, même en cas de collision inévitable.
- ❖ Trajectoire du véhicule adverse : Pendant l'activation du freinage de l'AEB, la trajectoire et la vitesse du véhicule adverse restent conformes à la situation initiale de l'accident.
- ❖ Réévaluation continue : La trajectoire, la vitesse et l'angle de lacet de la moto sont réévalués à chaque instant où le freinage de l'AEB est appliqué. Cette réévaluation permet d'adapter le freinage aux nouvelles conditions dynamiques de l'accident.

Ce modèle intègre les variables critiques influençant l'efficacité de l'AEB et tient compte des interactions complexes entre le conducteur, le système, et l'environnement accidentel. Les algorithmes de simulation, basés sur des données temporelles synchronisées et des scénarios paramétriques détaillés, permettent une évaluation robuste de l'impact de l'AEB sur la réduction des vitesses d'impact.

❖ Hypothèses et paramètres

Une étude paramétrique approfondie a été réalisée pour évaluer l'influence des paramètres essentiels de l'AEB sur les accidents impliquant des 2RM. Les valeurs caractéristiques utilisées dans cette analyse sont résumées dans le tableau VIII.1 et s'appuient sur une méthodologie inspirée de Naude et al. (2022) pour le PCB.

Trois niveaux de décélération ont été considérés :

- 3 m/s² et 5 m/s², conformes aux essais expérimentaux disponibles dans la littérature portant sur les décélérations acceptables par les motocyclistes (Marra et al., 2021; Lucci et al., 2020, 2022b).
- 7 m/s², une valeur plus agressive, simulée pour explorer l'impact potentiel d'un système d'AEB conçu pour maximiser l'efficacité du freinage dans des conditions critiques, bien que cette valeur n'ait pas encore été testée sur le terrain, notamment en termes d'acceptabilité.

Trois stratégies de déclenchement de l'AEB ont été examinées :

- Déclenchement standard : Décélération constante de 5 m/s², représentant une activation typique et équilibrée.
- Déclenchement progressif : Décélération de 3 m/s², favorisant un déclenchement précoce afin d'offrir davantage de temps pour réagir avant la collision.
- Déclenchement conservateur : Décélération de 7 m/s², activée plus tardivement et à proximité de la collision, pour simuler une intervention d'urgence stricte.

Toutes les configurations combinant les niveaux des paramètres ont été appliquées à chaque cas d'accident étudié, soit un total de 225 simulations par cas. Cette approche paramétrique a permis d'explorer de manière exhaustive les effets combinés des différents paramètres du système AEB sur la réduction des vitesses d'impact.

Tableau VIII. 1. Les paramètres de l'AEB

Paramètres	Niveaux
Portée	30 m, 45 m, 60 m, 75 m, 90 m
Champs de vision (de part et d'autre de l'axe longitudinal)	+/- 10°, 25°, 40°, 55°, 70°
Stratégie de déclenchement	Conservative, Standard, Progressive
Décélération	3 m/s², 5 m/s², 7 m/s²

❖ Application AEB développée sous MATLAB

La figure VIII.2 illustre l'application développée par Claire NAUDE (annexe 3) pour simuler l'activation de l'AEB sur des accidents simuler des accidents avec ou sans la technologie AEB. Elle repose sur un algorithme structuré en plusieurs zones fonctionnelles distinctes, chacune dédiée à une étape de la simulation. Dans un premier temps, l'application charge les données d'accident et réalise une reconstruction cinématique des trajectoires des véhicules. Elle permet ensuite de configurer les paramètres de détection, tels que le champ de vision et la portée du capteur, et de simuler la détection du véhicule adverse. Les paramètres de déclenchement de l'AEB sont ensuite définis, incluant la stratégie de freinage et la décélération.

Une fois ces configurations établies, l'application exécute des simulations complètes, génère des résultats, et crée des graphiques pour visualiser les trajectoires et les données pertinentes. Les résultats sont analysés dans une zone dédiée, où l'utilisateur peut comparer les simulations avec et sans AEB et générer des statistiques sur les effets du système. Cette application propose une visualisation cartographique de l'accident et permet de suivre la simulation en temps réel, avec une représentation dynamique des interactions entre les véhicules.

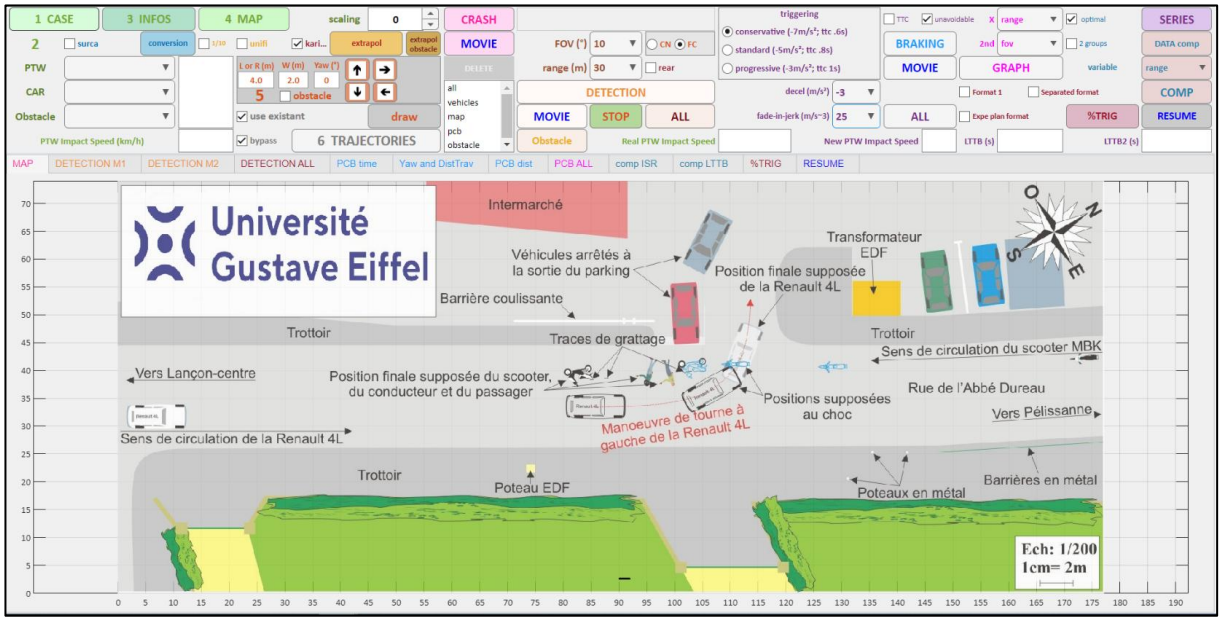


Figure VIII. 2. Application de l'analyse de l'AEB (C. NAUDE)

VIII.2.2 Méthodologie de calcul du bénéfice de l'AEB sur les blessés graves

À l'instar de l'analyse menée pour l'ACC, une étude complémentaire a été réalisée dans ce projet pour évaluer l'impact de l'AEB sur les blessés graves (type MAIS3+). L'objectif principal de cette étude est de quantifier le bénéfice apporté par cette technologie en termes de réduction des blessés graves.

Pour répondre à cet objectif, la méthodologie appliquée est identique à celle développée dans l'étude précédente sur l'ACC, en utilisant un échantillon de cas d'accidents défini. Cette analyse repose sur la base de données nationale déjà utilisée pour l'étude qualitative présentée au chapitre IV, afin d'assurer une représentativité accrue des résultats. Les résultats de cette étude qualitative indiquent que l'AEB pourrait influencer 30,1 % des 1000 cas d'accidents représentés par cette base. Par conséquent une extrapolation des données issues de l'échantillon de 82 cas d'accidents analysés a été effectuée pour estimer cet impact à une échelle nationale (301 cas).

Des tests de normalité ont été réalisés sur l'échantillon de 82 cas afin de valider l'hypothèse selon laquelle les données suivent une loi normale. Les résultats sont les suivants :

- Test de Shapiro-Wilk : valeur de 0,11
- Test de Kolmogorov-Smirnov : valeur de 0,2

Ces deux valeurs, étant supérieures au seuil de 5 % (0,05), permettent de rejeter l'hypothèse nulle. Par conséquent, les données de l'échantillon peuvent être considérées comme suivant une loi normale.

Pour déterminer l'influence de l'AEB sur les blessés graves, les étapes suivantes ont été suivies :

a) Représentation des données : Les histogrammes de distribution des accidents en fonction de la vitesse d'impact ont été tracés pour l'échantillon.
b) Extrapolation nationale : La distribution des accidents a été extrapolée à l'échelle nationale en considérant le taux d'influence de l'AEB, soit 30,1 % (301 cas sur 1000).
   Lissage des données : À l'aide de la fonction « *nls* » dans R (Baty et al., 2015), un lissage des données a été réalisé pour obtenir une fonction continue représentant la distribution des accidents en fonction de la vitesse d'impact, avec et sans AEB (figure VIII.3 : La courbe en trait plein rouge représente l'échantillon sans AEB, tandis que la courbe rose illustre l'échantillon avec AEB).
c) Calcul des proportions de blessés grave dans chaque échantillon : Ces courbes ont été multipliées par la courbe de risque (figure VIII.3, trait plein bleu) pour produire deux nouvelles courbes représentant la proportion de blessés graves (MAIS3+) en fonction de la vitesse d'impact, avec et sans AEB (figure VIII.3 : Les courbes en traits discontinus rouge pour l'échantillon sans AEB et rose pour l'échantillon avec AEB).
d) Calcul du bénéfice : La différence en pourcentage entre les aires sous les deux courbes (avec et sans AEB) illustre l'influence de cette technologie en termes de réduction des blessés graves (figure VIII.4).

Cette méthodologie permet ainsi de quantifier l'effet bénéfique de l'AEB sur les blessés graves (type MAIS3+) en s'appuyant sur une analyse rigoureuse des données et une extrapolation pertinente à l'échelle nationale.

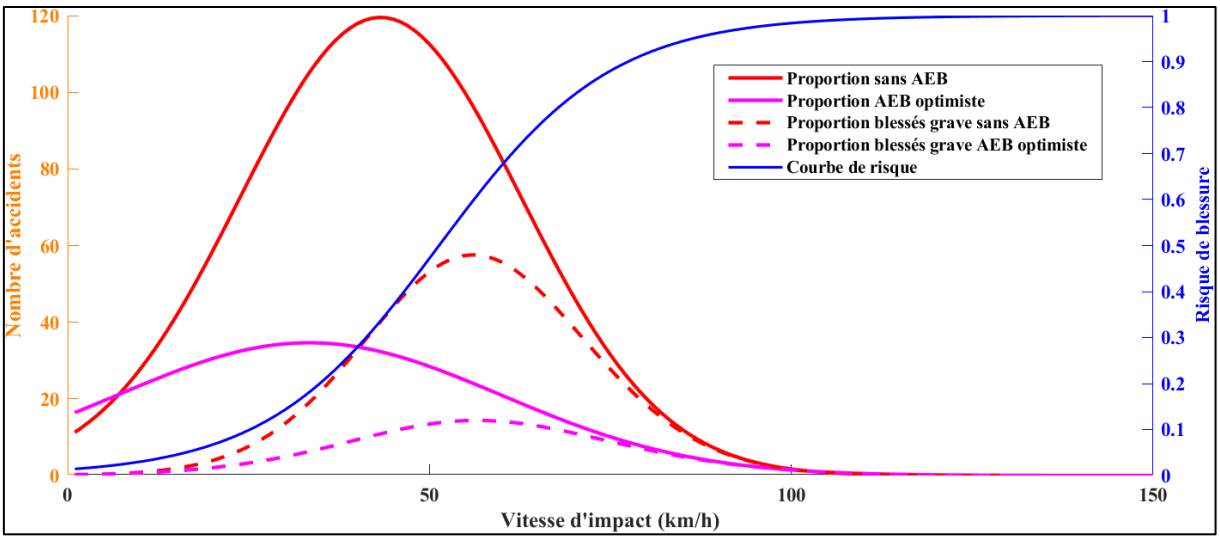


Figure VIII. 3. Graphique méthodologique du calcul de l'influence de l'AEB sur les blessés graves

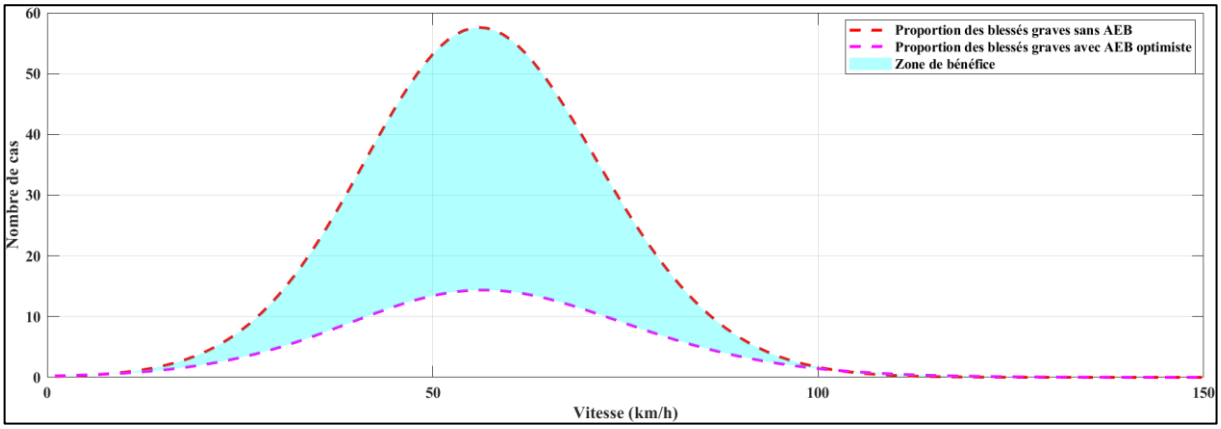


Figure VIII. 4. Bénéfice de l'AEB sur les blessés graves

VIII.3 Résultats de l'étude

VIII.3.1 Analyse paramétrique

Pour synthétiser les résultats des 82 accidents analysés, une étude des valeurs médianes des réductions de la vitesse d'impact a été réalisée pour chacune des 225 configurations possibles (figure VIII.5). Les résultats montrent que l'AEB s'est avéré efficace dans toutes les configurations, avec des réductions de vitesse d'impact allant de 2,5 km/h à 38,9 km/h, illustrant ainsi le potentiel de cette technologie pour atténuer les accidents.

- Effet des paramètres sur la réduction de vitesse

Les analyses ont mis en évidence que les paramètres de décélération et de stratégie de déclenchement jouent un rôle décisif dans l'efficacité de l'AEB. En effet, les variations entre les niveaux de ces paramètres entraînent des différences significatives dans les réductions de vitesse médianes.

En revanche, les paramètres de portée et de champ de vision semblent présenter un effet de saturation. Au-delà d'un certain seuil, l'impact de l'AEB sur la réduction de la vitesse devient marginal.

- Paramètres de décélération et stratégie de déclenchement

Avec une décélération de 3 m/s² combinée à une stratégie conservative, un point de saturation est observé à une portée de 60 m et un champ de vision de 40°.

Ce comportement se répète dans d'autres configurations :

- Pour une décélération de 5 m/s² et 7 m/s², avec une stratégie conservative.
- Avec une décélération de 3 m/s², couplée à une stratégie standard.

Une deuxième saturation est identifiée à une portée de 45 m et un champ de vision de 40°, dans les cas suivants :

- Stratégie standard avec une décélération de 5 m/s².
- Stratégie progressive pour des décélérations de 3 m/s² et 5 m/s².

Avec une décélération de 7 m/s², associée aux stratégies standard ou progressive, les points de saturation deviennent plus difficiles à déterminer précisément. Cependant, ces configurations n'ont pas été prises en compte dans les analyses ultérieures en raison des contraintes pratiques sur les décélérations maximales acceptables.

➢ Sélection des configurations pour les analyses approfondies

Sur la base des points de saturation identifiés, ainsi que des recommandations issues d'études antérieures (Marra et al., 2021; Lucci et al., 2020, 2022b), une décélération maximale acceptable de 5 m/s² a été retenue. Cette limite, combinée aux analyses précédentes, a permis de définir un ensemble restreint de configurations pour approfondir l'évaluation des bénéfices de l'AEB.

Les configurations sélectionnées incluent :

- Portées : 45 m et 60 m.
- Champs de vision : 40°.
- Décélérations : 3 m/s² et 5 m/s².
- Stratégies de déclenchement : Conservative (C), Standard (S), et Progressive (P).

Ces paramètres aboutissent à 12 configurations spécifiques, qui sont examinées en détail dans la suite de l'analyse pour évaluer les bénéfices de l'AEB sur la réduction de la vitesse d'impact et, par conséquent, sur l'évitement et l'atténuation de l'impact.

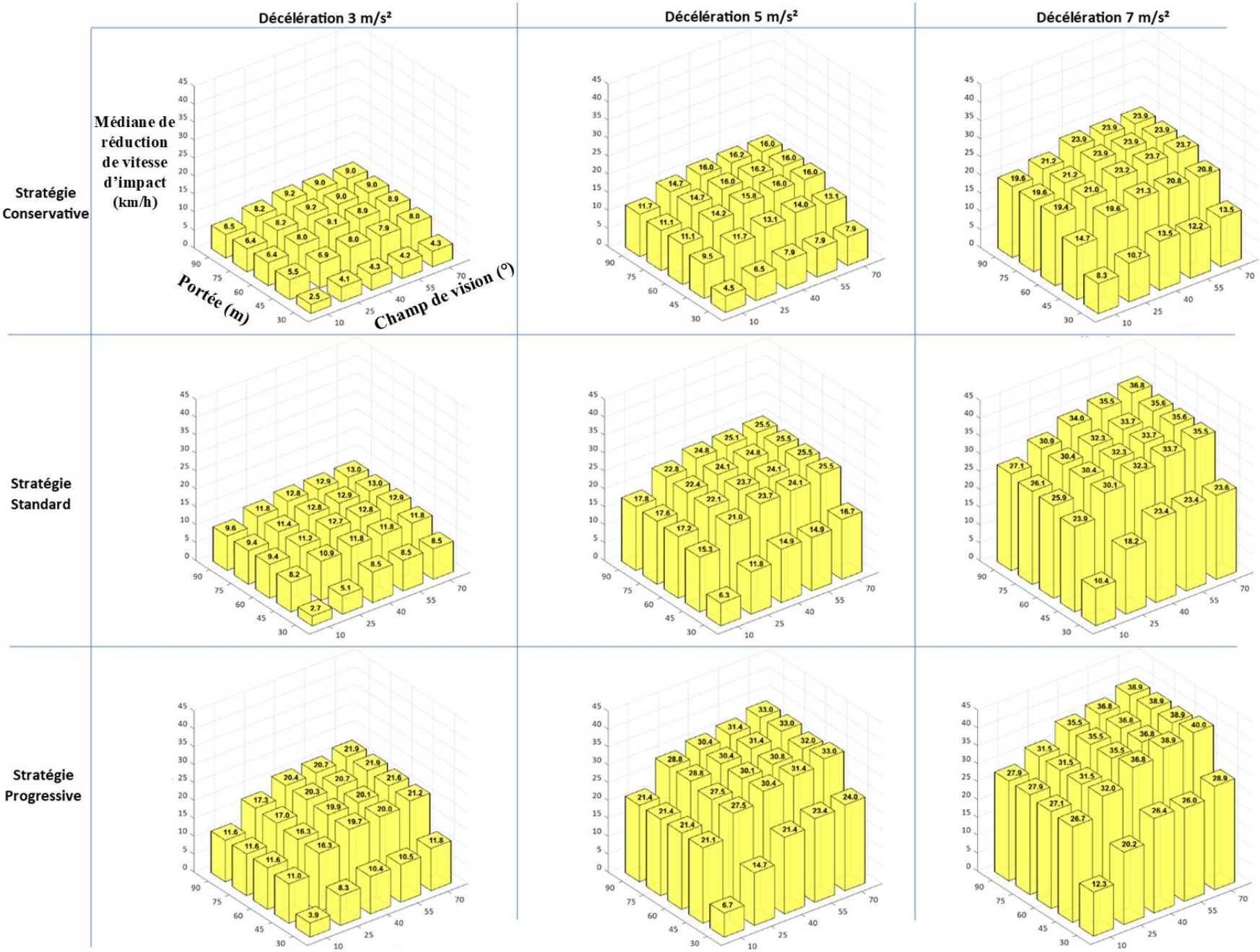


Figure VIII. 5. Influence des paramètres AEB sur la réduction de la vitesse d'impact médiane pour 82 accidents

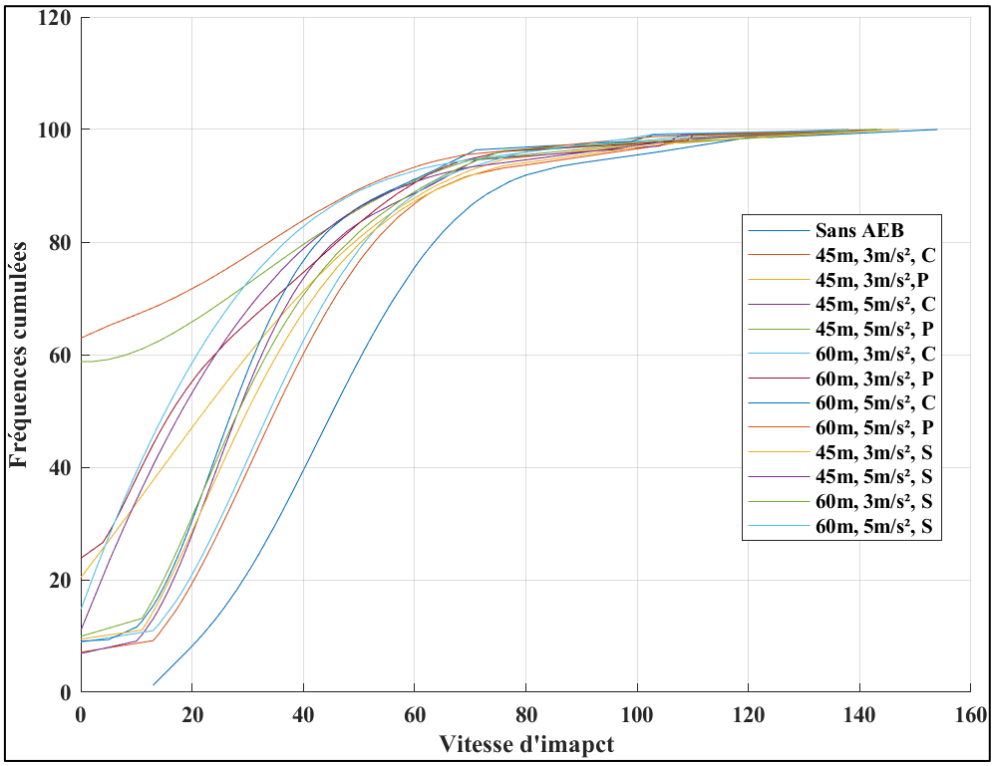


Figure VIII. 6. Bénéfices estimés des 12 configurations AEB sélectionnées pour tous les cas d'accident.

Pour les 12 configurations sélectionnées, les fréquences cumulées des accidents en fonction de leur vitesse d'impact ont été calculées, comme illustré à la figure VIII.6. Ces résultats mettent en évidence des taux d'évitement des accidents, correspondant à une vitesse d'impact nulle, variant de 7% à 63%, selon la configuration étudiée. Ces pourcentages reflètent l'efficacité de l'AEB, allant de la configuration la plus pessimiste à la plus optimiste.

➢ Regroupement des configurations selon les taux d'évitement

Trois groupes principaux de configurations ont été identifiés, chacun caractérisé par un taux d'évitement distinct :

- Premier groupe : Autour de 10%.
- Deuxième groupe : Autour de 20%.
- Troisième groupe : Autour de 60%.

Cependant, il est intéressant de noter que certaines configurations appartenant à des groupes différents présentent des points de convergence à des vitesses d'impact spécifiques. Par exemple :

Les configurations (45 m, 3 m/s², Progressive) avec un taux d'évitement de 20%, et (45 m, 3 m/s², Standard) avec un taux d'évitement de 9%, convergent autour d'une vitesse d'impact de 50 km/h.

➢ Réduction des vitesses d'impact avec l'AEB

Même dans la configuration la plus pessimiste, l'AEB a permis de limiter la gravité des accidents. Les résultats montrent que :

- 40% des accidents surviennent à des vitesses supérieures à 40 km/h avec l'AEB, contre 60% sans AEB.
- Au-delà de 60 km/h, l'écart de pourcentage entre la configuration la plus optimiste et la plus pessimiste diminue à moins de 10%, avec des fréquences cumulées d'accidents allant de 9% à 12% au-dessus de la valeur sans AEB.

À partir de 80 km/h, les courbes des fréquences cumulées pour toutes les configurations avec l'AEB deviennent très proches les unes des autres, indiquant une réduction marginale des bénéfices par rapport à l'absence d'AEB.

Enfin, au-delà de 120 km/h, l'impact de l'AEB sur les accidents devient négligeable, quelle que soit la configuration étudiée. Pour la suite des analyses des résultats de l'AEB, une attention particulière a été portée aux configurations les plus pessimiste et optimiste, afin d'évaluer à la fois les limites minimales de performance du système et son potentiel maximal dans des conditions idéales. Cette approche permet de mieux comprendre l'étendue des bénéfices possibles de l'AEB, d'identifier les scénarios critiques nécessitant des améliorations, et de guider le développement futur de stratégies d'activation et de conception du système.

VIII.3.2 Bénéfices de l'AEB en configuration pessimiste

❖ Tous les accidents

La figure VIII.7 illustre un graphique de fréquence cumulée représentant les performances de l'AEB dans sa configuration la plus pessimiste, caractérisée par une portée de 45 m, un champ de vision de 40°, une décélération de 3 m/s² et une stratégie de déclenchement conservative. Même dans cette configuration défavorable, environ 7% des accidents analysés pourraient être évités grâce à l'AEB. Une analyse approfondie révèle que près de 60% des accidents sont soit évités, soit survenus à une vitesse d'impact inférieure à 40 km/h. Ce résultat contraste nettement avec les vitesses d'impact initiales des mêmes accidents, où seulement 45% des cas étaient enregistrés à des vitesses égales ou inférieures à 40 km/h.

Par ailleurs, l'efficacité de l'AEB dans cette configuration est également notable pour les accidents impliquant des vitesses d'impact supérieures à 60 km/h. Environ 13% seulement des accidents se situent dans cette plage de vitesse, ce qui représente une réduction par rapport aux conditions initiales sans AEB, où 26 % des accidents, soit le double, présentaient des vitesses d'impact dépassant 60 km/h. Cependant, les bénéfices de l'AEB diminuent sensiblement lorsque les vitesses d'impact dépassent les 80 km/h. Dans ces conditions, le système ne parvient plus à offrir une réduction significative des vitesses d'impact, soulignant ainsi les limites de cette configuration pour les scénarios d'accidents les plus graves.

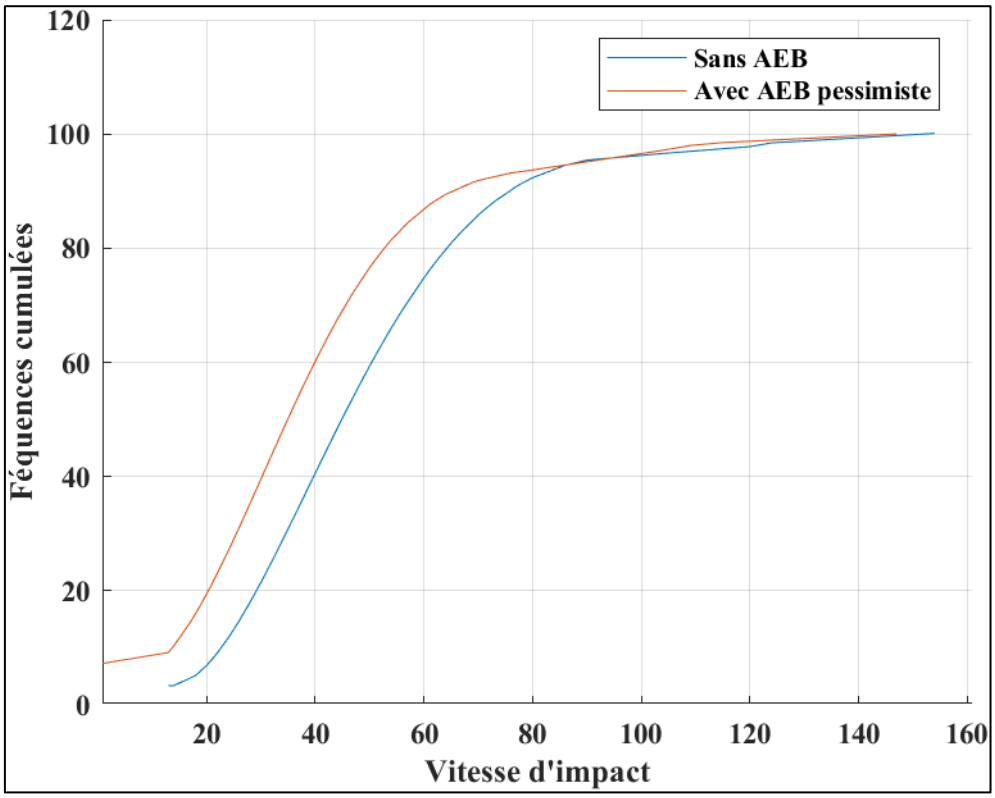


Figure VIII. 7. Bénéfice estimé de la configuration la plus pessimiste pour tous les accidents. Nombre de cas = 82 cas.

❖ Les accidents non évités avec une configuration pessimiste de l'AEB

Dans la configuration la plus pessimiste de l'AEB, une analyse spécifique a été menée pour évaluer son bénéfice sur les accidents non évités. La figure VIII.8 illustre cette dynamique, mettant en évidence une redistribution des vitesses d'impact. L'un des résultats les plus marquants est la diminution notable du nombre d'accidents à des vitesses élevées. Ces accidents, bien que non évitables, sont reclassés à des vitesses d'impact inférieures grâce à l'activation de l'AEB. En effet, environ 63% des accidents non évités dans cette configuration surviennent à une vitesse inférieure ou égale à 40 km/h. Ce chiffre contraste nettement avec le scénario sans AEB, où seulement 40% des accidents se trouvent dans cette même tranche de vitesse, soit une amélioration de plus de 20%.

De manière similaire, l'effet bénéfique de l'AEB est également observé pour les accidents se produisant à des vitesses supérieures à 60 km/h. Dans cette configuration, seulement 20% des accidents non évités surviennent à ces vitesses, contre 24% dans le scénario sans AEB. Bien que cette réduction semble plus modeste, elle souligne tout de même une amélioration, même dans des conditions peu favorables. Cependant, à des vitesses d'impact supérieures à 80 km/h, l'effet de l'AEB devient négligeable. À ce seuil, le bénéfice observé sur les accidents non évités devient marginal, rejoignant les observations faites dans le graphe précédent des fréquences cumulées pour l'ensemble des accidents.

Ces résultats, bien qu'obtenus dans des conditions pessimistes pour l'AEB, confirment son efficacité partielle. Ils mettent en évidence une réduction des vitesses d'impact pour les accidents non évitables, améliorant potentiellement les chances de survie et diminuant la gravité des blessures. Cette analyse apporte une perspective importante sur l'impact réel de cette technologie, même dans des scénarios défavorables.

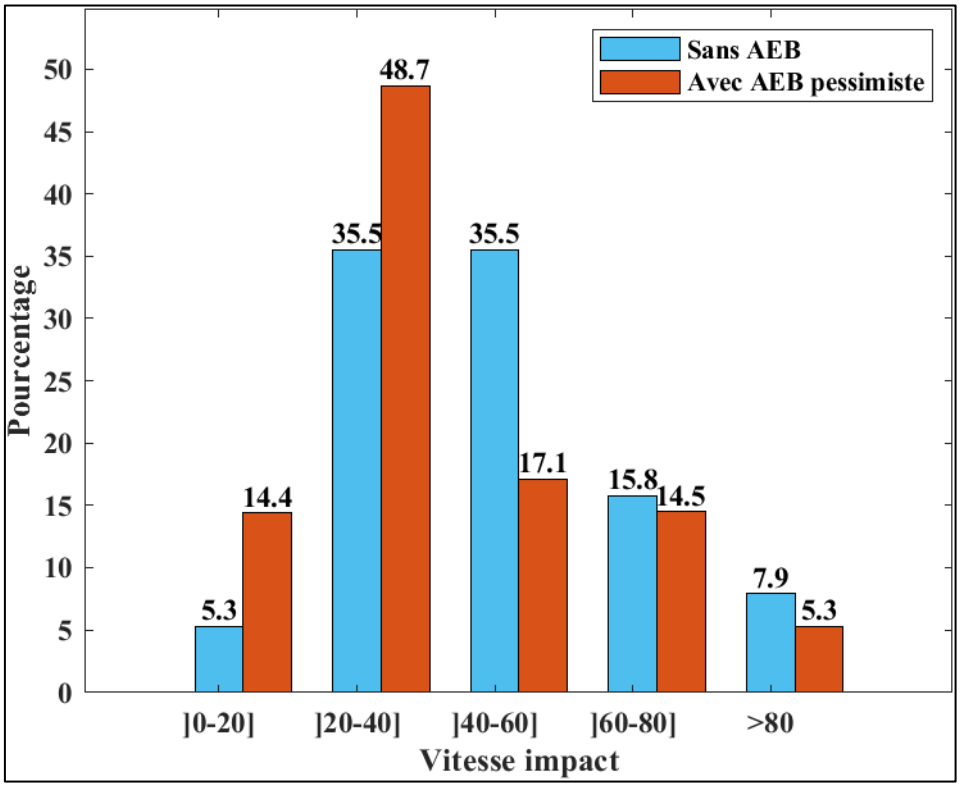


Figure VIII. 8. Répartition des cas d'accidents non évitables avec une configuration pessimiste de l'AEB, en fonction de leur vitesse d'impact, comparée à la répartition sans AEB. Nombre de cas = 75 cas.

VIII.3.3 Bénéfices de l'AEB en configuration optimiste

❖ Tous les accidents

Dans la configuration la plus optimiste du système de l'AEB, définie par une distance initiale de 60 m, un angle de détection de 40°, une décélération de 5 m/s², et une stratégie de freinage progressive, des résultats remarquables ont été obtenus sur l'échantillon d'accidents analysé. Le graphe de fréquence cumulée correspondant (figure VIII.9) illustre que cette configuration permet d'éviter environ 63% des accidents étudiés, mettant ainsi en évidence le potentiel du système avec des paramètres maximaux.

Une analyse plus approfondie révèle que près de 84% des accidents dans cette configuration sont soit totalement évités, soit se produisent à une vitesse d'impact inférieure ou égale à 40 km/h. Ce résultat marque une amélioration notable par rapport à la situation initiale sans AEB, où seulement 40% des accidents présentaient une vitesse d'impact inférieure ou égale à 40 km/h.

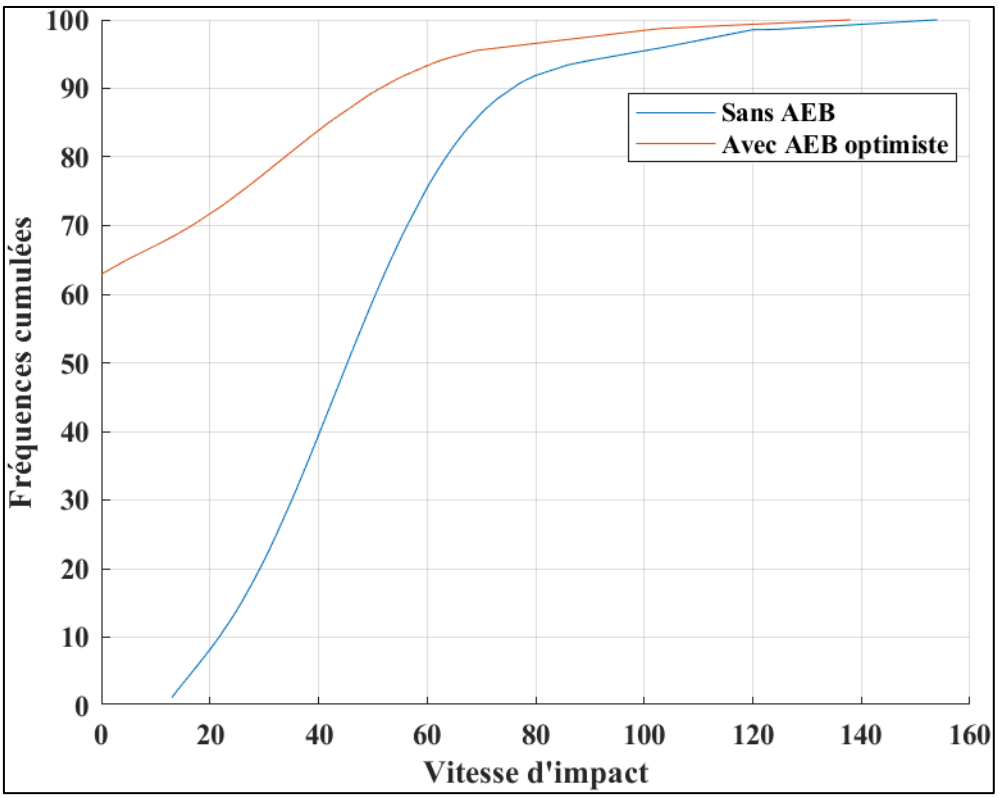


Figure VIII. 9. Bénéfice estimé de la configuration la plus optimiste pour tous les accidents. Nombre de cas = 82 cas.

Par ailleurs, moins de 10% des accidents dans cette configuration optimiste se produisent à des vitesses d'impact supérieures à 60 km/h. En comparaison, dans les conditions initiales sans AEB, cette proportion s'élève à 25%, ce qui démontre une réduction importante du nombre d'accidents graves à haute vitesse. De manière notable, même à une vitesse de 80 km/h, l'AEB continue de présenter des bénéfices. Une différence d'environ 5% est observée entre les pourcentages d'accidents avec et sans AEB à cette vitesse, ce qui souligne la robustesse du système pour atténuer les risques même dans des situations exigeantes.

Cependant, il est important de noter qu'à partir de 120 km/h, l'AEB ne semble plus offrir d'améliorations en termes de réduction vitesse d'impact. Cette limite met en évidence les contraintes inhérentes à la performance du système dans des scénarios de vitesse très élevée.

❖ Les accidents non évitables avec une configuration optimiste

La figure VIII.10 illustre les bénéfices apportés par la configuration la plus optimiste de l'AEB, spécifiquement pour les accidents considérés comme non évitables dans l'échantillon analysé. Cette configuration permet de réduire de manière importante les vitesses d'impact des accidents non évités en les redistribuant vers des plages inférieures.

Environ 53% des accidents non évitables se produisent désormais à des vitesses d'impact inférieures ou égales à 40 km/h. Ce résultat marque une nette amélioration par rapport au scénario sans AEB, où seulement 13% des accidents non évitables concernaient cette plage de vitesses, soit une augmentation de plus de 40%. Ce déplacement des vitesses vers des seuils plus faibles reflète l'efficacité de l'AEB dans la réduction des vitesses d'impact, même lorsque la collision ne peut être évitée.

De plus, la proportion d'accidents non évitables à des vitesses supérieures à 60 km/h est réduite à environ 23% avec l'AEB, contre 43% sans activation du système. Cette réduction de 20% témoigne de la capacité de l'AEB à modérer les vitesses d'impact dans des situations critiques, offrant ainsi une possibilité d'atténuer les conséquences de l'accident. En outre, il est important de noter que, comme dans les résultats globaux présentés précédemment, l'effet bénéfique de l'AEB reste perceptible jusqu'à des vitesses d'environ 80 km/h. Au-delà de cette limite, les gains apportés par le système deviennent moins marqués.

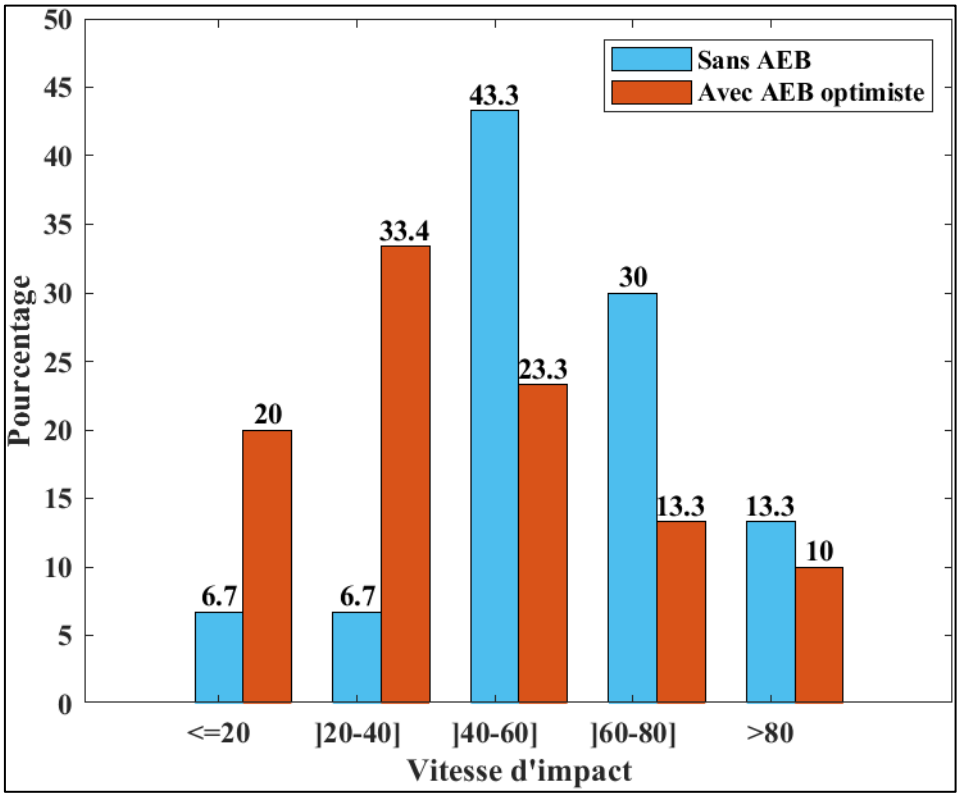


Figure VIII. 10. Répartition des cas d'accidents non évitables avec une configuration optimiste de l'AEB, en fonction de leur vitesse d'impact, comparée à la répartition sans AEB.
Nombre de cas = 30 cas

VIII.3.4 Bénéfice de l'AEB sur les blessés graves

Cette dernière section de présentation des résultats porte sur les bénéfices apportés par l'AEB en termes de réduction des blessés graves de type MAIS3+ dans les accidents impliquant des 2RM. Dans la continuité des analyses effectuées dans les sections précédentes, l'évaluation des bénéfices de cette technologie sur les blessés graves a été réalisée en considérant les configurations les plus pessimiste et optimiste.

La méthodologie décrite dans la section « VIII.2.2 » a été appliquée aux échantillons correspondant à chacune des configurations. Pour garantir une meilleure représentativité des résultats, les données issues des différents échantillons ont été extrapolées à l'ensemble de la base de données nationale. Cette base, comme indiqué précédemment, identifie 301 cas d'accidents susceptibles d'être influencés par l'AEB parmi les 1000 cas recensés.

Afin de rendre cette présentation plus claire et structurée, l'organisation suivante a été adoptée :

a) Distribution des accidents en fonction de la vitesse d'impact : Une analyse comparative a été effectuée pour les échantillons des configurations la plus pessimiste et la plus optimiste.
b) Réduction des blessés graves : Les résultats obtenus en termes de diminution du nombre de blessés graves ont été exposés pour chacune des configurations.

VIII.3.4.1 Distribution des accidents en fonction de la vitesse d'impact

L'analyse de la distribution des accidents en fonction des vitesses d'impact, avant et après l'utilisation de l'AEB, révèle des tendances remarquables quant à la réduction des cas, notamment lorsqu'une extrapolation des données est effectuée à l'échelle nationale (figure VIII.11). En l'absence d'AEB, la base de données nationale identifie un total de 301 accidents. La répartition selon les intervalles de vitesse montre 18 cas dans la plage]0-20] km/h, 103 cas dans la plage]20-40] km/h, et 106 cas dans la plage]40-60] km/h, représentant une majorité des accidents. Dans les plages de vitesse plus élevées, 51 cas sont enregistrés pour]60-80] km/h, 8 cas pour]80-100] km/h, et 15 cas pour des vitesses supérieures à 100 km/h.

Avec l'introduction de l'AEB dans sa configuration pessimiste, une réduction de 26 cas est observée (26 cas ont été évités), aboutissant à un total de 275 accidents. La distribution change sensiblement : 29 cas sont enregistrés dans la plage]0-20] km/h, tandis que la majorité des cas sont concentrés dans la plage]20-40] km/h avec 132 cas, reflétant une redistribution des vitesses d'impact vers des valeurs inférieures. La plage]40-60] km/h enregistre une diminution notable à 59 cas, et celle de]60-80] km/h à 40 cas. Aucun cas n'est observé dans la

plage]80-100] km/h, tandis que les cas pour des vitesses supérieures à 100 km/h restent inchangés à 15 cas.

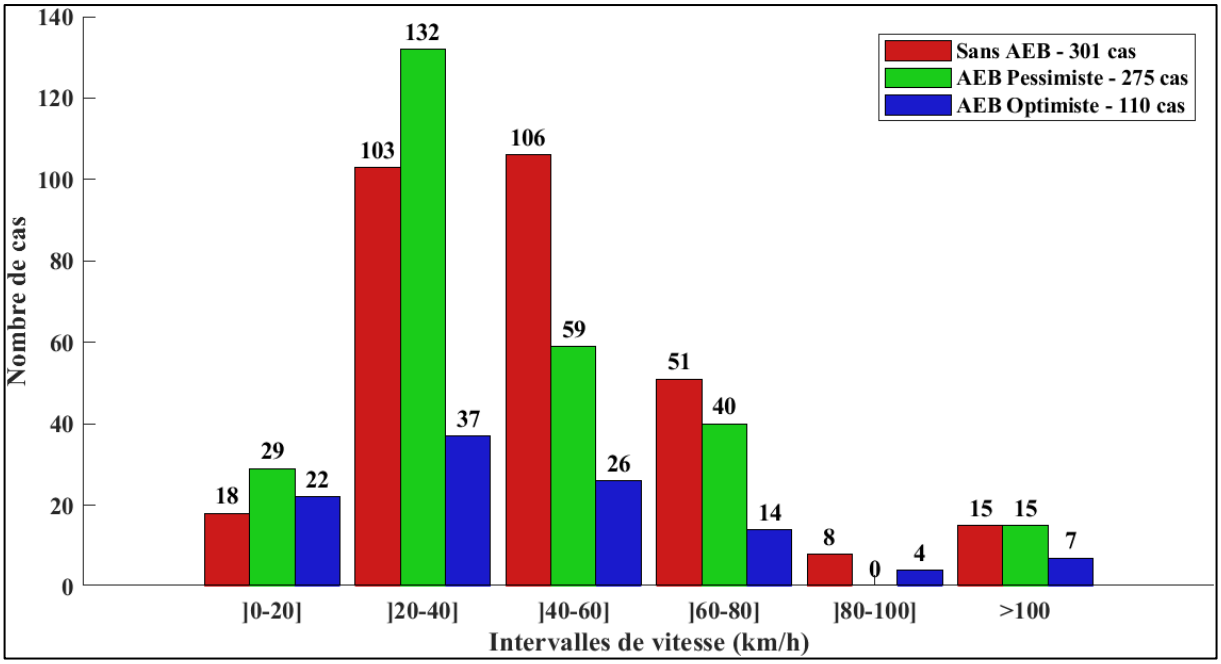


Figure VIII. 11. Distribution des accidents en fonction de la vitesse d'impact sans AEB et avec AEB dans les configurations pessimistes et optimiste

Avec l'AEB configuré de manière optimiste, en revanche, une réduction importante des accidents est constatée, aboutissant à un total de 110 cas, soit une diminution de 191 accidents par rapport à la situation initiale sans AEB. Dans cette configuration, la répartition montre 22 cas dans la plage]0-20] km/h, 37 cas dans la plage]20-40] km/h, et 26 cas dans la plage]40-60] km/h. Pour les vitesses plus élevées, 14 cas sont recensés dans la plage]60-80] km/h, 4 cas dans la plage]80-100] km/h, et seulement 7 cas pour des vitesses supérieures à 100 km/h.

Comme il a été indiqué dans la description de la méthodologie de calcul de bénéfice de l'AEB, des tests de normalité ont été effectué pour chaque échantillon :

- Échantillon sans AEB :
  - Test de Shapiro-Wilk : valeur de 0,11
  - Test de Kolmogorov-Smirnov : valeur de 0,2
- Échantillon avec AEB pessimiste :
  - Test de Shapiro-Wilk : valeur de 0,27
  - Test de Kolmogorov-Smirnov : valeur de 0,2
- Échantillon avec AEB optimiste :
  - Test de Shapiro-Wilk : valeur de 0,89
  - Test de Kolmogorov-Smirnov : valeur de 0,2

Les résultats obtenus sur les tests de normalité sont supérieurs au seuil de 0,05, et ils permettent de conclure que ces échantillons peuvent suivre une loi normale. Il est donc possible d'utiliser le modèle de Gausse pour tracer la distribution continue de ces échantillons.

La figure VIII.12 illustre les trois courbes de Gausse qui correspondent aux différentes distributions des accidents dans chaque échantillon. Chaque courbe représente les fréquences d'accidents en fonction des vitesses d'impact associées, permettant ainsi de caractériser les

échantillons. La première courbe (en rouge), correspondant à l'échantillon sans AEB, présente une distribution centrée autour d'une vitesse de 43 km/h. Cette courbe met en évidence une concentration notable des accidents à des vitesses modérées. Dans le second échantillon (AEB pessimiste, courbe en vert), la courbe de distribution se déplace légèrement vers la gauche, indiquant une distribution centrée autour d'une vitesse de 30 km/h, avec une dispersion relativement faible. Ce déplacement traduit l'effet de l'AEB dans cette configuration sur l'échantillon analysé. Enfin, le troisième échantillon (AEB optimiste, courbe en bleu) présente une courbe avec une distribution centrée autour d'une vitesse de 33 km/h, avec une dispersion beaucoup plus importante autour de la vitesse moyenne, indiquant que la technologie de l'AEB dans cette configuration optimiste a une influence sur un intervalle de vitesse d'impact plus grande.

Les gaussiennes calculées pour ces nouvelles distributions reflètent fidèlement les distributions observées (équations, VIII.1, VIII.2, VIII.3) :

- Sans AEB : avec un $R^2 = 0{,}96$,

$$f(x) = 119.54 \times e^{\left(-0.5\left(\frac{(x-43{,}26)}{19{,}44}\right)^2\right)} \qquad Eq\ \text{VIII. 1}$$

- AEB pessimiste : avec un $R^2 = 0.86$,

$$f(x) = 131{,}8 \times e^{\left(-0.5\left(\frac{(x-33{,}4)}{14{,}21}\right)^2\right)} \qquad Eq\ \text{VIII. 2}$$

- AEB optimiste : avec un $R^2 = 0.93$,

$$f(x) = 34{,}64 \times e^{\left(-0.5\left(\frac{(x-33{,}4)}{26{,}5}\right)^2\right)} \qquad Eq\ \text{VIII. 3}$$

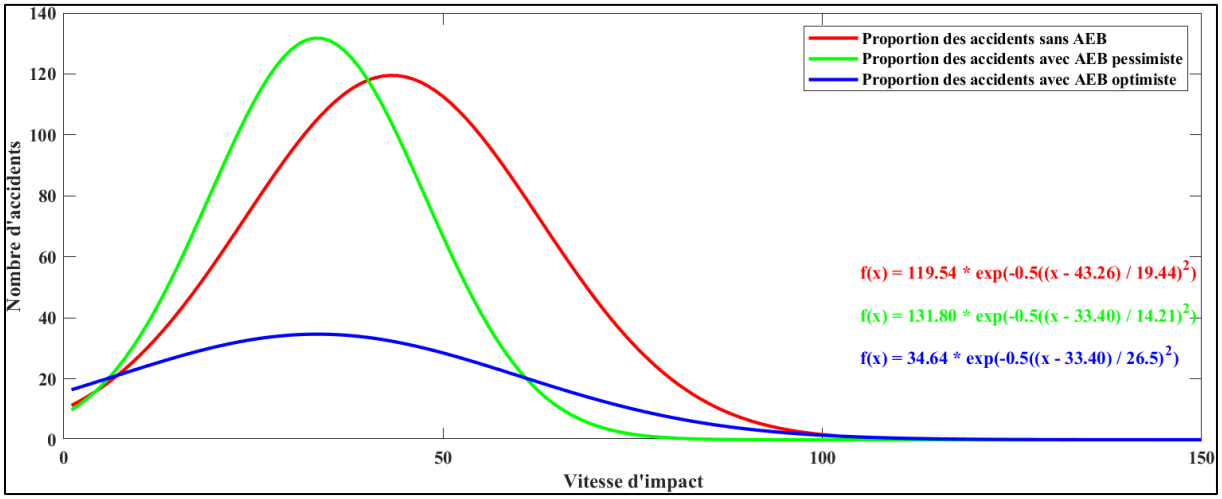


Figure VIII. 12. Les trois courbes de distribution des accidents en fonction des vitesses d'impact avec et sans AEB.

VIII.3.4.2 Calcul des bénéfices sur les blessés graves

L'analyse des résultats révèle que, parmi les accidents concernés par l'AEB, 39% impliquent des blessés graves. Ce pourcentage a été déterminé en comparant la proportion des accidents et celle des blessés graves en fonction des vitesses d'impact dans des scénarios sans assistance.

L’évaluation des effets de l’AEB dans les deux configurations extrêmes, qualifiées de "pessimiste" et "optimiste", met en évidence une réduction importante de la gravité des blessures. Dans le cas pessimiste, l’utilisation de l’AEB entraîne une diminution de 50% des blessés graves (Figure VIII.13), tandis que, dans le cas optimiste, cette réduction atteint 70% (Figure VIII.14). Ces résultats confirment l’efficacité de l’AEB pour réduire la gravité des blessures dans les accidents impliquant des 2RM.

Les pourcentages de bénéfice de l'AEB ont été calculés en comparant les aires sous les courbes représentant les proportions de blessés graves dans différentes configurations. Cette méthode permet d'évaluer l'efficacité du système AEB de manière globale :

- Pour la configuration pessimiste : La réduction est mesurée par la différence entre l'aire sous la courbe des blessés graves sans AEB (en pointillés rouges) et celle avec l'AEB pessimiste (en pointillés verts).
- Pour la configuration optimiste : La réduction est obtenue en comparant l'aire sous la courbe sans AEB à celle avec l'AEB optimiste (en pointillés violets).

Ces calculs s'appuient sur une extrapolation des distributions d'accidents selon des scénarios spécifiques, adaptés au domaine d'application de l'AEB. Une analyse élargie, prenant en compte l’ensemble des accidents de 2RM, a permis d’estimer le bénéfice global de l’AEB. Selon les résultats du chapitre IV, cette technologie pourrait intervenir dans 30,1% des cas d’accidents. Parmi ces accidents, 39% impliquent des blessés graves, et l’AEB permettrait de réduire ce taux de 50% dans la configuration la plus pessimiste et de 70% dans la configuration la plus optimiste :

- En configuration pessimiste : $30{,}1\% \times 39\% \times 50\% = 6\%$
- En configuration optimiste : $30{,}1\% \times 39\% \times 70\% = 8{,}2\%$

Ces estimations indiquent que l’AEB pourrait réduire de manière globale la gravité des blessures de 6% dans la configuration la plus pessimiste et de 8,2% dans la plus optimiste, en considérant tous les types d’accidents impliquant des 2RM sur le territoire national français.

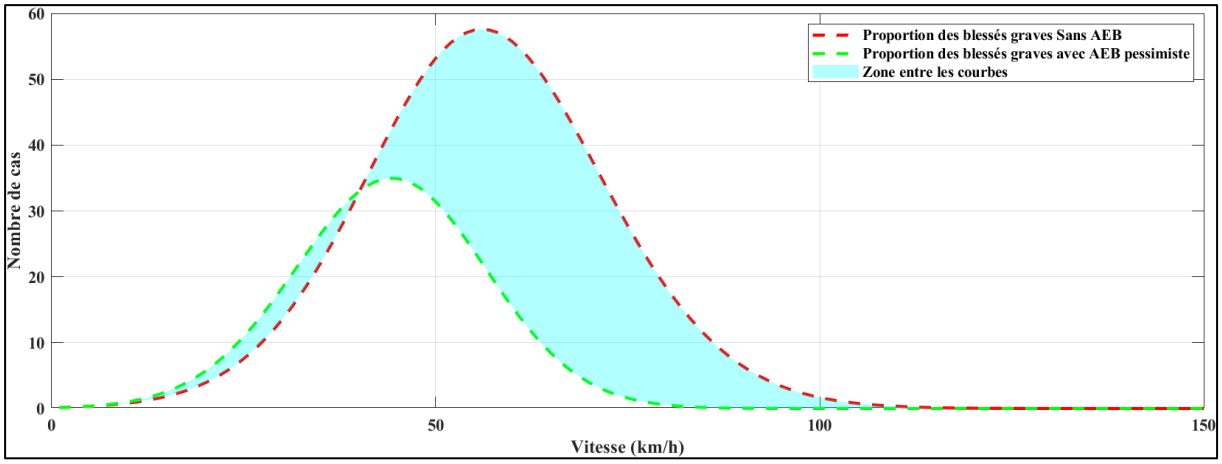


Figure VIII. 13. Bénéfice de l'AEB sur les blessés graves dans la configuration la plus pessimiste.

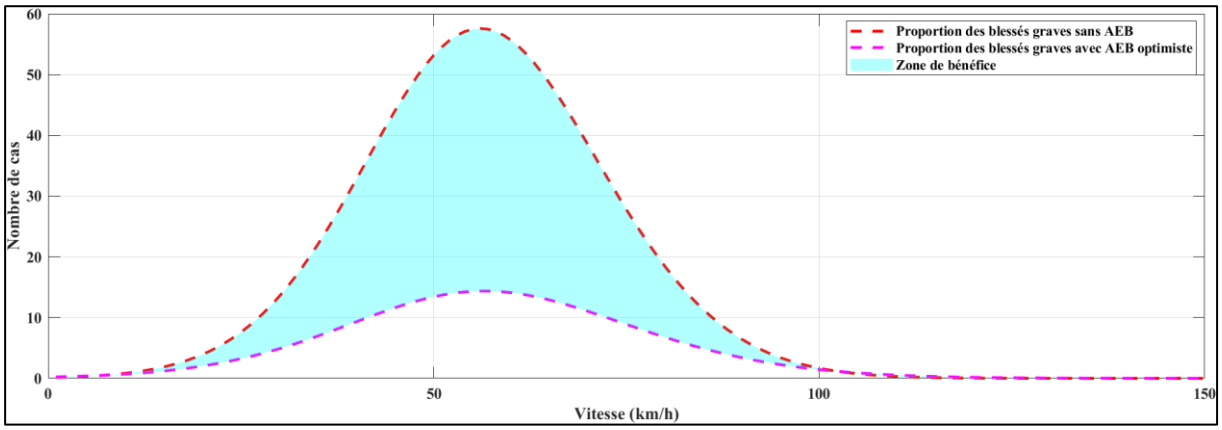


Figure VIII. 14. Bénéfice de l'AEB sur les blessés graves dans la configuration la plus optimiste

VIII.4 Discussions

L'analyse des 82 accidents montre clairement l'efficacité de l'AEB dans la réduction de la vitesse d'impact, allant de 2,5 km/h à 38,9 km/h selon la configuration. Cette large amplitude illustre le potentiel de cette technologie pour atténuer les conséquences des accidents, mais met également en lumière l'influence déterminante des paramètres d'entrée sur ses performances. Parmi ces paramètres, la décélération et la stratégie de déclenchement se distinguent comme des facteurs importants, leurs variations ayant des effets importants sur les réductions de vitesses observées. Ces deux paramètres interagissent de manière complexe avec les paramètres de portée et de champ de vision, qui présentent des phénomènes de saturation. Ces points de saturation indiquent qu'au-delà de seuils spécifiques (45 m et 60 m pour la portée, 40° pour le champ de vision), les gains supplémentaires de réduction de vitesse deviennent négligeables, ce qui suggère que l'optimisation des paramètres doit tenir compte de ces limites.

Les résultats révèlent que les configurations associant une décélération de 3 m/s² et une stratégie conservative atteignent un plateau de performance pour une portée de 60 m et un champ de vision de 40°. Ce comportement est également observé pour des décélérations de 5 m/s² et 7 m/s² dans des configurations similaires, bien que l'identification précise des seuils devienne plus complexe pour des décélérations élevées en raison de contraintes pratiques. Des observations similaires ont été faites pour des stratégies standard et progressive, où une saturation secondaire apparaît à une portée de 45 m et un champ de vision de 40°, notamment pour des décélérations de 3 m/s² et 5 m/s². L'analyse des configurations sélectionnées a permis de conclure que la stratégie dite « progressive », caractérisée par une faible décélération et un déclenchement précoce, s'avère souvent plus performante que les autres stratégies. Ces observations soulignent que la performance optimale de l'AEB ne repose pas uniquement sur la maximisation des réductions de vitesse, mais également sur une gestion équilibrée des paramètres pour préserver la sécurité ou le confort du conducteur.

Les bénéfices de l'AEB ont été analysés à travers deux configurations extrêmes, qualifiées de "pessimiste" et "optimiste". Cette démarche permet d'évaluer l'efficacité potentielle de cette technologie dans une gamme de scénarios réalistes tout en intégrant les

incertitudes liées à ses performances en conditions réelles. Les résultats obtenus montrent une contribution de l'AEB dans la prévention des accidents, ainsi que dans la réduction de leur gravité.

Dans la configuration pessimiste, l'AEB a permis d'éviter 7% des collisions, et les collisions non évitées se produisent à vitesse inférieure, puisqu'on observe une réduction d'environ 20% du nombre de collisions à une vitesse d'impact supérieur à 40 km/h. En configuration optimiste, les performances de l'AEB se sont révélées bien supérieures : 63% des accidents ont été évités, et parmi les collisions restantes, une diminution de 40% des impacts à une vitesse supérieur à 40 km/h a été constatée. Ces résultats mettent en évidence une différence de 56% du taux d'évitement des accidents et une réduction supplémentaire de 17% des collisions à faible vitesse entre les deux configurations.

D'un point de vue statistique, les tests confirment la robustesse de ces résultats. Une analyse de variance (ANOVA) a révélé des différences significatives entre les groupes analysés (sans AEB, avec AEB pessimiste, avec AEB optimiste) ($F = 32.8$, $p < 0.001$), démontrant que l'AEB réduit de manière significative les vitesses d'impact. Le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a corroboré ces conclusions (Chi-deux = 67.55, $p < 0.001$), tandis que les analyses post-hoc de Tukey ont indiqué des réductions significatives des vitesses d'impact entre tous les groupes, le scénario optimiste affichant les bénéfices les plus importants.

Ces tendances concordent avec d'autres études sur l'AEB, qui mettent en évidence des réductions de vitesse variables mais généralement bénéfiques. Par exemple, des réductions de 14,4 km/h, 11,6 km/h, 10% et 10 km/h ont été rapportées respectivement dans les études de Savino et al. (2013a), Naude et al. (2022), Savino et al. (2014), Savino et al. (2013b) et Savino et al. (2016a). Toutefois, des divergences dans les résultats entre ces différentes études ont été observées, ce qui peut être attribué à divers facteurs. Une analyse approfondie révèle que ces écarts proviennent notamment des types d'accidents étudiés et des systèmes de freinage considérés. Par exemple, dans les études de Savino et al. (2013a, 2013b), le système AEB n'est déclenché que lorsque la collision devient inévitable, soit après l'échec de manœuvres d'évitement ou en cas de freinage du motocycliste. Bien que cette approche soit avantageuse pour ce type de système, elle souligne la nécessité de mener des recherches supplémentaires afin d'évaluer la capacité des motocyclistes à réaliser des manœuvres d'évitement en situation d'urgence. De plus, l'automatisation de telles manœuvres représente une piste prometteuse, comme le démontre l'étude de Bartolozzi et al. (2023). Une autre différence notable réside dans les études de Savino et al. (2014, 2016a), où le déclenchement de l'AEB est adapté selon les scénarios d'accidents. Dans les virages, l'AEB n'a pas été activé pour les angles de roulis supérieur à 10° pour éviter de déstabiliser le motocycliste, tandis que pour les accidents en ligne droite, une décélération d'environ 3 m/s² est appliquée en l'absence de freinage de la part du motocycliste. En revanche, si le motocycliste initie un freinage, cette décélération peut être augmentée jusqu'à environ 9 m/s². Il est important de garantir que ces niveaux de décélération restent compatibles avec la dynamique des 2RM afin d'éviter d'autres problèmes, tels que des pertes d'adhérence ou des instabilités.

L'efficacité des systèmes de l'AEB se manifeste également par une réduction importante de la gravité des blessures. Bien que cette technologie, dans sa configuration la plus pessimiste, ne permette pas un taux élevé d'évitement des collisions, elle contribue à réduire d'environ 50% le nombre de blessés graves de type MAIS3+. Ce résultat est directement lié à

la diminution de la vitesse d'impact, illustrant qu'une réduction même modérée de cette vitesse peut entraîner des effets substantiels sur les conséquences des accidents. Dans un scénario plus optimiste, cette réduction atteint jusqu'à 70%. À l'échelle nationale, si l'on considère que l'AEB pourrait intervenir dans 30,1% des accidents impliquant des 2RM et que 39% de ces cas concernent des blessés graves, une diminution globale de la gravité des blessures comprise entre 6 % et 8,2 % pourrait être anticipée.

Ces résultats soulignent l'impact substantiel de l'AEB sur la sécurité des 2RM. Toutefois, des défis subsistent, notamment l'optimisation de la décélération sans compromettre la stabilité dynamique des véhicules. Les perspectives futures incluent l'automatisation des manœuvres d'évitement et l'intégration de technologies supplémentaires pour améliorer les performances de l'AEB, en particulier dans des scénarios complexes.

VIII.5 Conclusion

Grâce aux méthodologies développées, l'effet de la technologie de l'AEB a pu être estimé. Dans un premier temps, une méthodologie basée sur la simulation de scénarios d'accidents réels, avec et sans l'utilisation de l'AEB, a été mise en œuvre. Au total, 82 cas d'accidents ont été reconstruits et simulés à l'aide d'un outil développé sous Matlab. Cette méthodologie a permis d'analyser plusieurs paramètres liés à l'AEB, tels que la portée, le champ de vision, la décélération et la stratégie de déclenchement.

Une seconde méthodologie a été développée pour évaluer l'impact de cette technologie sur la réduction des blessures graves de type MAIS3+. Elle repose sur la combinaison des courbes de risque et des courbes de distribution des accidents en fonction de la vitesse d'impact.

L'application de ces méthodologies a conduit à plusieurs résultats remarquables. L'analyse paramétrique des différentes combinaisons de paramètres de l'AEB a donné lieu à 225 simulations pour chaque cas d'accident. Les résultats obtenus montrent une réduction de la vitesse d'impact allant de 2,5 km/h à 38,9 km/h. En termes de taux d'évitement des accidents, celui-ci varie entre 7% et 63%, selon la configuration la plus pessimiste ou la plus optimiste de l'AEB. Dans les cas où l'AEB n'a pas permis d'éviter l'accident, il a permis de réduire les vitesses d'impact élevées et de les ramener vers des valeurs plus faibles.

Concernant l'analyse de l'impact de l'AEB sur les blessures graves de type MAIS3+, il a été démontré que dans la configuration la plus pessimiste cette technologie permet de réduire de 50% les blessures graves, et jusqu'à 70% dans la configuration la plus optimiste. À l'échelle nationale, et pour l'ensemble des accidents impliquant des 2RM, tous scénarios confondus, cette technologie pourrait permettre une réduction de 6% à 8,2% des blessures graves.

En conclusion, les résultats de cette étude offrent des perspectives intéressantes pour les politiques publiques et le secteur industriel. Pour les décideurs publics, les résultats obtenus justifient l'élaboration de réglementations visant à encourager, voire à imposer, l'intégration de l'AEB dans les 2RM. Cette mesure pourrait contribuer à une diminution des accidents graves,

réduisant ainsi les coûts sociaux liés aux blessures. Du côté industriel, cette étude souligne l'intérêt de poursuivre le développement et l'optimisation des systèmes AEB, en mettant en avant leur efficacité en termes de sécurité routière. Par ailleurs, les résultats obtenus sur les paramètres influents de l'AEB pourraient guider les fabricants dans la conception de systèmes plus performants et mieux adaptés aux scénarios d'accidents réels.

Chapitre IX

Conclusions, Perspectives et Recommandations

Table des matières

Chapitre IX

Conclusions, Perspectives et Recommandations

IX.1 Les principaux résultats et les limites associées 202

IX.1.1 Les principaux résultats 202

IX.1.2 Limites 204

IX.2 Perspectives et recommandations 205

IX.3 Conclusion générale 210

IX.1 Principaux résultats et limites

Cette thèse avait pour objectif d'évaluer l'efficacité des systèmes d'aide à la conduite (ARAS) sur l'accidentalité des véhicules à deux roues motorisées (2RM). Cette problématique reste aujourd'hui peu traitée dans la littérature, bien qu'il y ait besoin d'améliorer la sécurité des motocyclistes. En effet, les usagers de 2RM figurent parmi les plus vulnérables sur la route, et les statistiques montrent que, contrairement aux voitures, cette catégorie n'a pas connu d'amélioration significative en matière de sécurité routière. C'est dans ce contexte que ce travail de recherche a été élaboré afin d'apporter des réponses et des perspectives sur les solutions possibles pour améliorer la sécurité des motocyclistes.

La question de recherche principale posée dans cette thèse était la suivante : Les systèmes d'aide à la conduite peuvent-ils améliorer la sécurité des motocyclistes ? Pour y répondre, une hypothèse de travail a été formulée, stipulant que l'utilisation d'une méthodologie combinant évaluations qualitatives et quantitatives, ainsi que l'exploitation de bases de données réelles d'accidents, permettrait d'évaluer l'influence des ARAS sur l'accidentalité des 2RM. Deux objectifs spécifiques ont été définis :

- Evaluer le bénéfice global de plusieurs technologies ARAS sur l'accidentalité des 2RM en établissant un lien entre les défaillances fonctionnelles des motocyclistes et les fonctionnalités des ARAS.
- Analyser quantitativement de manière approfondie les ARAS les plus prometteuses, identifiées à partir du premier objectif spécifique.

Ce chapitre propose une conclusion générale de ce travail de thèse. Dans un premier temps, les principaux résultats obtenus dans chaque étude sont rappelés, avant d'aborder les limites inhérentes à ces travaux, qu'il convient de prendre en considération. Enfin, une dernière section présente des perspectives et des recommandations formulées sur la base des résultats obtenus dans ce travail.

IX.1.1 Les principaux résultats

❖ Étude qualitative (chapitre IV)

Une première étude, qualitative, a permis d'évaluer l'impact potentiel de 14 technologies ARAS sur l'accidentalité des 2RM. Cette analyse s'est appuyée sur l'étude des défaillances fonctionnelles des motocyclistes dans des situations d'urgence ayant conduit à un accident. En identifiant les besoins complémentaires en matière d'assistance, il a été possible de relier chaque technologie à une défaillance spécifique du motocycliste. Ensuite, 390 cas d'accidents issus des bases de données EDA et IGLAD ont été analysés. L'étude a révélé que les ARAS auraient pu influencer environ 61% des cas étudiés, mettant en évidence le potentiel de ces systèmes pour prévenir les accidents. Parmi ces technologies, l'ABS s'est révélé être le dispositif le plus efficace, suivi du système CAT et des systèmes de freinage d'urgence. En ce

qui concerne les technologies dédiées à la stabilisation latérale, le MSC s'est distingué comme étant le plus performant.

❖ Étude sur l'ACC (chapitre V)

L'étude sur l'ACC a permis de quantifier son effet potentiel sur la réduction des accidents de 2RM. Une méthodologie de recalcul de la vitesse d'impact a été développée, appliquée à 49 cas d'accidents étudiés en détail. Les résultats ont montré que cette technologie joue un rôle important en matière d'évitement et d'atténuation des collisions. En mode « confortable », l'ACC permet d'éviter environ 40% des accidents relevant de son champ d'application, tandis qu'en mode « dynamique », ce taux atteint 50%. Au-delà de la prévention des accidents, l'ACC contribuerait à réduire les vitesses d'impact, ce qui permettrait de diminuer la gravité des blessures. Une analyse complémentaire a démontré que l'ACC permettrait une réduction des blessures graves (MAIS3+) jusqu'à 43% en mode confortable et 53% en mode dynamique.

❖ Étude sur le MSC (chapitre VI)

L'impact du MSC sur les accidents liés aux pertes de contrôle a été évalué en recalculant la décélération maximale tolérée par cette technologie. L'objectif était de déterminer si le motocycliste aurait pu éviter l'accident ou conserver la maîtrise de sa trajectoire en cas de freinage en virage. L'étude a révélé une influence du MSC de 70% sur les cas analysés, dont 57% d'évitement d'accident et 13% d'atténuation. Par ailleurs, le MSC s'est avéré être deux fois plus efficace qu'un ABS standard, soulignant le rôle majeur qu'il pourrait avoir dans la prévention des pertes de contrôle en courbe.

❖ Étude sur le CAT (chapitre VII)

L'étude des paramètres techniques du système CAT a permis d'analyser son fonctionnement sur les 2RM en situation d'accident et de déterminer des paramètres techniques optimaux. Une méthodologie spécifique a été développée, permettant de reconstruire 90 accidents et de modéliser l'approche simultanée des véhicules adverses par rapport à la moto, jusqu'à 5s avant l'impact. Les résultats ont mis en évidence qu'une distance de détection optimale allant jusqu'à 20 m en milieu urbain et jusqu'à 30 m hors agglomération offrirait au motocycliste un temps suffisant pour réagir et entreprendre une manœuvre d'évitement ou de freinage.

❖ Étude sur l'AEB (chapitre VIII)

L'efficacité des systèmes de freinage d'urgence a été étudiée à travers la simulation de 32 accidents issus de diverses bases de données. Chaque accident a été analysé dans sa configuration initiale, puis dans une configuration où l'AEB était activé. L'étude a révélé que l'efficacité du système est démontrée en termes d''évitement et d'atténuation de la collision. Selon les configurations testées, le taux d'évitement des accidents grâce à l'AEB varie entre 7% et 63%. De plus, comme l'ACC, l'AEB contribue à réduire la vitesse d'impact en cas de collision inévitable. Une analyse complémentaire a estimé que cette technologie permettrait une réduction des blessures graves (MAIS3+) allant de 50% dans le scénario le plus pessimiste à 70% dans le plus optimiste.

IX.1.2 Limites

Les résultats obtenus montrent que les ARAS peuvent contribuer à l'amélioration de la sécurité des usagers de 2RM, et cela soit en évitant les collisions soit en atténuant la gravité des blessures. Cependant, les études réalisées comportent certaines limites qu'il convient de prendre en considération. Ces limites concernent notamment la représentativité des données utilisées, les conditions d'applicabilité des systèmes en situation réelle et parfois les hypothèses méthodologiques adoptées. Une analyse critique de ces éléments est essentielle pour mieux interpréter les résultats obtenus et identifier les perspectives d'amélioration. Dans la suite de cette section, les différentes limites des études menées sont présentées.

L'une des principales limites de cette étude réside dans l'absence de prise en compte de la réaction du motocycliste face à l'activation des ARAS, ce qui peut influer sur l'efficacité globale de ces systèmes. En effet, la manière dont un conducteur réagit à une activation soudaine, notamment en cas de freinage automatique d'urgence ou d'ajustement de la vitesse, pourrait générer du stress, déstabiliser le conducteur d'où des comportements inappropriés qui pourraient aboutir à une perte de contrôle. Ainsi, si l'objectif principal était d'évaluer l'effet direct des ARAS sur les accidents impliquant des 2RM, il faut souligner que la sécurité routière ne dépend pas uniquement des performances techniques de ces dispositifs, mais aussi de la manière dont ils sont perçus et utilisés par les motocyclistes.

Par ailleurs, dans le cadre des méthodologies complémentaires mises en place pour analyser l'effet de l'ACC et de l'AEB sur les blessures graves, une hypothèse sur la distribution des accidents en fonction de la vitesse d'impact a été nécessaire en raison de l'absence d'une base de données nationale française exhaustive contenant des informations détaillées sur les accidents de la route (tel que les vitesses d'impact). Pour pallier ce manque, une approche conservatrice a été adoptée en supposant que la distribution des accidents observée dans les bases de données réduites (EDA + IGLAD) était similaire à celle présente dans la base nationale française (1000 PV issus des BAAC).

Ensuite, il convient de souligner que les résultats obtenus dans cette thèse reposent principalement sur des études qualitatives (chapitre IV), des calculs numériques (chapitres V et VI) et des simulations (chapitres VII et VIII). L'utilisation de ces approches, bien qu'elles permettent d'obtenir des estimations précises, ne remplace pas l'analyse de données issues d'expérimentations en conditions réelles.

Un autre point important concerne le manque de données techniques détaillées sur le fonctionnement de certains ARAS, notamment les décélérations et les distances d'activation de l'ACC, du MSC et du CAT. Cette lacune a nécessité l'élaboration d'hypothèses basées sur la littérature existante afin de mener les analyses d'évaluation.

Enfin, un aspect non abordé dans cette thèse concerne l'acceptabilité des ARAS par les motocyclistes. L'adhésion des usagers à ces technologies est un facteur déterminant pour leur efficacité réelle. Une technologie perçue comme inconfortable pourrait ne pas être accepter, réduisant ainsi son impact potentiel sur la sécurité.

IX.2 Perspectives et recommandations

Les travaux menés dans cette thèse soulèvent également des questions essentielles concernant l'optimisation des technologies développées et leur intégration dans les politiques publiques visant à renforcer la sécurité des 2RM. Dans cette perspective, plusieurs axes d'amélioration et recommandations sont formulés. Ces propositions s'articulent autour de trois volets : **méthodologique, technique et d'appui aux politiques publiques**. La suite de cette section explorera ces différentes perspectives afin de proposer des pistes concrètes d'amélioration et d'orienter les futurs travaux de recherche dans ce domaine.

❖ Méthodologique

L'un des points forts de cette thèse réside dans le développement de méthodologies innovantes permettant d'évaluer les bénéfices des systèmes avancés d'aide à la conduite sur les accidents impliquant des 2RM. Ces approches ont permis d'obtenir des résultats notables quant à l'impact de ces technologies sur la réduction des accidents et des blessures graves. Cependant, plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisagées afin de renforcer la robustesse des analyses et d'élargir leur champ d'application.

Une première perspective concerne la réplication des études sur d'autres bases de données comportant un nombre plus conséquent d'accidents. L'une des limites de l'analyse menée dans ce travail est la taille relativement restreinte des bases de données utilisées, notamment en raison de la disponibilité limitée des informations sur les accidents de 2RM. Une extension à des bases plus vastes, incluant un plus grand échantillon d'accidents et des détails plus approfondis sur les circonstances de chaque accident, permettrait d'améliorer la représentativité des résultats. Une étude particulièrement prometteuse pourrait consister à appliquer la méthodologie développée pour l'établissement de la matrice de liens entre les défaillances fonctionnelles des motocyclistes et les ARAS sur une base de données plus étendue. Cette approche permettrait d'affiner l'analyse des interactions entre les erreurs humaines et les systèmes d'assistance, et d'identifier avec davantage de précision les contextes dans lesquels ces technologies sont les plus efficaces.

Pour mener à bien cette analyse, il faudrait que les bases de données mobilisées contiennent des informations détaillées sur les circonstances des accidents, notamment à travers des entretiens avec les usagers impliqués. L'inclusion de ce type d'information permettrait d'affiner l'identification des défaillances fonctionnelles et des besoins complémentaires en matière d'assistance à la conduite, en suivant le cadre du modèle HFF (Human Functional Failures). Ce modèle offre un cadre méthodologique structuré pour analyser les erreurs humaines et son application sur une base plus large permettrait d'obtenir des conclusions plus généralisables.

Une autre piste importante concerne le développement d'études quantitatives approfondies afin d'évaluer l'impact des ARAS sur la cinématique des accidents. L'une des approches méthodologiques développées dans ce projet repose sur l'estimation de la vitesse

d'impact en présence d'un système de régulateur de vitesse adaptatif. Il serait pertinent de renforcer les résultats obtenus en appliquant la méthode développée à de nouveaux jeux de données et en intégrant des modèles plus complexes de simulation des interactions entre le conducteur et le système. De plus, la simulation des effets de l'AEB sur les accidents de 2RM constitue une piste particulièrement prometteuse. En intégrant des modèles de dynamique du véhicule et des scénarios d'accident réalistes, il serait possible de mieux quantifier la capacité de l'AEB à réduire l'intensité des collisions et à prévenir les blessures graves.

Une troisième piste concerne la méthodologie d'évaluation de l'effet des ARAS sur les blessés graves en 2RM. En effet cette méthodologie complémentaire développée pour évaluer les bénéfices de l'ACC et de l'AEB sur les blessures graves pourrait être appliquée à d'autres bases de données afin de tester la robustesse des résultats obtenus. L'intégration de nouvelles sources de données permettrait non seulement d'améliorer la précision des estimations, mais également d'explorer des variations contextuelles qui pourraient influencer l'efficacité des technologies. Par exemple, des différences de comportement entre les motocyclistes selon les types d'infrastructures ou les conditions météorologiques pourraient être étudiées afin d'affiner les recommandations sur l'utilisation des ARAS.

De plus, la même méthodologie pourrait être utilisée pour quantifier l'impact des ARAS sur d'autres courbes de risques que les blessures graves, notamment les accidents mortels. L'estimation du nombre de vies potentiellement sauvées par l'adoption généralisée de ces technologies représenterait un indicateur intéressant pour appuyer les décisions en matière de réglementation et d'incitation à l'intégration des ARAS sur les 2RM. Une telle analyse permettrait d'identifier les conditions dans lesquelles ces dispositifs sont les plus efficaces pour réduire la mortalité et d'orienter leur développement en fonction des risques les plus critiques.

Enfin, **une quatrième perspective** méthodologique concerne l'évaluation des effets des ARAS sur les accidents de 2RM. Jusqu'à présent, l'analyse de ces technologies a principalement reposé sur des approches cinématiques et statistiques visant à estimer leurs impacts sur la réduction des accidents et l'atténuation des impacts. Toutefois, une approche complémentaire basée sur la modélisation en mécanique multicorps pourrait être développée afin d'étudier plus en détail la dynamique du véhicule en situation critique. Par exemple pour le MSC : Cette méthodologie permettrait de simuler le comportement d'une moto équipée du MSC lors d'un freinage en virage, une situation particulièrement critique pour les motocyclistes. En intégrant les interactions entre les différentes composantes du véhicule (châssis, suspensions, pneumatiques) et les forces appliquées au système, il serait possible de mieux comprendre les mécanismes par lesquels le MSC influence la stabilité du 2RM. De telles simulations permettraient également d'explorer divers scénarios d'accident en variant des paramètres tels que l'angle d'inclinaison, la vitesse d'entrée en virage et les conditions d'adhérence. Les résultats obtenus grâce à cette approche viendraient affiner et compléter les conclusions actuelles sur l'efficacité du MSC, en fournissant des indications précises sur les conditions dans lesquelles cette technologie offre le maximum de bénéfices. De plus, ces analyses pourraient servir de base pour optimiser les algorithmes de contrôle du MSC et adapter leur fonctionnement en fonction de la configuration dynamique du véhicule.

En résumé, les perspectives méthodologiques proposées visent à renforcer la robustesse des résultats obtenus en élargissant les bases de données analysées, en intégrant des modèles d'analyse plus complexes, et en améliorant la prise en compte des interactions entre le

motocycliste et les ARAS. Ces améliorations contribueront à affiner la compréhension des bénéfices et des limites des systèmes d'aide à la conduite pour les 2RM et fourniront des bases solides pour de futures recherches sur ce sujet.

❖ Techniques

Plusieurs perspectives et recommandations techniques peuvent être formulées à partir des résultats obtenus dans cette thèse. Comme mentionné dans la section dédiée aux limites, les études menées reposent principalement sur des calculs numériques et des simulations. De plus, le manque d'informations techniques précises sur le fonctionnement des ARAS a nécessité l'adoption de plusieurs hypothèses, notamment concernant des paramètres essentiels tels que la décélération pour l'ACC et l'AEB. Malgré ces limitations, ces méthodologies ont permis d'explorer pour la première fois l'impact de technologies telles que le MSC, le CAT et l'ACC, tout en renforçant les connaissances existantes sur l'impact de l'AEB sur la sécurité des 2RM.

Une première perspective technique concerne l'expérimentation sur piste pour affiner la caractérisation des performances des ARAS. La mise en place d'essais sur piste permettrait de mesurer précisément les paramètres dynamiques des technologies telles que le MSC, le CAT et l'ACC, en évaluant par exemple les capacités réelles de décélération, les seuils d'intervention et l'impact sur la stabilité du véhicule. Ces données expérimentales viendraient valider ou ajuster les hypothèses faites dans les modèles numériques, renforçant ainsi la fiabilité des analyses réalisées.

En parallèle, **une seconde perspective** technique porte sur l'étude de la réaction des motocyclistes face à ces différentes technologies. L'intégration des ARAS modifie la dynamique de conduite et peut avoir des implications comportementales importantes, notamment en situation d'urgence. Une approche pertinente consisterait à développer des simulateurs de conduite pour 2RM intégrant ces systèmes d'assistance. Ces simulateurs offriraient plusieurs avantages :

- Observer comment les motocyclistes réagissent lorsque les ARAS s'active brusquement.
- Comparer les différences de réactions en fonction de l'âge, du style de conduite, de l'expérience du motocycliste …
- Étudier les effets de l'intervention simultanée de plusieurs ARAS et leur impact sur la perception du risque.

Ces études sur simulateur pourraient ensuite servir de base pour concevoir des essais réels sur piste, en ciblant les scénarios les plus représentatifs des situations critiques. En croisant les résultats des simulateurs et des essais en conditions réelles, il serait possible d'améliorer le calibrage des ARAS afin qu'ils soient à la fois efficaces et bien adaptés au comportement des usagers.

Une troisième piste d'amélioration concerne l'acceptabilité des ARAS par les motocyclistes. Bien que ces technologies aient pour objectif d'améliorer la sécurité des usagers, leur adoption dépend fortement de la perception des motocyclistes. Une étude approfondie sur l'acceptabilité des ARAS pourrait être menée afin d'évaluer :

- Le ressenti des motocyclistes vis-à-vis de ces aides à la conduite.
- Les éventuels freins psychologiques ou ergonomiques qui pourraient limiter leur adoption.
- Les aspects techniques qui influencent leur confiance dans ces systèmes (sensibilité aux fausses alertes, compatibilité avec la conduite sportive, etc.).

Si ces systèmes sont mal acceptés ou jugés inadaptés, leur intégration massive dans le marché des 2RM pourrait être compromise, ce qui limiterait leur impact sur la sécurité routière. Il est donc essentiel de comprendre les attentes et les réticences des usagers afin d'optimiser l'implémentation de ces technologies.

Enfin, **une dernière perspective et recommandation** consiste à mener des études visant à adapter le fonctionnement des ARAS à différentes conditions. Les résultats ont mis en évidence la diversité des facteurs pouvant influencer le développement et l'optimisation des ARAS. Par exemple, l'étude menée sur la technologie CAT a montré que la distance de détection optimale varie selon l'environnement de conduite. En effet, une distance d'alerte allant jusqu'à 20 m en agglomération et 30 m hors agglomération semble plus appropriée pour éviter d'alerter le motocycliste soit trop tôt, soit trop tard face à l'approche d'un autre véhicule.

Dans cette optique, il serait pertinent de mener des études approfondies sur l'adaptation du fonctionnement des ARAS en fonction des différents environnements de conduite (urbain, rural, autoroutier) et conditions météorologiques (pluie, brouillard, neige, conditions sèches).

Ces études pourraient être réalisées via des essais réels sur piste, des simulations numériques ou une combinaison des deux approches. Une telle analyse permettrait de mieux comprendre le comportement des ARAS selon les conditions d'utilisation et d'optimiser leur efficacité. Une piste prometteuse serait l'intégration de modèles basés sur l'intelligence artificielle pour permettre aux systèmes ARAS d'adapter automatiquement (sans l'intervention du motocycliste) leurs paramètres en fonction du contexte de conduite. Par exemple, pour la technologie CAT, un algorithme d'apprentissage automatique pourrait détecter en temps réel si le motocycliste évolue en agglomération ou hors agglomération et ajuster automatiquement la distance de détection en conséquence. Cette approche pourrait également être appliquée à d'autres technologies d'assistance à la conduite, optimisant ainsi leur réactivité et leur pertinence dans des conditions variées.

L'ensemble de ces perspectives techniques contribueraient non seulement à améliorer la précision des analyses menées dans cette thèse, mais également à guider le développement futur des ARAS afin d'en maximiser les bénéfices en matière de sécurité routière.

❖ Appui aux politiques publiques

Le volet d'appui aux politiques publiques présente des recommandations basées sur les résultats de la thèse, à destination des décideurs et des institutions gouvernementales. Ces recommandations s'articulent autour de trois axes principaux : l'intégration des technologies d'assistance à la conduite dans la formation des motocyclistes, l'amélioration des bases de données d'accidents et l'évolution de la réglementation relative aux 2RM.

Un premier axe de recommandation concerne l'intégration des ARAS dans les programmes de formation des conducteurs de 2RM. Bien que ces technologies visent à réduire

le risque d'accident, leur efficacité dépend largement de la manière dont elles sont utilisées par les motocyclistes. **Une formation spécifique et approfondie est nécessaire afin de garantir une utilisation optimale et sécurisée, notamment en situation d'urgence**.

Cette formation devrait inclure des modules pratiques portant sur les différentes technologies, telles que le CAT, le MSC, l'ACC et l'AEB. L'accent doit être mis sur les réactions appropriées lors de l'activation de ces dispositifs ainsi que sur leur interaction avec les comportements des conducteurs. Il serait pertinent de concevoir des simulations immersives permettant de reproduire des scénarios de danger spécifiques en fonction des conditions de circulation :

- En milieu urbain, où la densité de circulation est élevée, il est important d'enseigner aux motocyclistes à anticiper les risques liés aux angles morts latéraux et aux freinages d'urgence.
- En milieu rural ou hors agglomération, où les véhicules sont plus dispersés, la formation devrait mettre l'accent sur la surveillance globale de l'environnement, en intégrant des conseils sur l'utilisation des rétroviseurs et des systèmes de détection des angles morts.

En outre, cette formation devrait aborder les limites des ARAS afin d'éviter toute sur-confiance des motocyclistes envers ces technologies et promouvoir une conduite prudente et responsable.

Un deuxième axe de recommandation concerne le développement et l'exploitation des bases de données d'accidents impliquant les 2RM. Les études détaillées des accidents se sont révélées particulièrement précieuses pour comprendre les causes des collisions et adapter les mesures de prévention en conséquence. Actuellement, les bases de données disponibles présentent des lacunes en matière de représentativité de la population des motocyclistes et des contextes accidentogènes spécifiques aux 2RM.

Afin d'améliorer la qualité et l'exploitabilité des données, **il est recommandé de développer des bases de données nationales basées sur les études détaillées des accidents**. Ces bases de données permettraient non seulement une meilleure compréhension des facteurs de risque propres aux 2RM, mais aussi de mener des recherches approfondies sur les besoins spécifiques des motocyclistes en matière de sécurité et d'assistance à la conduite.

Enfin, **un troisième axe de recommandation** porte sur l'évolution de la réglementation relative aux technologies d'ARAS. Les systèmes étudiés (ACC, MSC, CAT et AEB) ont démontré leur efficacité face aux problématiques de sécurité des 2RM abordées dans le chapitre I :

- L'ACC et l'AEB contribuent à la gestion des excès de vitesse en ajustant automatiquement la vitesse du véhicule et en appliquant un freinage d'urgence en cas de risque de collision frontale.
- Le MSC améliore la maniabilité des 2RM en optimisant la répartition de la pression de freinage sur les deux roues, réduisant ainsi les pertes de contrôle en virage.

- Le CAT renforce la vigilance des motocyclistes en améliorant la détection des véhicules en approche, réduisant ainsi les risques de collision latérale.

À l'heure actuelle, seul l'AEB n'est pas encore commercialisé, tandis que les autres systèmes (MSC, CAT et ACC) sont déjà disponibles sur certains modèles de motos. **Une des perspectives consiste à collaborer avec l'industrie du 2RM afin d'affiner les recherches sur ces technologies et de favoriser leur intégration progressive dans la conception des véhicules.**

Dans un premier temps, il serait opportun de faire évoluer la réglementation n°COM 2010/542, qui impose actuellement l'ABS sur les motos de plus de 125 cm³. Cette évolution pourrait consister à remplacer l'ABS standard par une version avancée intégrant les fonctionnalités du MSC, améliorant ainsi la stabilité du véhicule en situation de freinage. Une généralisation progressive de cette exigence à l'ensemble du parc 2RM pourrait ensuite être envisagée avant d'étendre la réglementation aux autres technologies ARAS.

Toutefois, toute décision réglementaire doit être prise en concertation avec les différents acteurs du secteur des 2RM, à commencer par les motocyclistes eux-mêmes. Des études d'acceptabilité seraient essentielles pour évaluer la perception des conducteurs vis-à-vis de ces technologies et garantir une transition efficace vers une adoption généralisée des ARAS.

IX.3 Conclusion générale

Ce travail de thèse a apporté une première estimation des bénéfices potentiels des ARAS sur la sécurité des usagers de 2RM, un sujet encore peu exploré dans la littérature scientifique malgré le besoin urgent de renforcer la sécurité des motocyclistes. En effet, les avancées en matière de sécurité pour les motocyclistes montrent un retard important par rapport à celles observées pour d'autres usagers de la route, notamment les automobilistes. Ce constat souligne l'importance de poursuivre les efforts de recherche dans ce domaine.

L'originalité de cette thèse réside non seulement dans l'évaluation de l'impact des ARAS sur l'accidentalité des 2RM, mais aussi dans l'approche méthodologique adoptée, qui associe simulations, analyses statistiques et exploitation de bases de données d'accidents. Cette approche intégrée a permis de fournir une vision assez complète des effets de ces technologies sur la sécurité des motocyclistes. De plus, le développement et l'adaptation des méthodologies d'évaluations contribuent à enrichir les moyens de traitement des bénéfices des systèmes d'assistance à la conduite, ouvrant la voie à des études encore plus détaillées et précises dans le futur.

Au-delà des aspects technologiques, ce travail de thèse rappelle que l'amélioration de la sécurité des motocyclistes nécessite une approche globale liée non seulement au développement des ARAS, mais aussi leur acceptation par les utilisateurs, leur prise en compte dans les politiques de sécurité routière, et l'éducation des usagers à leur bon usage. En ce sens, la

sensibilisation et la formation des motocyclistes joueront un rôle important pour tirer pleinement parti des innovations en matière de sécurité.

Cette thèse constitue une contribution à la compréhension de l'impact des ARAS sur l'accidentalité des 2RM, tout en mettant en évidence les défis techniques, humains et réglementaires associés à leur adoption. Le chemin à parcourir reste long pour atteindre un niveau de sécurité équivalent à celui des automobilistes, mais les pistes explorées et les réflexions suscitées dans ce travail ouvrent des perspectives prometteuses. L'enjeu demeure de taille : améliorer la sécurité des motocyclistes tout en préservant l'essence même de la conduite à moto, faite de plaisir et de liberté.

Références bibliographiques

ACEM, 2008. Étude approfondie sur les accidents en motocycle (No. 1.3). ACEM, Brussels.

Aleksa, M., Schaub, A., Erdelean, I., Wittmann, S., Soteropoulos, A., Fürdös, A., 2024. Impact analysis of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) regarding road safety – computing reduction potentials. Eur. Transp. Res. Rev. 16 1 , 39. doi:10.1186/s12544-024-00654-0

Allain, P., 2013. La prise de décision : aspects théoriques, neuro-anatomie et évaluation. Revue de neuropsychologie 5 2 , 69–81. doi:10.1684/nrp.2013.0257

AMA Committee, 1971. Rating the severity of tissue damage. I. The abbreviated scale. JAMA 215 2 , 277–280. doi:10.1001/jama.1971.03180150059012

Anaya, J.J., Ponz, A., García, F., Talavera, E., 2017. Motorcycle detection for ADAS through camera and V2V Communication, a comparative analysis of two modern technologies. Expert Systems with Applications 77, 148–159. doi:10.1016/j.eswa.2017.01.032

Anderson, B.O., Baxter, A., Robar, N., 2010. Comparison of Motorcycle Braking System Effectiveness. Presented at the SAE 2010 World Congress & Exhibition, pp. 2010-01–0072. doi:10.4271/2010-01-0072

Arita, S., Goff, D., Miyazaki, H., Ishio, W., 2007. Wide Field of View (FOV) and High-Resolution Lidar for Advanced Driver Assistance Systems. Presented at the SAE World Congress & Exhibition, pp. 2007-01–0406. doi:10.4271/2007-01-0406

Atalar, D., 2018. Functional failure sequences in traffic accidents (PhD Thesis). Loughborough University.

Avignant, M., Serre, T., 2024. Évaluation des bénéfices d'aides à la conduite pour les deux-roues motorisés en sécurité routière (Rapport de stage). Université d'Avignant & Université Gustave Eiffel, France.

Bartlett, W.D., Meyers, D., 2014. Time and Distance Required for a Motorcycle to Turn Away from an Obstacle. Presented at the SAE 2014 World Congress & Exhibition, pp. 2014-01–0478. doi:10.4271/2014-01-0478

Basch, N., Moore, M., Hellinga, L., 2015. EVALUATION OF MOTORCYCLE ANTILOCK BRAKING SYSTEMS. Presented at the Highway Loss Data Institute, United States.

Baty, F., Ritz, C., Charles, S., Brutsche, M., Flandrois, J.-P., Delignette-Muller, M.-L., 2015. A Toolbox for Nonlinear Regression in R: The Package nlstools. Journal of Statistical Software 66, 1–21. doi:10.18637/jss.v066.i05

Beanland, V., Lenné, M.G., Fuessl, E., Oberlader, M., Joshi, S., Bellet, T., Banet, A., Rößger, L., Leden, L., Spyropoulou, I., Yannis, G., Roebroeck, H., Carvalhais, J., Underwood, G., 2013. Acceptability of rider assistive systems for powered two-wheelers. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 19, 63–76. doi:10.1016/j.trf.2013.03.003

Biffoli, A., Lucci, C., Marra, M., Savino, G., 2021. Analysis of the intervention of an anti-fall device in Motorcycle Autonomous Emergency Braking (MAEB) experimental tests, in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, p. 012024.

BMW Media information, 2020. BMW Motorrad Active Cruise Control.

BMW Motorrad, 2022. ABS Pro - La technologie dans le détail [WWW Document]. URL https://www.bmw-motorrad.fr/fr/modeles/technologies/safety/abs-pro.html (accessed 5.19.22).

Bougard, C., Davenne, D., Moussay, S., Espié, S., 2021. Evaluating sleep deprivation and time-of-day influences on crash avoidance maneuvers of young motorcyclists using a

dynamic simulator. Journal of Safety Research 78, 36–46. doi:10.1016/j.jsr.2021.05.006
Bruna-Rosso, C., n.d. Projet iSafe-Virtual-Human Système d'alerte et d'optimisation des secours pour les victimes d'accidents de la route basé sur une prédiction en temps réel des blessures potentielles à partir de l'Homme Virtuel.
C. van der Zweep, J. Vandenhoudt, 2006. Powered Two Wheeler Integrated safety (No. FP6 – 2005 – Transport – 4). EUROPEAN COMMISSION DG RESEARCH, Netherlands.
Caird, J. k., Hancock, P. a., 1994. The Perception of Arrival Time for Different Oncoming Vehicles at an Intersection. Ecological Psychology 6 2 , 83–109. doi:10.1207/s15326969eco0602_1
Campbell, K.L., 1974. Energy Basis for Collision Severity (SAE Technical Paper No. 740565). SAE International, Warrendale, PA. doi:10.4271/740565
Cassese, G., Lucci, C., Savino, G., Baldanzini, N., 2022. Analysis of the rider's body movement during the intervention of the Autonomous Emergency Braking system for Motorcycles (MAEB), in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, p. 012047.
Cellier, J., 1990. L'erreur humaine dans le travail. Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes 193–209.
Chauvel, C., 2011. Vehicle Occupant Infrastructure Road User Safety Study – VOIESUR.
Cheaibi, S., Llari, M., Deville, T., Wei, W., Cherta-Ballester, O., Honoré, V., Masson, C., Serre, T., 2025. Trunk impact conditions in real PTW accidents based on multibody numerical reconstructions. Traffic Injury Prevention 0 0 , 1–8. doi:10.1080/15389588.2025.2452326
Chiron, M., Guillemot, H., Ndiaye, A., Thélot, B., 2004. Description et gravité des lésions traumatiques selon les classifications AIS 1998 et IIS 1994. Association for the Advancement of Automotive Medicine, France.
Ciępka, P., 2016. EFFECT OF ABS AND CBS ON MOTORCYCLE BRAKING DECELERATION ON A WET ROAD SURFACE. Problems of Forensic Sciences 2016 107, 12.
Cossalter, V., Lot, R., Maggio, F., 2004. On the Braking Behavior of Motorcycles. SAE Transactions 113, 1274–1280.
Damon, P.-M., 2018. Estimation pour le développement de systèmes d'aide à la conduite des véhicules à deux-roues motorisés (Theses). Université Paris-Saclay ; Université d'Evry-Val-d'Essonne.
Davoodi, S.R., Hamid, H., Pazhouhanfar, M., Muttart, J.W., 2012. Motorcyclist perception response time in stopping sight distance situations. Safety Science 50 3 , 371–377. doi:10.1016/j.ssci.2011.09.004
Dean, M.E., Lubbe, N., Fredriksson, R., Sternlund, S., Gabler, H.C., 2023. Assessing the applicability of impact speed injury risk curves based on US data to defining safe speeds in the US and Sweden. Accident Analysis & Prevention 190, 107151. doi:10.1016/j.aap.2023.107151
Ding, C., Rizzi, M., Strandroth, J., Sander, U., Lubbe, N., 2019. Motorcyclist injury risk as a function of real-life crash speed and other contributing factors. Accident Analysis & Prevention 123, 374–386. doi:10.1016/j.aap.2018.12.010
Dubos, N., VARIN, B., 2015. Analyse de l'accidentalité des conducteurs de 2RM : livrable 4.5 du projet VOIESUR (No. Livrable 4.5). France.
Dumm, U., Hans-Albert, W., 2009. Difference entre Launch Control et AntiWheelie.pdf. BMW Motorrad.
Elslande, P. van, Jaffard, M., Silvestrelli, A., Fournier, J.-Y., Clabaux, N., Aillerie, I., 2011. Perceptibilité des deux-roues motorisés. Powered Two Wheelers conspicuity. Projet PERCEPT 2009-2012 - Rapport final.
Evans, L., 1991. Traffic Safety and the Driver. Science Serving Society.

Farooq, D., Juhasz, J., 2019. Simulation Analysis of Contributing Factors to Rider Visibility Issues for Car-Motorcycle Accidents. Period. Polytech. Transp. Eng. 48 3 , 203–209. doi:10.3311/PPtr.13521

Faveege, J.M., 1970. Plenary Session: The Operator's Reliability and Safety in Industry L'Homme Agent d'infiabilite et de Fiabilite du Processus Industriel. ERGONOMICS. doi:10.1080/00140137008931148

Febvre, P., Taillet, R., Villain, L., 2013. Dictionnaire de physique. De Boeck Superieur.

Ferrandez, F., 1995. L'étude détaillée d'accidents orientée vers la sécurité primaire: méthodologie de recueil et de pré-analyse. Presses de l'ENPC.

Ferrandez, FLEURY (Dominique), Gilles, M., MICHAUT (G), SAAD (Farida), ROUTIERE, O.N.D.S., 1985. Etude détaillée d'accidents orientée sur la sécurité primaire. Compte rendu d'activité du groupe de réflexions sur les accidents Salon. France.

Füssl, E., Oberlader, M., Beanland, V., Spyropoulou, I., Lenné, M.G., Joshi, S., Rößger, L., Leden, L., Underwood, G., Carvalhais, J., 2015. Methodological development of a specific tool for assessing acceptability of assistive systems of powered two-wheeler-riders. IET Intelligent Transport Systems 9 1 , 12–21. doi:10.1049/iet-its.2014.0026

Gail, J., Funke, J., Seiniger, P., Westerkamp, U., 2009. Anti lock braking and vehicle stability control for motorcycles – why or why not?, in: Paper Number 09-0072. Presented at the International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Germany, p. 15.

Galvani, M., 2019. History and future of driver assistance. IEEE Instrum. Meas. Mag. 22 1 , 11–16. doi:10.1109/MIM.2019.8633345

Gáspár, P., Szabó, Z., Bokor, J., Nemeth, B., 2017. Robust Control Design for Active Driver Assistance Systems: A Linear-Parameter-Varying Approach, Advances in Industrial Control. Springer International Publishing, Cham. doi:10.1007/978-3-319-46126-7

Giani, P., Tanelli, M., Savaresi, S.M., Santucci, M., 2013. Launch control for sport motorcycles: A clutch-based approach. Control Engineering Practice 21 12 , 1756–1766. doi:10.1016/j.conengprac.2013.08.005

Giovannini, F., Savino, G., Pierini, M., Baldanzini, N., 2013. Analysis of the minimum swerving distance for the development of a motorcycle autonomous braking system. Accident Analysis & Prevention 59, 170–184. doi:10.1016/j.aap.2013.05.020

Green, D., 2006. A Comparison of Stopping Distance Performance for Motorcycles Equipped with ABS, CBS and Conventional Hydraulic Brake Systems. Presented at the International Motorcycle Safety Conference, California, p. 7.

Guyot, 2008. Gisements de sécurité routière: les deux-roues motorisés. la Documentation française, Paris.

Haasper, D.-P.M., Krüsemann, S.M.M., Kuschefski, I.A., Lang, A., 2020. ABS and more: Settings and Knowledge on Advanced Rider Assistance Systems of Motorcyclists in Germany. Institut für Zweiradsicherheit, Germany.

Hoedemaeker, M., Brookhuis, K.A., 1998. Behavioural adaptation to driving with an adaptive cruise control (ACC). Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 1 2 , 95–106. doi:10.1016/S1369-8478(98)00008-4

Hollnagel, E., 1998. Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM). Elsevier.

HONDA, 2007. Les Dossiers Techniques Honda – SYSTEME ABS –Dual CBS. Honda Motor Europe - France.

Hooshmand, D., 2022. Motorcycles with Adaptive Cruise Control — A Complete Guide. URL https://motofomo.com/motorcycles-adaptive-cruise-control-active-acc/ (accessed 2.10.25).

Hooshmand, D., 2020. Cornering ABS/IMU explained + List of All Motorcycles (2024). URL https://motofomo.com/motorcycles-with-cornering-abs-imu/ (accessed 1.24.25).

Horswill, M.S., Helman, S., Ardiles, P., Wann, J.P., 2005. Motorcycle Accident Risk Could Be Inflated by a Time to Arrival Illusion. Optometry and Vision Science 82 8 , 740. doi:10.1097/01.opx.0000175563.21423.50

Huguenin-Richard, F., Lassarre, S., Yeh, L., Zeitouni, K., 2000. Extraction de connaissances des bases de données spatiales en accidentologie routière. Troisième journée Cassini, La Rochelle, France.

Hurst, L., 2011. A literature review and exploratory analysis of fatalities and serious injury collisions in relation to motorcyclists: Implications for education, engineering and enforcement initiatives.

Huth, V., Biral, F., Martín, Ó., Lot, R., 2012. Comparison of two warning concepts of an intelligent Curve Warning system for motorcyclists in a simulator study. Accident Analysis & Prevention, Safety and Mobility of Vulnerable Road Usears: Pedestrians, Bicyclists, and Motorcyclists 44 1 , 118–125. doi:10.1016/j.aap.2011.04.023

Huth, V., Gelau, C., 2013. Predicting the acceptance of advanced rider assistance systems. Accident Analysis & Prevention 50, 51–58. doi:10.1016/j.aap.2012.03.010

Isaksson Hellman, I., Lindman, M., 2023. Estimating the crash reducing effect of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) for vulnerable road users. Traffic Safety Research 4, e000036–e000036. doi:10.55329/blzz2682

ITF, 2023. Road Safety Annual Report 2023 (Text). l'International Traffic Safety Data and Analysis Group.

Itoh, H., Aono, M., 1991. Disc Brake for Motorcycles (SAE Technical Paper No. 911243). SAE International, Warrendale, PA.

Jimenez, M., 1997. La Psychologie de la perception. FeniXX.

Kate Murphy, 2019. Ask RideApart: How Does Wheelie/Stoppie Control Work? [WWW Document]. RideApart.com. URL https://www.rideapart.com/features/364755/ask-rideapart-how-does-wheelie-stoppie-control-work/ (accessed 2.7.23).

Kato, M., Matsuto, T., Tanaka, K., Ishihara, H., Hayashi, T., Hosoda, W., 1996. Combination of Antilock Brake System (ABS) and Combined Brake System (CBS) for Motorcycles. Presented at the International Congress & Exposition, p. 9. doi:10.4271/960960

Kobayash, 2013. Traction control device and method for a motorcycle. US 2013/0261925 A1.

Kuehn, M., Hummel, T., Bende, J., 2009. Benefit estimation of advanced driver assistance systems for cars derived from real-life accidents, in: 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles ESV. p. 18.

Kukkala, V.K., Tunnell, J., Pasricha, S., Bradley, T., 2018. Advanced driver-assistance systems: A path toward autonomous vehicles. IEEE Consumer Electronics Magazine 7 5 , 18–25.

Kumaresh, G., Lich, T., Skiera, A., Moennich, J., 2017. Benefit Mapping of Anti-Lock Braking System for Motorcycles from India to Indonesia. Journal of the Society of Automotive Engineers Malaysia 1, 13.

Kuschefski, A., Haasper, M., Vallese, A., 2009. Advanced rider assistance systems for powered two-wheelers (ARAS-PTW). Presented at the International Motorcycle Conference, Cologne, pp. 11–0123.

Labayrade, R., Royere, C., Aubert, D., 2007. Experimental Assessment of the RESCUE Collision-Mitigation System. IEEE Transactions on Vehicular Technology 56 1 , 89–102. doi:10.1109/TVT.2006.883780

Larsson, A.F.L., 2012. Driver usage and understanding of adaptive cruise control. Applied Ergonomics 43 3 , 501–506. doi:10.1016/j.apergo.2011.08.005

Lechner, D., Ferrandez, F., 1990. Analysis and reconstruction of accident sequences, in: XXIII FISITA Congress, ATA,. SAE Paper, Torino, Italy, pp. 931–939.

Ledesma, R.D., Padilla, J.-L., Tosi, J.D., Sanchez, N., Castro, C., 2023. Motorcycle rider error and engagement in distracting activities: A study using the Attention-Related Driving Errors Scale (ARDES-M). Accident Analysis & Prevention 187, 107069. doi:10.1016/j.aap.2023.107069

Ledoux, V., 2021. Les facteurs d'accidents mortels de la circulation en France en 2015 | Cerema.
Leplat, J., 1985. Erreur humaine, fiabilité humaine dans le travail. A. Colin.
Li, Y., Wang, H., Wang, W., Xing, L., Liu, S., Wei, X., 2017. Evaluation of the impacts of cooperative adaptive cruise control on reducing rear-end collision risks on freeways. Accident Analysis & Prevention 98, 87–95. doi:10.1016/j.aap.2016.09.015
Lich, T., 2016. Motorcycle Stability Control - The Next Generation of Motorcycle Safety and Riding Dynamics. SAE Int. J. Engines 9 1 , 9.
Lich, T., Kumaresh, G., Moennich, J., 2015. Benefit Estimation of Anti-Lock Braking System for Powered Two Wheeler On Indian Highways. Presented at the Symposium on International Automotive Technology 2015, p. 8. doi:10.4271/2015-26-0167
Limpert, R., 2021. Motor Vehicle Accident Reconstruction and Cause Analysis. LexisNexis.
Lubbe, N., Jeppsson, H., Sternlund, S., Morando, A., 2024. Injury risk curves to guide safe speed limits on Swedish roads using German crash data supplemented with estimated non-injury crashes. Accident Analysis & Prevention 202, 107586. doi:10.1016/j.aap.2024.107586
Lubbe, N., Wu, Y., Jeppsson, H., 2022. Safe speeds: fatality and injury risks of pedestrians, cyclists, motorcyclists, and car drivers impacting the front of another passenger car as a function of closing speed and age. Traffic Safety Research 2, 000006–000006. doi:10.55329/vfma7555
Lucci, C., Allen, T., Baldanzini, N., Savino, G., 2022a. Motorcycle curve assist: A novel approach based on active speed control for crash injury reduction. Traffic Injury Prevention 23 sup1 , 10. doi:10.1080/15389588.2022.2106370
Lucci, C., Allen, T., Pierini, M., Savino, G., 2021. Motorcycle Autonomous Emergency Braking (MAEB) employed as enhanced braking: Estimating the potential for injury reduction using real-world crash modeling. Traffic Injury Prevention 22 sup1 , S104–S110. doi:10.1080/15389588.2021.1960319
Lucci, C., Huertas-Leyva, P., Marra, M., Pierini, M., Savino, G., Baldanzini, N., others, 2020. Autonomous emergency braking system for powered-two-wheelers: testing end-user acceptability of unexpected automated braking events deployed in typical pre-crash trajectories, in: Proceedings of the 13th International Motorcycle Conference. p. 12.
Lucci, C., Savino, G., Baldanzini, N., 2022b. Does Motorcycle Autonomous Emergency Braking (MAEB) mitigate rider injuries and fatalities? Design of effective working parameters and field test validation of their acceptability. Transportation research part C: emerging technologies 145, 103865.
Ma, R., Kaber, D.B., 2005. Situation awareness and workload in driving while using adaptive cruise control and a cell phone. International Journal of Industrial Ergonomics 35 10 , 939–953. doi:10.1016/j.ergon.2005.04.002
Maartens, N.F., Wills, A.D., Adams, C.B.T., 2002. Lawrence of Arabia, Sir Hugh Cairns, and the Origin of Motorcycle Helmets. Neurosurgery 50 1 , 176.
Malaterre, G., Fontaine, H., 1992. Les aides a la conduite : quels enjeux pour la securite ? [driving aids: what stakes for safety?]. Recherche-transports-securite. No 35.
Marra, M., Lucci, C., Huertas-Leyva, P., Baldanzini, N., Pierini, M., Savino, G., 2021. The future of the Autonomous Emergency Braking for Powered-Two-Wheelers: field testing end-users' acceptability in realistic riding manoeuvres. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1038 1 , 012016. doi:10.1088/1757-899X/1038/1/012016
Naranjo, J.E., Jiménez, F., Anaya, J.J., Talavera, E., Gómez, O., 2017. Application of vehicle to another entity (V2X) communications for motorcycle crash avoidance. Journal of Intelligent Transportation Systems 21 4 , 285–295. doi:10.1080/15472450.2016.1247703
Naude, C., Serre, T., Savino, G., Lucci, C., Lich, T., 2022. Impact Speed Reduction Induced By Pre-Crash Braking For Motorcycles – Parametric Evaluation Based on Real

Accidents, in: Intelligent Transportation Systems (ITS). Presented at the Intelligent Transportation Systems (ITS), Los Angeles, p. 10.
Neboit, M., 1978. Simulation et apprentissage de la conduite automobile. Le Travail Humain 41 2 , 239–249.
Nie, P., Ray, A., 2019. Motorcycle Eyes. Williams Honors College, Honors Research Projects.
OMS, 2023. Rapport de situation sur la sécurité routière dans le monde. OMS.
Ondruš, J., Kolla, E., 2018. The impact of ABS system on the braking characteristics of the specified motorcycle on the dry road surface. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 421, 022024. doi:10.1088/1757-899X/421/2/022024
ONISR, 2024. Accidentalité routière 2023 en France, Résultats provisoires au 31 janvier 2024. Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière, France.
Parker, D., Reason, J.T., Manstead, A.S.R., Stradling, S.G., 1995. Driving errors, driving violations and accident involvement. Ergonomics 38 5 , 1036–1048. doi:10.1080/00140139508925170
Piantini, S., Aathresh, V.N., Savino, G., Pierini, M., 2022. Assessment of the effect of motorcycle autonomous emergency braking (MAEB) based on real-world crashes. Traffic Injury Prevention 23 sup1 , 29. doi:10.1080/15389588.2022.2117983
Piantini, S., Bourdet, N., Savino, G., Rosalie, S., Pierini, M., Deck, C., Willinger, R., 2020. Potential head injury mitigation of M-AEB in real-world motorcycle crashes. International Journal of Crashworthiness 25 6 , 591–602. doi:10.1080/13588265.2019.1626531
Pickenhahn, J., 1991. Method of anti-lock brake control for motorcycle vehicle. 4,989,922.
Pierre VAN ELSLAND, 1997. Scénario type de production de “l’erreur humaine” dans l’accident de la route (No. 218). Institut National de la Recherche sur les Transport et leur Sécurité, France.
PIONNEERS, 2020. Protective Innovations of New Equipment for Enhanced Rider Safety.
Posner, M.I., Snyder, C.R.R., 2004. Attention and Cognitive Control, Cognitive psychology: Key readings. Psychology Press, New York, NY, US.
Prinzmetal, W., Presti, D.E., Posner, M.I., 1986. Does attention affect visual feature integration? Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance 12 3 , 361–369. doi:10.1037/0096-1523.12.3.361
Probst, M., 1987. Das neue ABS-Bremssystem am BMW K 100 Motorrad. VDI-Berichte 657 , 391–405.
Ragot-Court, I., Van Eslande, P., 2011. Les comportements et leurs déterminants dans l’accidentalité des deux-roues motorisés (Rapport de convention IFSTTAR/DSCR). Ministère de l’Ecologie, de l’Energie, du Développement durable et de la Mer / Direction de la Recherche et de l’Innovation, France.
Reason, J., 1990. Human Error. Cambridge University Press.
Reed, S.K., 2017. Cognition: Théories et applications, 4ème. ed. De Boeck Superieur, Paris.
Remi Darodes, 2018. Bosch : un système ANTI-Glissement (+vidéo). Moto-Station. URL https://moto-station.com/moto-revue/pratique/bosch-systeme-anti-glissement-video/419552 (accessed 2.7.23).
Ride Vision, 2021. Collision Aversion technology. Ride Vision. URL https://www.ride.vision/technology/ (accessed 4.1.22).
Rivers, R.W., 1980. Traffic accident investigators’ handbook. Thomas, USA.
Rizzi, M., Strandroth, J., Kullgren, A., Tingvall, C., Fildes, B., 2015. Effectiveness of Motorcycle Antilock Braking Systems (ABS) in Reducing Crashes, the First Cross-National Study. Traffic Injury Prevention 16 2 , 177–183. doi:10.1080/15389588.2014.927575
Savino, G., 2010. PISa – Powered two-wheeler Integrated Safety. Development, implementation and testing of PTW integrated safety systems. 8th International Motorcycle Conference,.

Savino, G., Brown, J., Baldock, M., Fitzharris, M., 2014a. A novel approach for evaluating the potential benefits of motorcycle autonomous emergency braking in real world crashes, in: Australasian Road Safety Research, Policing and Education Conference 2014. Australasian College of Road Safety.

Savino, G., Giovannini, F., Baldanzini, N., Pierini, M., Rizzi, M., 2013a. Assessing the Potential Benefits of the Motorcycle Autonomous Emergency Braking Using Detailed Crash Reconstructions. null 14 sup1 , S40–S49. doi:10.1080/15389588.2013.803280

Savino, G., Giovannini, F., Piantini, S., Baldanzini, N., Pierini, M., 2015. Autonomous emergency braking for cornering motorcycle, in: Proceedings of Conference Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Gothenburg.

Savino, G., Mackenzie, J., Allen, T., Baldock, M., Brown, J., Fitzharris, M., 2016. A robust estimation of the effects of motorcycle autonomous emergency braking (MAEB) based on in-depth crashes in Australia. Traffic Injury Prevention 17 sup1 , 66–72. doi:10.1080/15389588.2016.1193171

Savino, G., Piantini, S., 2019. Analysis of effects of a motorcycle pre-crash braking system using in-depth crash data and drive-through data: a case study, in: International Research Council on Biomechanics of Injury. IRCOBi, pp. 1–2.

Savino, G., Pierini, M., Fitzharris, M., 2019. Motorcycle active safety systems: Assessment of the function and applicability using a population-based crash data set. Traffic Injury Prevention 20 4 , 406–412. doi:10.1080/15389588.2019.1594795

Savino, G., Pierini, M., Rizzi, M., Frampton, R., 2013b. Evaluation of an Autonomous Braking System in Real-World PTW Crashes. Traffic Injury Prevention 14 5 , 532–543. doi:10.1080/15389588.2012.725878

Savino, G., Rizzi, M., Brown, J., Piantini, S., Meredith, L., Albanese, B., Pierini, M., Fitzharris, M., 2014b. Further Development of Motorcycle Autonomous Emergency Braking (MAEB), What Can In-Depth Studies Tell Us? A Multinational Study. Traffic Injury Prevention 15 sup1 , S165–S172. doi:10.1080/15389588.2014.926009

Schoner, J., Sanders, R., Goddard, T., 2024. Effects of Advanced Driver Assistance Systems on Impact Velocity and Injury Severity: An Exploration of Data from the Crash Investigation Sampling System. Transportation Research Record 2678 5 , 451–462. doi:10.1177/03611981231189740

Setright, L.J.K., 1979. The Guinness Book of Motorcycling Facts and Feats. Guinness Superlatives.

Sevarin, A., Gruber, M., Tomasch, E., Rathgeb, C., Hartwig, L., Ausserer, K., Risser, R., 2018. Safety potential assessment of cornering ABS systems based on riding tests. Forschungshefte Zweiradsicherheit 18 .

Sexton, B.F., Baughan, C.J., Elliott, M.A., Maycock, G., 2004. The accident risk of motorcyclists (Report). TRL.

Simons, D.J., Chabris, C.F., 1999. Gorillas in Our Midst: Sustained Inattentional Blindness for Dynamic Events. Perception 28 9 , 1059–1074. doi:10.1068/p281059

Slimi, H., 2012. Système d'Assistance à la Conduite pour Véhicules à Deux-Roues Motorisés (phdthesis). Université d'Evry-Val d'Essonne.

Smith, N., 2020. Gottlieb Daimler: Automotive Pioneer. The Engineer 300 7922 , 40–41. doi:10.12968/s0013-7758(22)90626-9

Song, M., McLaughlin, S., Doerzaph, Z., 2017. An on-road evaluation of connected motorcycle crash warning interface with different motorcycle types. Transportation Research Part C: Emerging Technologies 74, 34–50. doi:10.1016/j.trc.2016.11.005

Spicer, R., Vahabaghaie, A., Bahouth, G., Drees, L., Martinez von Bülow, R., Baur, P., 2018. Field effectiveness evaluation of advanced driver assistance systems. Traffic Injury Prevention 19 sup2 , S91–S95. doi:10.1080/15389588.2018.1527030

Sporner, A., Kramlich, T., 2001. Motorcycle Braking and Its Influence on Severity of Injury (SAE Technical Paper No. 2001- 06–0168). SAE International, Warrendale, PA.

Steven Gray, 2010. Motorcycle wheelie training device. US 2010/0096833 A1.
SUBIRATS, P., 2011. Cinématique des 2RM sur les carrefours giratoire. CETE Normandie centre, France.
Sweatman, P., 2025. Approaches to Road Safety: Evolution, Challenges, and Emerging Technologies. CRC Press.
Tapadar, S., Ray, S., Saha, H.N., Saha, A.K., Karlose, R., 2018. Accident and alcohol detection in bluetooth enabled smart helmets for motorbikes, in: 2018 IEEE 8th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC). Presented at the 2018 IEEE 8th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC), pp. 584–590. doi:10.1109/CCWC.2018.8301639
Teoh, E.R., 2018. Motorcycle crashes potentially preventable by three crash avoidance technologies on passenger vehicles. Traffic Injury Prevention 19 5 , 513–517. doi:10.1080/15389588.2018.1440082
Teoh, E.R., 2011. Effectiveness of Antilock Braking Systems in Reducing Motorcycle Fatal Crash Rates. Traffic Injury Prevention 12 2 , 169–173. doi:10.1080/15389588.2010.541308
Terranova, P., Dean, M.E., Lucci, C., Piantini, S., Allen, T.J., Savino, G., Gabler, H.C., 2022. Applicability Assessment of Active Safety Systems for Motorcycles Using Population-Based Crash Data: Cross-Country Comparison among Australia, Italy, and USA. Sustainability 14 13 , 7563. doi:10.3390/su14137563
Thalen, J.P., 2006. ADAS for the Car of the Future. University of Twente, Netherlands.
Titouan, 2021. Comment fonctionne l'alerte Virage Dangereux [WWW Document]. Aide Liberty Rider. URL https://help.liberty-rider.com/l/fr/article/d2cjyekmlo-comment-fonctionne-l-alerte-virage-dangereux (accessed 2.7.23).
Vabre, R., Naude, C., Sinnaeve, J., Perrin, C., Serre, T., 2022. Experimental braking tests with three motorcycles in different configurations, in: EVU 2022, 30th Annual Congress. Strasbourg, France, pp. pp1-8.
Van Elslande, P., 2003. Erreurs de conduite et besoins d'aide : une approche accidentologique en ergonomie. Le travail humain 66 3 , 197–224. doi:10.3917/th.663.0197
Van Elslande, P., 2000. L'erreur humaine dans les scénarios d'accident cause ou conséquence? Recherche - Transports - Sécurité 66, 7–31. doi:10.1016/S0761-8980(00)90002-5
Van Elslande, P., Fouquet, K., 2008. Drivers' needs and safety systems, in: Proceedings of the 15th European Conference on Cognitive Ergonomics: The Ergonomics of Cool Interaction. pp. 1–4.
Van Elslande, P., Hermitte, T., Jaffard, M., Fournier, J., Silvestrelli, A., Perrin, C., 2012. Deliverable 5.5 Drivers needs and validation of technologies (Project co-funded by the European Commision within the Seventh Framework Programme No. 5.5). IFSTTAR, France.
Van Elslande, P., Jallais, C., Rodon, C., Parraud, C., 2023. Guide pour la prise en compte des facteurs humains dans les analyses des accidents du transport terrestre (No. RP1 F21189). Université Gustave Eiffel, France.
Varin, B., Iskra, A., Ledoux, V., 2020. FLAM 2RM - Analyse des accidents mortels impliquant un deux-roues motorisés en 2015 - Rapport d'étude, juillet 2020. CERMA.
Vavryn, K., Winkelbauer, M., 2004. Braking performance of experienced and novice motorcycle riders–results of a field study, in: International Conference on Transport and Traffic Psychology.
Vittinghoff, E., Glidden, D.V., Shiboski, S.C., McCulloch, C.E., others, 2005. Regression methods in biostatistics: linear, logistic, survival, and repeated measures models, Statistics for Biology and Health. Springer, New York, NY.
Watzenig, D., Horn, M., 2016. Automated Driving: Safer and More Efficient Future Driving. Springer.

Wong, G., Wong, Y.D., 2022. Young male motorcycle rider perception response times to abrupt- and gradual-onset hazards. Accident Analysis & Prevention 165, 106519. doi:10.1016/j.aap.2021.106519

Zadry, H.R., Abdul Aziz, H., Widia, M., Sukadarin, E.H., Osman, H., Mohd Jawi, Z., Rahman, M.A., 2022. Traffic Accident in Indonesia and Blind Spot Detection Technology—An Overview, in: Hassan, M.H.A., Ahmad (a) Manap, Z., Baharom, M.Z., Johari, N.H., Jamaludin, U.K., Jalil, M.H., Mat Sahat, I., Omar, M.N. (Eds.), Human-Centered Technology for a Better Tomorrow. Springer, Singapore, pp. 231–242. doi:10.1007/978-981-16-4115-2_18

Zaman, F.H.K., Abdullah, S.A.C., Razak, N.A., Pasya, I., Johari, J., Kordi, N.E., 2020. Risk of Vehicle Blind Spot towards Motorcyclist Safety in Malaysia: Assessment on Perceptions of Behaviour. Journal of the Society of Automotive Engineers Malaysia 4 2 , 168–179. doi:10.56381/jsaem.v4i2.37

Zohari, M.H., Elias, M.L.M., Al-Fadhali, N.M.A., 2024. Safety Helmet with Collision Detection System. Journal of Advanced Industrial Technology and Application 5 1 , 76–82.

Annexes

Annexe 1 : Scénarios d'accidents

Ces pictogrammes ont été extraits des travaux de différents projets (Chauvel, 2011; Ledoux, 2021) :

- **SC 1 :** Ce scénario inclut tous les accidents impliquant au moins deux véhicules circulant dans la même direction ou sur des voies adjacentes (Figure A.1). Parmi les configurations possibles, on retrouve :
  - Un véhicule roule sur la voie adverse alors qu'un autre véhicule arrive en sens inverse.
  - Un véhicule roule dans l'accotement droit puis revient sur la chaussée, traverse les voies vers la gauche alors qu'un autre véhicule arrive en sens inverse.
  - Un véhicule se déporte vers la voie adverse alors qu'un véhicule arrive en sens inverse.
  - Un véhicule heurte l'arrière du véhicule précèdent qui maintenait son allure.
  - Un véhicule heurte l'arrière du véhicule précédent qui ralentissait.
  - Un véhicule arrive alors que le véhicule qui le précède fait un demi-tour.
  - Un véhicule arrive alors qu'un véhicule qui circulait sur la voie adverse effectue devant lui un demi-tour.
  - Un véhicule change de voie (ou se rabat) vers la droite et se fait percuter à l'arrière par un véhicule circulant sur cette voie.
  - Un véhicule change de voie (ou se rabat) vers la gauche et se fait percuter à l'arrière par un véhicule circulant sur cette voie.
  - Un véhicule circule dans une rue à sens unique alors qu'arrive en face un autre véhicule.
  - Le véhicule se déporte sur la droite, donne un coup de volant à gauche, mord l'accotement gauche, donne un coup de volant à droite et percute le véhicule venant en sens inverse
  - Un véhicule change de voie vers la droite et percute à l'arrière le véhicule qui circulait sur cette voie.
  - Un véhicule change de voie vers la gauche et percute à l'arrière le véhicule qui circulait sur cette voie.

- Un véhicule change de voie vers la gauche alors que le véhicule qui le précède change de voie vers la droite
- Un véhicule change de voie vers la droite alors que le véhicule qui le précède change de voie vers la gauche
- Autre cas d'accidents véhicules contre véhicules

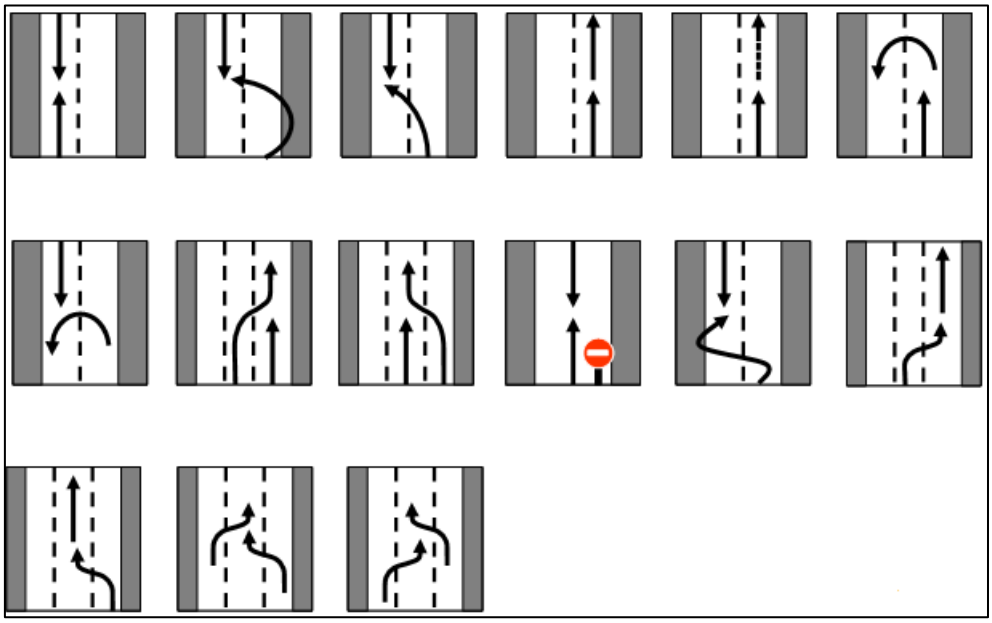


Figure A. 1. Les pictogrammes des SC1

❖ **SC 2 :** Ce scénario englobe tous les accidents impliquant des véhicules effectuant une tentative de dépassement, qu'il soit réalisé par la gauche ou la droite (Figure A.2). Parmi les configurations typiques :

- Un véhicule dépasse un autre véhicule et perd le contrôle lors de son rabattement.
- Un véhicule dépasse un autre véhicule et perd le contrôle au cours du dépassement.
- Un véhicule dépasse un véhicule et percute un autre véhicule arrivant en sens inverse.
- Un véhicule décide de dépasser alors qu'arrive derrière lui un véhicule en cours de dépassement.
- Un véhicule dépasse un véhicule qui décide de tourner à gauche.
- Collision entre deux véhicules qui dépassent simultanément sur une voie à sens variable
- Un véhicule décide de dépasser en 3ième position alors qu'arrive un autre véhicule en sens inverse.

- Un véhicule dépasse par la droite un véhicule qui décide de tourner ou change de voie vers la droite.
- Un véhicule en dépassement se rabat et percute le véhicule qui le précède.
- Un véhicule dépasse un véhicule arrêté pour tourner à gauche et percute un véhicule arrivant en sens inverse.
- Un véhicule dépasse un autre véhicule et perd le contrôle au cours du dépassement et heurte le véhicule qui arrive en sens inverse.
- Un véhicule remonte les files et percute un véhicule qui change de voie vers la gauche.
- Un véhicule remonte les files et percute un véhicule qui change de voie vers la droite.
- Un véhicule effectue un dépassement par la droite, perd le contrôle dans sa phase de rabattement et percute un véhicule arrivant en sens inverse
- Un véhicule effectue un dépassement par la droite et percute un véhicule en stationnement
- Autre cas d'accidents de dépassement

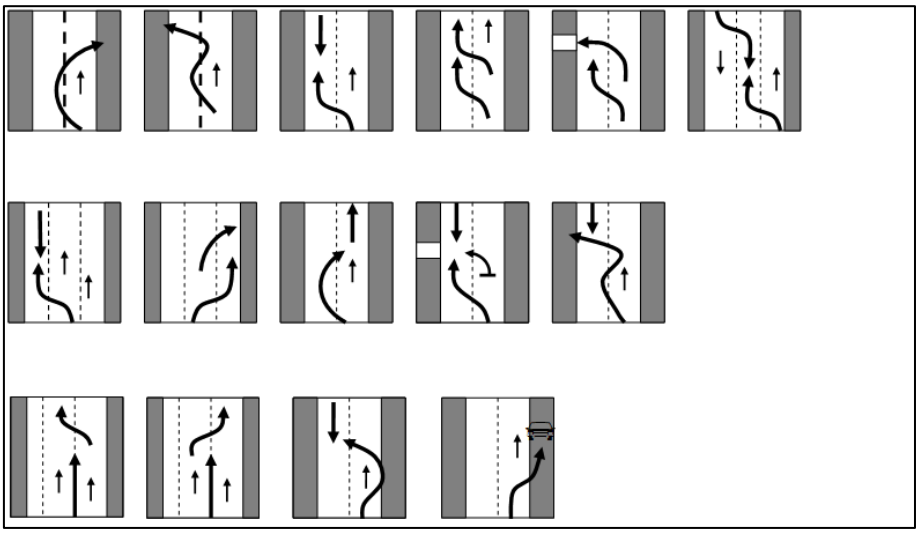


Figure A. 2. Les pictogrammes des SC2

❖ **SC3** : Ce scénario couvre tous les types d'accidents ayant lieu au niveau des intersections ((Figure A.3), incluant :

- Accident en intersection ; les 2 véhicules tournant à droite et provenant de directions opposées.
- Accident en intersection ; les 2 véhicules provenant de directions perpendiculaires et allant tout droit sur l'intersection.
- Accident en intersection ; 2 véhicules provenant de directions perpendiculaires, dont l'un venant de droite et allant tout droit et l'autre tournant à droite.

- Accident en intersection ; 2 véhicules provenant de directions perpendiculaires, dont l'un venant de gauche et allant tout droit et l'autre tournant à droite.
- Accident en intersection ; 2 véhicules provenant de directions perpendiculaires, dont l'un arrivant de gauche et allant tout droit et l'autre tournant à gauche.
- Accident en intersection ; les 2 véhicules provenant de directions opposées, dont l'un allant tout droit et l'autre tournant à gauche.
- Accident en intersection ; les 2 véhicules provenant de la même direction, dont le véhicule le plus à gauche décide de tourner à droite coupant la route de l'autre.
- Accident en intersection ; les 2 véhicules provenant de la même direction, dont le véhicule le plus à droite décide de tourner à gauche coupant la route de l'autre.
- Accident fronto-arrière en intersection ; le premier véhicule tournant à droite s'arrête pour laisser passer un autre usager alors que le second véhicule arrive derrière lui.
- Accident fronto-arrière en intersection ; le premier véhicule tournant à gauche s'arrête pour laisser passer un autre usager alors que le second véhicule arrive derrière lui.
- Accident en intersection ; 2 véhicules provenant de directions perpendiculaires, dont l'un venant de gauche tourne à droite et l'autre en dépassement allant tout droit.
- Accident en intersection ; 2 véhicules provenant de directions perpendiculaires, dont l'un arrivant de droite et allant tout droit et l'autre tournant à gauche.
- Sur-accident en intersection.
- Accident en intersection en T ; le véhicule va tout droit.
- Accident en intersection en Y ; le véhicule va tout droit.
- Accident en intersection ; 2 véhicules provenant de directions perpendiculaires dont l'un est en perte de contrôle.
- Accident en intersection ; 2 véhicules provenant de directions perpendiculaires dont l'un des 2 effectue un évitement.
- Accident en intersection ; 2 véhicules provenant de directions perpendiculaires, dont l'un venant de droite et allant tout droit et l'autre en dépassement allant tout droit.
- Accident en intersection ; 2 véhicules provenant de directions perpendiculaires, dont l'un arrivant de droite et tournant à droite s'arrête au milieu de l'intersection pour laisser passer d'autres usagers.
- Accident en intersection ; 2 véhicules provenant de directions opposées dont l'un des 2 effectue un évitement.
- Accident sur giratoire ; le véhicule circulant sur l'anneau intérieur décide de sortir du giratoire alors que se trouve un autre véhicule sur l'anneau extérieur.
- Accident sur giratoire ; un véhicule arrive trop vite sur un giratoire et va tout droit.
- Accident sur giratoire ; un véhicule s'insère sur le giratoire alors qu'un véhicule prioritaire arrive à sa gauche.
- Accident sur giratoire ; perte de contrôle d'un véhicule circulant dans le giratoire
- Accident sur giratoire ; renversement d'un véhicule circulant dans le giratoire (généralement poids-lourds)
- Accident sur giratoire ; autres configurations

- Accident sur bretelle d'entrée ; un véhicule provenant de la bretelle d'entrée se fait percuter à l'arrière par un autre véhicule.
- Accident sur bretelle d'entrée ; un véhicule provenant de la bretelle d'entrée percute l'arrière d'un autre véhicule.
- Accident sur bretelle d'entrée ; perte de contrôle d'un véhicule provenant de la bretelle d'entrée
- Accident sur bretelle d'entrée ; autres configurations d'accident
- Accident sur bretelle de sortie ; un véhicule décide au dernier moment d'emprunter la bretelle de sortie alors qu'un autre véhicule y circule
- Accident sur bretelle de sortie ; un véhicule empruntant la bretelle de sortie décide au dernier moment de revenir sur la voie de circulation alors qu'un autre véhicule arrive
- Accident sur bretelle de sortie ; perte de contrôle d'un véhicule empruntant la bretelle de sortie
- Accident sur bretelle de sortie ; autres configurations d'accident
- Autres cas d'accidents en intersection.

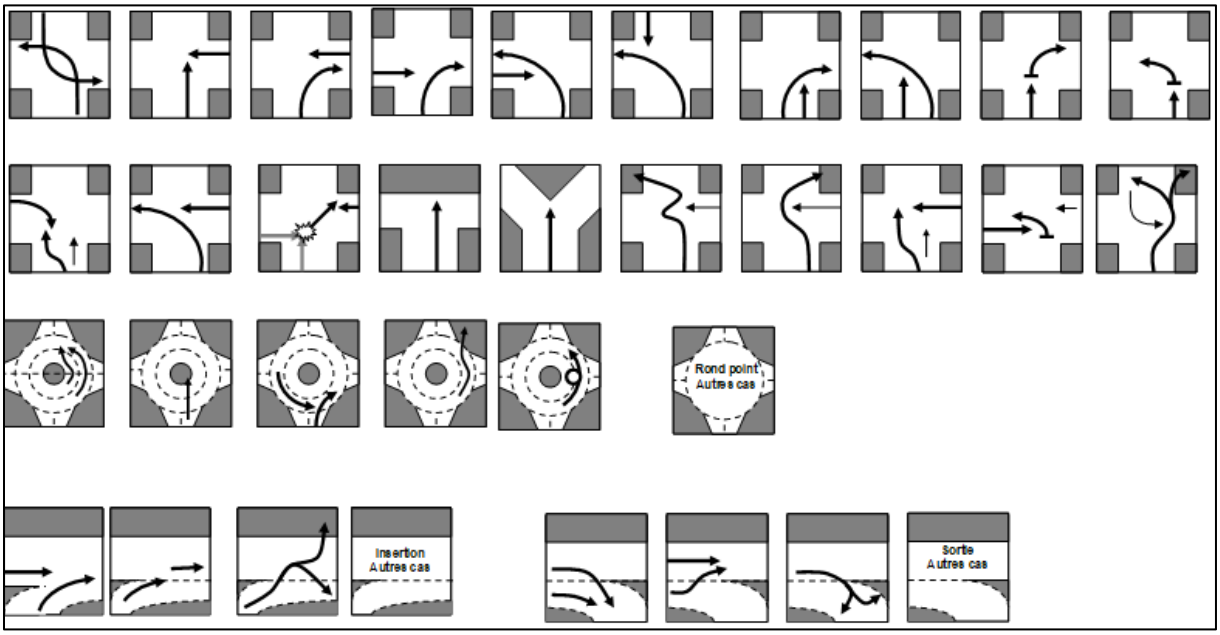


Figure A. 3. Les pictogrammes des SC3

❖ **SC4** : Ce scénario inclut les accidents impliquant des véhicules en stationnement ou en phase de stationnement (Figure A.4) :

- Un véhicule surpris par le démarrage d'un véhicule en stationnement de son côté de circulation, fait un évitement.
- Véhicule stationné à gauche et quittant son emplacement se fait heurter par un véhicule arrivant derrière lui.
- Véhicule stationné à gauche et quittant son emplacement pour rejoindre sa voie de circulation à droite se fait heurter par un véhicule circulant en sens inverse ».

- Véhicule stationné à droite et quittant son stationnement se fait heurter par un véhicule arrivant derrière lui.
- Accident contre un véhicule en stationnement à droite.
- Accident contre un véhicule en stationnement à gauche.
- Véhicule stationné à droite et quittant son stationnement est heurté par un véhicule venant d'en face.
- Véhicule sortant d'une voie privée ou d'un parking et tournant à droite est percuté par un véhicule arrivant de sa droite
- Véhicule sortant d'une voie privée ou d'un parking tournant à gauche est percuté par un véhicule provenant de sa gauche
- Véhicule sortant d'une voie privée ou d'un parking et tournant à droite est percuté par un véhicule arrivant de sa gauche
- Véhicule sortant d'une voie privée ou d'un parking tournant à gauche est percuté par un véhicule provenant de sa droite
- Véhicule sortant d'une voie privée ou d'un parking ; autres configurations
- Véhicule entrant dans une voie privée ou un parking à droite est percuté par un véhicule circulant derrière lui
- Véhicule entrant dans une voie privée ou un parking à gauche est percuté par un véhicule circulant derrière lui
- Véhicule entrant dans une voie privée ou un parking à droite est percuté par un véhicule circulant en sens inverse.
- Véhicule entrant dans une voie privée ou un parking à gauche est percuté par un véhicule circulant dans la direction opposée
- Véhicule entrant dans une voie privée ou un garage ; autres configurations
- Autres cas d'accidents avec véhicule quittant ou étant en stationnement

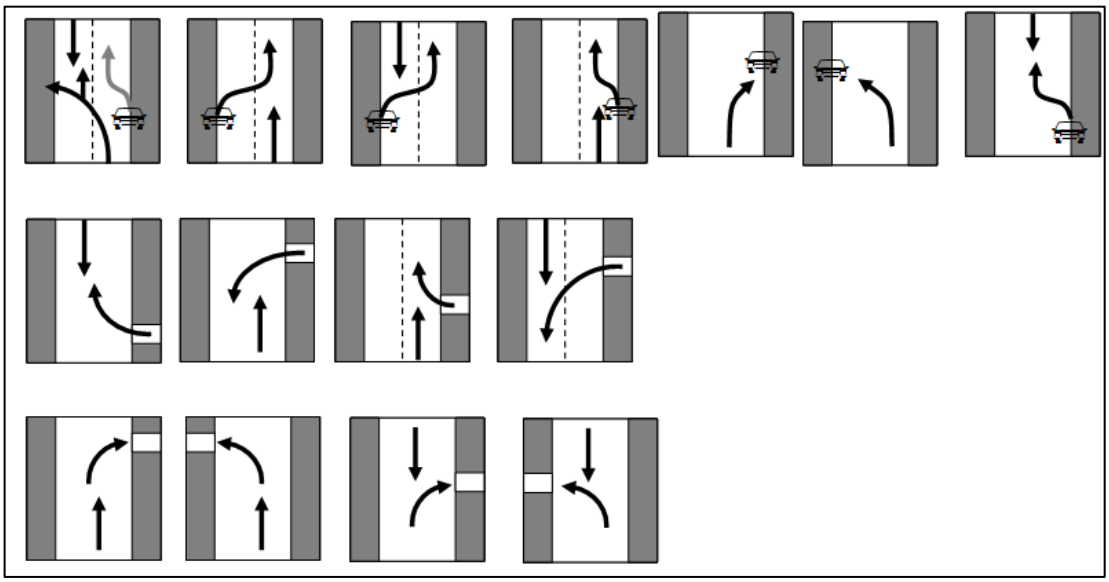


Figure A. 4. Les pictogrammes des SC4

❖ **SC5** : Ce scénario couvre les situations où un véhicule perd le contrôle sans implication d'un autre véhicule (Figure A.5) :

- Véhicule seul en cause sort de la chaussée par la gauche après avoir mordu l'accotement droit.
- Véhicule seul en cause avec sortie de voie à gauche.
- Véhicule seul en cause avec sortie de voie à droite.
- Véhicule seul en cause avec sortie de voie à droite après avoir mordu l'accotement à gauche.
- Véhicule seul en cause avec sortie de voie à droite après avoir mordu les 2 accotements (peu importe l'ordre).
- Le véhicule mord la voie inverse et sort à droite
- Le véhicule mord l'accotement droit, revient sur la chaussée et ressort à droite
- Véhicule seul en cause avec sortie de voie à droite après une amorce ou un tonneau sur la route.
- Véhicule seul en cause avec sortie de voie à gauche après avoir mordu accotement droit suivi d'une amorce ou d'un tonneau sur la route.
- Véhicule seul en cause avec sortie de voie à droite après avoir mordu accotement gauche suivi d'une amorce ou d'un tonneau sur la route.
- Véhicule seul en cause avec sortie de voie à gauche après une succession de zigzag sur la route.

- Véhicule seul en cause avec sortie de voie à droite après une succession de zigzag sur la route.
- Autres cas d'accidents avec véhicule seul en cause.

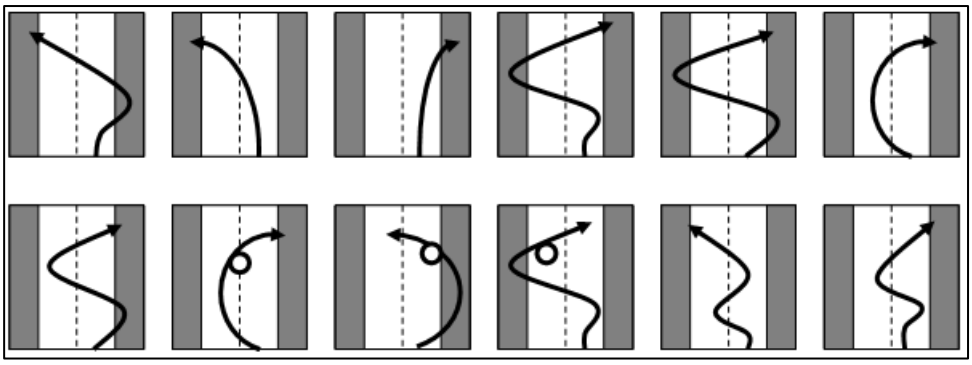


Figure A. 5. Les pictogrammes des SC5

- **SC autre** : Accidents hors des catégories précédentes.
  Ce scénario regroupe tous les autres types d'accidents qui ne peuvent pas être classés dans les catégories précédentes. Parmi ces situations :
  - Les accidents impliquant un piéton, tels que les collisions en traversée de route.
  - Les accidents impliquant des animaux.
  - Les accidents dus à des événements externes (météorologie, infrastructures défaillantes, etc.).

Annexe 2 : Instant présumé du choc

$$X_m = \frac{\gamma_{acc}}{2}t^2 + S_i t$$

$$X_o = \frac{\gamma_o}{2}t^2 + S_0 t + TD$$

$X_m = X_o$:

$$\frac{\gamma_o - \gamma_{acc}}{2}t^2 + (S_0 - S_i)t + TD = 0$$

$$\Delta = (S_0 - S)^2 - 2(\gamma_o - \gamma_{acc})TD$$

$$t = \frac{S_i - S_0 - \sqrt{\Delta}}{\gamma_o - \gamma_{acc}}$$

Avec : X_m : Position du 2RM
X_o : Position du véhicule adverse
S_i Vitesse initale de la moto
S_o Vitesse initale du véhicule adverse
γ_{acc} Décélération de l'ACC
γ_o Décélération du véhicule adverse
TD Distance de déclenchement

Annexe 3 : Mode d'emploi de l'application AEB

Cette application repose sur l'algorithme décrit dans la section VIII.2.1 et est structurée en plusieurs zones fonctionnelles distinctes, chacune dédiée à une étape spécifique de la simulation (Figure A.6).

a) Zone 1 : Chargement des données d'entrée et reconstruction cinématique

La première zone permet d'initier le processus de simulation en définissant le chemin d'accès aux données de l'accident sélectionné. Cette étape comprend :

- Le chargement des fichiers d'entrée, notamment un fichier Excel contenant la reconstruction cinématique détaillée de l'accident, ainsi qu'une carte illustrant le lieu de l'accident.
- La recalibration des positions initiales des différents véhicules impliqués.

- La génération des trajectoires spatio-temporelles pour chaque véhicule à partir des données d'entrée.

Cette étape est essentielle pour garantir une représentation précise et cohérente de la dynamique de l'accident à simuler.

b) Zone 2 : Paramètres de détection

La deuxième zone est dédiée à la configuration des paramètres de détection. Elle permet :

- De définir le champ de vision et la portée du capteur simulé.
- De simuler la phase de détection indépendamment, pour évaluer si le système AEB peut détecter le véhicule adverse dans les conditions spécifiques de l'accident.

c) Zone 3 : Paramètres de déclenchement de l'AEB

Dans cette zone, l'utilisateur configure les conditions de déclenchement de l'AEB. Les principaux paramètres incluent :

- La stratégie de freinage utilisée par l'AEB : Conservative, Standard, Progressive.
- La décélération maximale appliquée par le système.

Cette étape vise à définir les critères selon lesquels l'AEB intervient pour prévenir ou atténuer la collision.

d) Zone 4 : Simulation complète et génération des résultats

La quatrième zone est dédiée à l'exécution des simulations complètes en tenant compte des configurations définies dans les zones précédentes. Elle permet :

- De lancer les calculs pour chaque configuration des paramètres de détection et de déclenchement.
- De générer les 225 simulations correspondant aux différentes combinaisons des scénarios pour chaque cas d'accident.
- De produire un fichier Excel regroupant les résultats des calculs de toutes les simulations.
- De tracer des graphiques spécifiques pour visualiser les trajectoires et les données pertinentes liées à l'accident.

e) Zone 5 : Analyse des résultats et post-traitement

Cette zone regroupe les fonctionnalités de post-traitement pour analyser les résultats obtenus. Les utilisateurs peuvent :

- Comparer les simulations entre différents échantillons définis.
- Identifier les écarts de performance entre les deux scénarios avec et sans AEB (par exemple, réduction des vitesses d'impact ou accidents évités).
- Générer des statistiques globales sur les effets du système AEB.

f) Zone 6 : Visualisation des graphiques

Cette zone contient différents onglets permettant de visualiser les graphiques générés. Ces graphiques offrent une représentation visuelle des résultats, comme :

- Des histogrammes du taux de réduction de la vitesse d'impact,
- Les proportions de détection des véhicules adverses
- Les proportions de déclenchement de l'AEB.

g) Zone 7 : Simulation visuelle et cartographie

La dernière zone permet d'intégrer une cartographie des lieux de l'accident et de visualiser la simulation en temps réel. Cette fonctionnalité offre une représentation dynamique des interactions entre les véhicules, mettant en évidence :

- Les phases de détection et de déclenchement,
- Les trajectoires recalculées en fonction des paramètres de simulation,
- Les zones critiques d'interaction entre les véhicules.

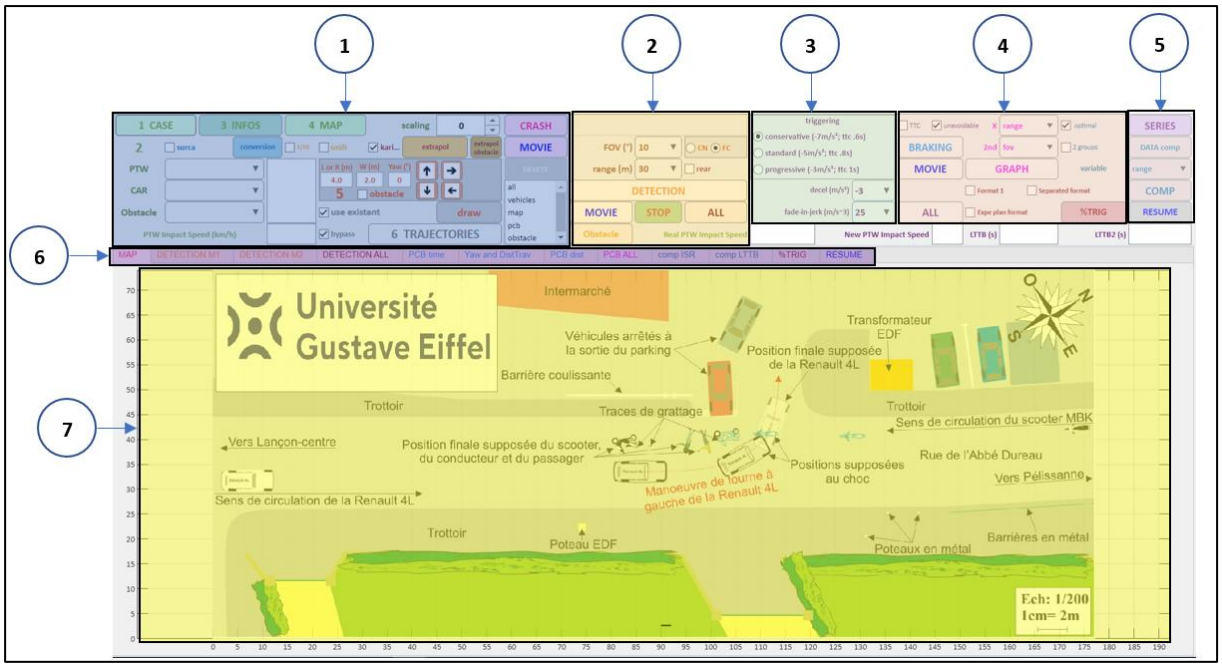


Figure A. 6. Application de simulation de l'AEB pour 2RM