



Rapport n°2023-R-17-FR

Impact des caractéristiques des véhicules sur la gravité des lésions des occupants de voiture et de la partie adverse



Numéro de rapport	R-2023-R-17-FR
Dépôt légal	D/2023/0779/38
Client	Service Public Fédéral Mobilité et Transports
Date de publication	30/08/2023
Auteurs	Nina Nuyttens, Younes Ben Messaoud
Relecteurs	Ragnhild Davidse (SWOV), Annelies Schoeters (institut Vias), Evi Dons (institut Vias), Stef Willems (institut Vias), Benoit Godart (institut Vias), Jean-François Gaillet (institut Vias)
Editeur responsable	Karin Genoe

Les vues ou opinions exprimées dans ce rapport ne sont pas nécessairement celles du client.

La reproduction des informations de ce rapport est autorisée à condition que la source soit explicitement mentionnée :

Nuyttens, N., & Ben Messaoud, Y. (2023). Impact des caractéristiques des véhicules sur la gravité des lésions des occupants de voiture et de la partie adverse, Bruxelles : institut Vias

Dit rapport is eveneens beschikbaar in het Nederlands.

This report includes a summary in English.

Table des matières

Liste des tableaux et figures	6
Terminologie	7
Résumé	9
Summary	12
1 Introduction	15
2 Littérature	16
2.1 Masse du véhicule	16
2.1.1 Occupants de voiture	16
2.1.2 Usagers vulnérables	16
2.2 Puissance du véhicule	17
2.3 Hauteur de capot	17
2.3.1 Occupants de voiture	17
2.3.2 Usagers vulnérables	18
2.4 Notations de sécurité Euro NCAP	19
2.4.1 Occupants de voiture	19
2.4.2 Usagers vulnérables	19
2.5 Age du véhicule	20
2.5.1 Occupants de voiture	20
2.5.2 Usagers vulnérables	20
2.6 Type de voiture : SUV et pick-up	21
2.6.1 Occupants de voiture	21
2.6.2 Usagers vulnérables	21
2.7 Voitures électriques	22
2.7.1 Occupants de voiture	22
2.7.2 Usagers vulnérables	23
2.8 Résumé de littérature	23
3 Données et méthodes	25
3.1 Sources de données	25
3.2 Stratégie d'analyse	25
4 Résultats et discussion	27
4.1 Caractéristiques des véhicules ayant un impact direct sur la gravité des lésions	27
4.1.1 Cohérence entre les caractéristiques des véhicules	27
4.1.2 Masse du véhicule	27
4.1.3 Puissance du véhicule	29
4.1.4 Hauteur de capot	29
4.1.5 Notations de sécurité Euro NCAP	30
4.2 Caractéristiques des véhicules ayant un impact indirect sur la gravité des lésions	32
4.2.1 Type de voiture : SUV et pick-up	32
4.2.2 Voitures électriques	34
4.2.3 Age du véhicule	35

4.3 Evolution des caractéristiques des véhicules	37
5 Conclusions et recommandations	42
Références	44
Annexes	47
5.1 Annexe 1 : Détermination de la hauteur de capot	47
5.2 Annexe 2 : Couplage de bases de données	48

Liste des tableaux et figures

Tableau 1 : Relation entre les caractéristiques des véhicules et la gravité des lésions chez les occupants de voiture, les opposants en voiture et les usagers vulnérables sur la base de l'étude de littérature .	9
Tableau 2 : Relation entre les caractéristiques des véhicules et la gravité des lésions chez les occupants de voiture, les opposants en voiture et les usagers vulnérables sur la base de l'analyse statistique	10
Tableau 3 : Evolution des caractéristiques des voitures impliquées dans des accidents corporels selon l'année d'immatriculation	11
Tableau 4: Relationship between vehicle characteristics and injury severity among car occupants, car opponents and vulnerable road users, based on the literature review	12
Tableau 5: Relationship between vehicle characteristics and injury severity among car occupants, car opponents and vulnerable road users, based on the statistical analysis.....	13
Tableau 6: Evolution of vehicle characteristics of passenger cars in injury accidents by registration year. ...	14
Tableau 7 : Relation entre les caractéristiques de véhicule et la gravité des lésions chez les occupants de voiture, les opposants en voiture et les usagers vulnérables, sur la base de l'étude de littérature	24
Tableau 8 : Corrélations entre les variables influençant directement la gravité des lésions	27
Tableau 9 : Risque de lésions graves et mortelles en cas d'augmentation de la masse de 300 kg	27
Tableau 10 : Risque de lésions graves et mortelles pour différents rapports de masse entre le véhicule de la victime et celui de l'opposant	28
Tableau 11 : Risque de lésions graves et mortelles en cas d'augmentation de la puissance de 50 kW	29
Tableau 12 : Risque de lésions graves et mortelles en cas d'augmentation de la hauteur de capot de 10 cm	29
Tableau 13 : Risque de lésions graves et mortelles en cas d'augmentation d'1 étoile de la notation Euro NCAP pour les occupants d'une voiture.....	30
Tableau 14 : Risque de lésions graves et mortelles chez les adultes et les enfants en cas de hausse de 10% respectivement de l'évaluation de la protection des passagers adultes et des jeunes passagers par Euro NCAP	30
Tableau 15 : Risque de lésions graves et mortelles chez les piétons et les cyclistes en cas d'augmentation de 10% du score Euro NCAP Vulnerable Road Users	31
Tableau 16 : Risque de lésions graves et mortelles lorsqu'un SUV est impliqué dans un accident corporel ..	32
Tableau 17 : Risque de lésions graves et mortelles lorsqu'un pick-up est impliqué dans un accident corporel	32
Tableau 18: Risque de lésions graves et mortelles si les usagers vulnérables sont heurtés par un SUV	33
Tableau 19: Risque de lésions graves et mortelles si les usagers vulnérables sont heurtés par un pick-up ..	33
Tableau 20 : Risque de lésions graves et mortelles lorsqu'une voiture électrique est impliquée dans un accident corporel.....	34
Tableau 21 : Risque de lésions graves et mortelles en cas d'augmentation de l'âge du véhicule	35
Figure 1 : Masse, puissance et hauteur de capot moyennes des voitures impliquées dans les accidents corporels selon l'année d'immatriculation	38
Figure 2 : Part de voitures impliquées dans les accidents corporels avec une notation Euro NCAP d'au moins 4 selon l'année d'immatriculation	39
Figure 3 : Part de SUV impliqués dans les accidents corporels selon l'année d'immatriculation	39
Figure 4 : Part de SUV impliqués dans les accidents corporels selon la taille et l'année d'immatriculation ..	40
Figure 5 : Nombre de pick-up impliqués dans les accidents corporels selon l'année d'immatriculation ..	40
Figure 6 : Part de voitures électriques impliquées dans les accidents corporels selon l'année d'immatriculation	41
Figure 7 : Détermination de la hauteur de capot ou bonnet lead edge height (BLEH) (Figure issue de (Saadé et al., 2020) déjà déduite d'une Figure du Règlement européen n° 631/2009)	47
Figure 8 : Couplage de bases de données	48

Terminologie

Mode de déplacement

Usager vulnérable. Piéton, cycliste, cyclomotoriste ou motocycliste.

Piéton. Une personne qui se déplace à pied. Sont incluses les personnes qui poussent un véhicule non motorisé qui n'est pas plus large que l'espace requis pour les piétons (par ex. un fauteuil roulant) et les personnes qui guident une bicyclette, un cycle motorisé ou un cyclomoteur à deux roues à la main.

Cycliste. Conducteur d'un vélo ou d'un vélo à assistance au pédalage (à l'exclusion des speed pedelecs).

Cyclomotoriste. Conducteur d'un cyclomoteur classe A, d'un cyclomoteur classe B, ou d'un speed pedelec.

Motocycliste. Conducteur d'une moto.

Voiture. Dans le présent rapport, les voitures sont des véhicules répondant aux trois critères suivants dans les données couplées :

- Elles sont enregistrées comme voitures sur la base de la variable « cod_ru_typ_cl »
- Elles ne sont certainement pas enregistrées comme « autobus », « camion », « cyclomoteurs » ou « moto » selon la variable « car_class »
- Elles sont enregistrées comme « M1 » sur la base de la variable « categorycode »

SUV. Il s'agit de l'ensemble des voitures de la catégorie « SUV (Taille XL) », « SUV (Taille L) », « SUV (Taille M) », « SUV (Taille S) », « SUV (Taille XS) » selon la variable « car_class ».

Pick-up. C'est un véhicule qui n'est pas enregistré comme « autobus », « camion », « cyclomoteur » ou « moto » selon la variable « car_class » et dont la marque (variable cod_car_typ) comporte l'un des modèles suivants : « Dodge Ram », « Dodge Dakota », « Tanoak », « Amarok », « Fullback », « Ford Ranger », « Ford Maverick », « Ford F-150 », « Isuzu D-Max », « Mazda Bt50 », « Mitsubishi L200 », « Nissan Navara », « Nissan Frontier », « Titan », « Ram 1500 », « Alaskan », « Actyon Sp », « Musso », « Hilux », « Tundra », « Tacoma », « Hummer H2 Sut », « Hummer H3 Sut », « Strada », « Gladiator », « Defender », « Cadillac Escalade Ext », « Chevrolet Avalanche », « Chevrolet Silverado », « Chevrolet Colorado », « Chevrolet Montana », « Campo », « Subaru Baja », « Subaru Brat », « Mercedes Benz X », « Lincoln Blackwood », « Lincoln Mark Lt », « Honda Ridgeline », « Gmc Canyon » et « Gmc Sierra ».

Voiture électrique. Il s'agit des véhicules 100% électriques non équipés d'un moteur à combustion. Les véhicules hybrides ne sont donc pas repris dans cette catégorie. Il s'agit des véhicules avec « électricité » comme carburant selon la variable « fuel_code_r ».

Accidents corporels et personnes impliquées

Accident corporel. Tout accident dans lequel au moins un véhicule circule sur une route publique ou sur une route privée à laquelle (une partie de) la circulation a accès, et dans lequel au moins une personne est blessée ou décède.

Tué dans la circulation. Toute victime d'un accident de la route qui décède sur place ou dans les 30 jours suivant la date de l'accident à la suite de l'accident de la route.

Blessé grave. Toute personne blessée dans un accident de la route et dont l'état nécessite une hospitalisation de plus de 24 h.

Blessé léger. Toute personne blessée dans un accident de la route et à laquelle ne s'applique pas le statut de « blessé grave » ou de « tué dans la circulation ».

Indemne. Toute personne impliquée dans un accident de la route et à laquelle ne s'applique pas le statut de « blessé léger », de « blessé grave » ou de « tué dans la circulation ».

Risque de lésions graves. Risque d'être grièvement ou mortellement blessé en cas d'accident de la circulation.

Risque de lésions mortelles. Risque d'être mortellement blessé en cas d'accident de la circulation.

Agressivité des chocs. Il s'agit de l'incapacité d'un véhicule à protéger les opposants en cas de collisions.

Résistance aux chocs. Il s'agit de la capacité d'un véhicule à protéger les occupants en cas de collisions.

Statistique

Odds et Odds ratio. Les « odds » sont la probabilité que quelque chose se produise par rapport à la probabilité que quelque chose ne se produise pas : $p/(1-p)$. Si, par exemple, la probabilité de lésions graves/mortelles est de 10 %, les odds sont de $0,1/(1-0,1) = 0,11 : 0,1 / (1-0,1) = 0,11$.

L'odds ratio est le rapport de deux odds. Par exemple, si les odds de lésions graves/mortelles sont de 0,22 pour les hommes et de 0,11 pour les femmes, l'odds ratio est de $0,22/0,11 = 2$. Dans le présent rapport, l'odds ratio reflète l'augmentation/la baisse de l'odds de lésions graves ou mortelles pour une catégorie spécifique de personnes (ex. : occupants de SUV) par rapport à une catégorie de référence (ex. : occupants de non-SUV). Un odds ratio supérieur à 1 indique une probabilité élevée de lésions graves/mortelles pour un groupe spécifique par rapport au groupe de référence, tandis qu'un odds ratio inférieur à 1 indique une probabilité moindre. Exemple : un odds ratio de 1,5 pour les lésions graves pour les occupants de pick-up par rapport aux occupants de non-pick-up signifie que l'odds/le risque de lésions graves pour le premier groupe est 1,5 fois ou 50% plus élevé que pour le second groupe.

Dans la suite de ce rapport, le terme « odds » est rarement utilisé et le terme « risque » lui est préféré. Ce choix a été opéré car le terme « odds » n'est pas connu du grand public. D'un point de vue statistique, « odds » et « risque » sont deux notions distinctes, mais tant que la probabilité d'un événement ne dépasse pas 10%, ces deux notions donnent lieu à des résultats très analogues. C'est le cas dans ce rapport car la probabilité de subir des lésions mortelles n'est jamais supérieure à 3% et la probabilité de subir des lésions graves n'est généralement pas beaucoup plus élevée que 10%.

Réf. ou cat. Réf. Catégorie de référence. Il s'agit de la catégorie d'une variable catégorielle utilisée pour comparer les effets des autres catégories.

Niveau de signification. Lorsqu'un effet est statistiquement significatif, cela signifie qu'il est vraisemblable qu'il ne repose pas sur le hasard. Il existe différents niveaux de signification variant de « légèrement significatif » à « très significatif », exprimés comme suit : * $p < ,05$ (« significatif »); ** $p < ,01$; *** $p < ,001$ (« très significatif »). « NS » signifie « non significatif » et est utilisé lorsque la valeur-p est supérieure à ,05. Les « . » signifient qu'un effet est presque statistiquement significatif : la valeur-p se situe donc entre ,05 et < ,1.

Résumé

La gravité des lésions des personnes impliquées dans un accident de la circulation est déterminée par des facteurs divers : des facteurs liés aux personnes elles-mêmes (l'âge par exemple), des facteurs liés à l'accident et son environnement (ex. : type de collision, limitation de vitesse), et les facteurs liés aux véhicules impliqués (ex. : masse des véhicules). C'est sur cette dernière catégorie de facteurs que se concentre le présent rapport.

Les questions d'enquête de cette étude sont les suivantes :

- Quelles caractéristiques d'une voiture déterminent la gravité des lésions des occupants de voiture (dans les accidents corporels impliquant d'autres voitures) ?
- Quelles caractéristiques d'une voiture influencent la gravité des lésions des opposants parmi les occupants d'une voiture et les usagers vulnérables¹?

Huit caractéristiques de véhicule (Tableau 1) ont été passées au crible : d'abord, par le biais d'une étude de littérature, ensuite via une analyse statistique des données d'accidents belges. Pour sept de ces huit caractéristiques analysées, l'étude de littérature a pu démontrer une corrélation avec la gravité des lésions. Pour ce qui est de la huitième caractéristique du véhicule, qu'il s'agisse d'une voiture électrique ou non, les données et les études sont pour l'instant trop peu nombreuses pour démontrer l'existence d'un lien éventuel avec la gravité des lésions.

Tableau 1 : Relation entre les caractéristiques des véhicules et la gravité des lésions chez les occupants de voiture, les opposants en voiture et les usagers vulnérables sur la base de l'étude de littérature²

	Occupants de voiture		Partie adverse : opposants en voiture		Partie adverse : usagers vulnérables	
	Risque de lésions graves	Risque de lésions mortelles	Risque de lésions graves	Risque de lésions mortelles	Risque de lésions graves	Risque de lésions mortelles
Augmentation de la masse	-	-	+	+		+=
Augmentation de la puissance						
Augmentation de la hauteur de capot			+		+ (score piéton)	+ (score piéton)
Augmentation de la notation Euro NCAP	-	-			-	-
SUV versus non-SUV	-	-	+	+	+=	+=
Pick-up versus non-pick-up	-	-	+	+	+=	+=
Voiture électrique versus voiture non électrique ³	=	=	=	=	=	=
Augmentation de l'âge du véhicule	+	+	+ ⁴	+	+ ⁵	+

L'analyse statistique consiste en des régressions logistiques univariées et multivariées, modélisant le risque de lésions graves d'une part et le risque de lésions mortelles d'autre part. L'ensemble de données sur la base duquel les analyses sont réalisées est le résultat du couplage de plusieurs sources de données : données d'accidents, données sur les véhicules, données Euro NCAP et données sur la hauteur de capot.

¹ Piétons, cyclistes, cyclomotoristes et motocyclistes.

² Une augmentation ou une diminution du risque de lésions graves ou mortelles est respectivement indiquée par « + » et « - ». Lorsqu'aucun effet n'a été relevé, c'est indiqué par « = ». Une combinaison « += » signifie que certaines études constatent une augmentation tandis que d'autres ne relèvent aucun effet. Une cellule vide signifie que nous n'avons pas trouvé de littérature.

³ Une seule étude a pu être trouvée sur ce sujet et elle n'a pas mis en évidence de différence significative en termes de gravité des lésions entre les accidents impliquant des voitures électriques d'une part et les accidents impliquant des voitures à moteur à combustion d'autre part.

⁴ Les opposants heurtés par un véhicule plus récent dans une collision par l'arrière courent moins de risques de lésions graves que lorsqu'ils sont percutés par un véhicule plus âgé.

⁵ Les piétons heurtés par des véhicules plus récents courent moins de risques de lésions graves grâce à la présence de systèmes de sécurité modernes tels que l'Automatic Emergency Braking (AEB).

Le Tableau 2 synthétise les résultats des analyses statistiques, plus précisément des régressions logistiques univariées. Le tableau présente exclusivement des effets statistiquement significatifs. Un lien avec la gravité des lésions a été établi pour toutes les caractéristiques des véhicules, à l'exception du fait que la voiture soit électrique ou non.

Tableau 2 : Relation entre les caractéristiques des véhicules et la gravité des lésions chez les occupants de voiture, les opposants en voiture et les usagers vulnérables sur la base de l'analyse statistique

	Occupants de voiture ⁶		Partie adverse : opposants en voiture		Partie adverse : usagers vulnérables	
	Risque de lésions graves	Risque de lésions mortelles	Risque de lésions graves	Risque de lésions mortelles	Risque de lésions graves	Risque de lésions mortelles
Masse : + 300 kg	-32%	-48%	+37%	+77%	+7%	+28%
Puissance : + 50 kW	-55%	-65%	+54%	+127%		
Hauteur de capot : + 10 cm						+27%
Notation Euro NCAP : + 1 étoile			+25%			
SUV versus non-SUV	-26%	-52%	+18%			
Pick-up versus non-pick-up	-64%		+50%		+91%	+196%
Voiture électrique versus voiture non électrique						
Age du véhicule : « ≥ 12 ans » versus « 0-3 ans »	+60%				+17%	

A l'exception de l'âge du véhicule, nous notons que les caractéristiques des véhicules réduisant la gravité des lésions des occupants de voiture, comme une masse élevée, sont plutôt préjudiciables pour la partie adverse. Par exemple, lorsque la masse d'un véhicule augmente de 300 kg, le risque de perdre la vie chez les occupants de voiture diminue de moitié tandis que ce même risque augmente de respectivement 77% pour les opposants en voiture et de 28% pour les usagers vulnérables. Nous observons la même tendance pour d'autres caractéristiques telles que la puissance des pick-up. Cela indique une relation opposée entre la sécurité des occupants et la sécurité des opposants, ou en d'autres termes : les véhicules ayant une grande capacité à protéger leurs occupants (= grande résistance aux chocs) ont tendance à avoir une plus faible capacité à protéger la partie adverse (= grande agressivité des chocs).

Nous ne relevons toutefois pas cette corrélation au niveau de l'âge du véhicule. En comparaison des voitures récentes (0-3 ans), les voitures plus âgées (≥ 12 ans) font augmenter le risque de lésions graves aussi bien chez les occupants de voiture que chez les usagers vulnérables heurtés (respectivement de 60 et de 70%). Par conséquent, plus un véhicule est récent, plus il protège et les occupants de voiture et les usagers vulnérables. Pour ce qui est de la hauteur de capot, une hausse de 10 cm accroît de 27% le risque de décès chez les usagers vulnérables.

Concernant la notation générale Euro NCAP, qui représente la sécurité des occupants de voiture selon une échelle allant de 0 à 5 étoiles, nous ne trouvons pas de résultats statistiquement significatifs pour les occupants de voiture. D'un autre côté, nous notons qu'une hausse d'une étoile fait augmenter de 25% le risque de lésions graves chez les occupants de voiture de la partie adverse. Ce résultat est toutefois statistiquement significatif et peut vraisemblablement s'expliquer par la masse et la puissance moyennes plus élevées des voitures ayant obtenu des notations Euro NCAP supérieures à la moyenne. Par exemple, une voiture ayant obtenu 5 étoiles pèse 250 kg de plus qu'une voiture ayant obtenu 4 étoiles, et sa puissance est supérieure de 21 kW en moyenne.

En complément des deux principales questions de recherche, cette étude tente également de répondre à la question de savoir comment les caractéristiques des véhicules évoluent dans le parc automobile. La masse des voitures augmente-t-elle d'année en année par exemple ? Et de quelle manière ces évolutions affectent-elles la résistance aux chocs et l'agressivité des chocs des voitures en cas de collision ? En l'absence de données relatives à l'ensemble du parc automobile (c'est-à-dire incluant les voitures non impliquées dans des accidents

⁶ Il s'agit des occupants de voiture impliqués dans des accidents corporels avec d'autres voitures.

corporels), nous répondons à ces questions par une analyse descriptive de notre ensemble de données, qui se limite aux voitures impliquées dans des accidents corporels. Le Tableau 3 résume nos conclusions.

Tableau 3 : Evolution des caractéristiques des voitures impliquées dans des accidents corporels selon l'année d'immatriculation

Caractéristique du véhicule	Evolution de 2000 à 2021
Masse (moyenne)	+ 28%
Puissance (moyenne)	+ 60%
Hauteur de capot (moyenne)	+ 14% (jusqu'à 2020)
Notation Euro NCAP (part notation 4 ou 5)	Relativement stable entre 2010 et 2020
SUV (part)	Augmentation de 1% à 39%
Pick-up (part)	Le faible nombre de véhicules ne permet pas de percevoir une évolution.
Voiture électrique (part)	Hausse de 0,0% à 3,3%

Sur la base du Tableau 3, nous notons cinq augmentations depuis le début de l'année 2000 : la masse, la puissance, la hauteur de capot, la part de SUV et la part de voitures électriques. Il s'agit là de cinq hausses qui ont fait augmenter la résistance aux chocs et l'agressivité des chocs du parc automobile au cours des dernières années.

Forts des résultats de cette étude, nous pouvons conclure que les tendances et les résultats observés sont surtout préjudiciables pour deux groupes d'usagers : les usagers vulnérables et les occupants de voiture circulant à bord de voitures moins robustes (voitures ayant une masse et une puissance plus faibles). Ces résultats donnent lieu, entre autres, aux recommandations suivantes : « un élargissement des différents indicateurs Euro NCAP pour y inclure un indicateur évaluant la sécurité pour les opposants en voiture et la poursuite de la mise en œuvre d'exigences plus strictes pour les véhicules afin de protéger les usagers vulnérables. »

Summary

Several factors determine the injury severity of persons involved in a road crash: factors related to the persons themselves (e.g., age), factors related to the crash and its environment (e.g., collision type, speed limit), and factors related to the vehicles involved (e.g., vehicle mass). It is on this last group of factors, vehicle characteristics, that this report focuses.

The research questions of this study are as follows:

- What vehicle characteristics of a passenger cars determine the injury severity of car occupants (in road crashes involving other passenger cars)?
- Which vehicle characteristics of a passenger car affect the injury severity of opponents, both passenger car occupants and vulnerable road users⁷?

Eight vehicle characteristics (Tableau 4) are examined, first through a literature review, then through a statistical analysis of Belgian crash data. For seven of the eight investigated vehicle characteristics, the literature review can show a relationship with injury severity. For the eighth vehicle characteristic, the fact whether a passenger car is electric or not, there are, for the time being, insufficient data and studies to show a possible link with injury severity.

Tableau 4: Relationship between vehicle characteristics and injury severity among car occupants, car opponents and vulnerable road users, based on the literature review.⁸

	Car occupants		Opponent: car		Opponent: vulnerable road users	
	Probability of serious injury	Probability of fatal injury	Probability of serious injury	Probability of fatal injury	Probability of serious injury	Probability of fatal injury
Increase in mass	-	-	+	+		+=
Increase in mass						
Increase in hood height			+		+	+
Increase in Euro NCAP-score	-	-			- (pedestrian score)	- (pedestrian score)
SUV vs. non-SUV	-	-	+	+	+=	+=
Pick-up vs. non-pick-up	-	-	+	+	+=	+=
Electric vehicle vs. non-electric vehicle ⁹	=	=	=	=	=	=
Increase in vehicle age	+	+	+ ¹⁰	+	+ ¹¹	+

The statistical analysis consists of univariate and multivariate logistic regressions, which model the probability of serious injuries on the one hand and the probability of fatal injuries on the other. The dataset on which the analyses were performed is the result of linking multiple data sources: crash data, vehicle data, Euro NCAP data and hood height data.

Tableau 5 summarizes the results of the statistical analyses, particularly the univariate logistic regressions. The table shows only statistically significant effects. A relationship with injury severity is found for all vehicle characteristics except whether a passenger car is electric or not.

⁷ Pedestrians, cyclists, mopeds and motorcyclists.

⁸ An increase or decrease in the probability of serious or fatal injuries is indicated by a "+" and a "-" respectively. When no effect is found, it is indicated by an "=". A combination "+=" indicates that some studies note an increase while others find no effect. A blank cell reflects the fact that we found no literature for this.

⁹ Only one study could be found on this topic and it found no significant difference in terms of injury severity between accidents involving electric cars on the one hand and accidents involving combustion engine cars on the other.

¹⁰ Opponents hit by a younger vehicle in a rear-end collision are less likely to suffer serious injuries than if hit by an older vehicle.

¹¹ Pedestrians struck by younger vehicles are less likely to suffer serious injuries due to the presence of modern safety systems such as Automatic Emergency Braking (AEB).

Tableau 5: Relationship between vehicle characteristics and injury severity among car occupants, car opponents and vulnerable road users, based on the statistical analysis.

	Car occupants ¹²		Opponent: car occupants		Opponent: vulnerable road users	
	Probability of serious injury	Probability of fatal injury	Probability of serious injury	Probability of fatal injury	Probability of serious injury	Probability of fatal injury
Mass: + 300 kg	-32%	-48%	+37%	+77%	+7%	+28%
Power: + 50 kW	-55%	-65%	+54%	+127%		
Hood height: + 10 cm						+27%
Euro NCAP-score: + 1 ster			+25%			
SUV vs. non-SUV	-26%	-52%	+18%			
Pick-up vs. non-pick-up	-64%		+50%		+91%	+196%
Electric vehicle vs. non-electric vehicle						
Vehicle age: "≥ 12 years" versus "0-3 years"	+60%				+17%	

With the exception of vehicle age, we find that vehicle characteristics that reduce the injury severity of car occupants, such as high mass, are more likely to be detrimental for the other party. For example, when the mass of a vehicle increases by 300 kg, the probability of fatal injuries for car occupants decreases by half while the same probability for the other party increases by 77% for car occupants and 28% for vulnerable road users, respectively. A similar pattern is seen for other vehicle characteristics such as power and pickup trucks. This indicates an opposite relationship between occupant safety and opponent safety, or put another way: vehicles with a high capacity to protect their occupants (= high crashworthiness) tend to have a lower capacity to protect the opponent (= high crash aggressiveness).

For vehicle age, however, we do not observe this relationship. Compared to young cars (0-3 years), older cars (≥ 12 years) increase the risk of serious injuries for both car occupants and hit vulnerable road users, by 60% and 17%, respectively. Thus, the younger a vehicle, the better it protects occupants but also vulnerable road users. Regarding hood height, a 10-cm increase in hood height has been found to increase the risk of fatal injuries for vulnerable road users by 27%.

Regarding the overall Euro NCAP score, which expresses car occupant safety in a score from 0 to 5 stars, we do not find statistically significant results for car occupants. On the other hand, we find that a 1-star increase increases the probability of serious injuries to car occupants at the other party by 25%. This result does reach statistical significance and can presumably be explained by the higher average mass and power of cars with above-average Euro NCAP scores. For example, a car with 5 stars weighs 250 kg more than a car with 4 stars, and also has on average 21 kW more power.

In addition to the two main research questions, in this study we also try to answer the question of how vehicle characteristics evolve in the car fleet. For example, does the mass of passenger cars increase year after year? And in what ways do these evolutions affect the crashworthiness and crash aggressiveness of passenger cars? In the absence of data on the entire fleet (i.e. including passenger cars not involved in injury accidents), we answer these questions through a descriptive analysis of our dataset which is limited to passenger cars involved in injury accidents. Tableau 6 summarizes our findings.

¹² It concerns car occupants in injury accidents with other passenger cars.

Tableau 6: Evolution of vehicle characteristics of passenger cars in injury accidents by registration year.

Vehicle characteristic	Evolution from 2000 to 2021
Mass (mean)	+ 28%
Power (mean)	+ 60%
Bonnet height (mean)	+ 14% (until 2020)
Euro NCAP-score (proportion of score 4 or 5)	Almost stable between 2010 and 2020
SUV (proportion)	Increase from 1% to 39%
Pick-up (proportion)	The low number of vehicles does not allow an evolution to be observed.
Electric car (proportion)	Increase from 0,0% to 3,3%

Based on Tableau 6, we see five increases since the year 2000, namely mass, power, hood height and the proportion of SUVs and electric cars. These are five increases that have increased the crashworthiness and crash aggressiveness of the vehicle fleet in recent years.

Based on the results from this study, we can conclude that the observed findings and trends are mainly detrimental to two road user groups: vulnerable road users and car occupants of less robust cars (i.e., cars with e.g., lower mass and lower power). These results lead to the following recommendations, among others: an extension of the various Euro NCAP indicators with an indicator assessing safety for car occupants as opponents, and the further implementation of more stringent vehicle requirements to protect vulnerable road users.

1 Introduction

Chaque année, près de 35.000 accidents de la route se produisent en Belgique et occasionnent des lésions chez les usagers de la route. Ces lésions peuvent être légères, graves ou mortelles. Leur gravité est déterminée par plusieurs facteurs : des facteurs liés aux personnes elles-mêmes (l'âge par exemple), des facteurs liés à l'accident et à son environnement (ex. : type de collision, limitation de vitesse), et des facteurs liés aux véhicules impliqués (la masse des véhicules par exemple). C'est sur cette dernière catégorie de facteurs que se concentre le présent rapport.

Quelles sont les caractéristiques d'une voiture qui déterminent la gravité des lésions de ses occupants ? Et quelles sont les caractéristiques d'une voiture qui influencent la gravité des lésions des occupants du véhicule adverse et des usagers vulnérables ? Ce sont les principales questions de recherche dont fait l'objet ce présent rapport.

Les caractéristiques prises en considération dans ce rapport sont : la masse, la puissance, la hauteur de capot, la notation de sécurité Euro NCAP, l'âge du véhicule, le type de voiture (SUV, pick-up) et le type de carburant (voitures électriques). Ces variables proviennent de différentes sources de données reliées entre elles pour cette étude par des couplages. Pour chaque variable prise séparément, nous examinons comment elle affecte la gravité des lésions dans les groupes cibles susmentionnés.

Comprendre ces relations devrait également aider à comprendre comment la sécurité des occupants de voiture et des usagers vulnérables évolue en raison de la composition en constante mutation du parc automobile sur les routes belges, comme l'augmentation de la part de SUV et de pick-up dans le nombre total de voitures et l'accroissement de l'électrification. Dans ce cadre, il importe de vérifier si ces caractéristiques affectent, différemment ou pareillement, la sécurité des trois groupes cibles : les occupants de voiture, les opposants en voiture et les usagers vulnérables.

Le rapport débute par un chapitre « littérature » passant en revue les résultats d'études antérieures sur l'impact des caractéristiques des véhicules sur les usagers de la route. Vient ensuite un chapitre « données et méthodes » qui décrit les différentes sources de données et la stratégie d'analyse adoptée. Suit un chapitre « résultats et discussion » qui, compare notamment les résultats de l'analyse avec l'étude de littérature. Enfin, un chapitre « conclusions et recommandations » vient clôturer ce rapport.

2 Littérature

Cette étude de littérature a sélectionné des études portant sur l'influence d'un certain nombre de caractéristiques des véhicules sur la gravité des lésions dans les accidents entre deux voitures, d'une part, et dans les accidents impliquant une voiture et un usager vulnérable, d'autre part. Les thèmes abordés sont les suivants : la masse du véhicule, la puissance du véhicule, la hauteur de capot, les notations de sécurité Euro NCAP, l'âge du véhicule, les SUV, les pick-up et les voitures électriques. Pour chacun des thèmes, les résultats de cinq études pertinentes ont été résumés. Pour ce faire, Google Scholar a été utilisé et les articles ont été sélectionnés de préférence avec une méthode de recherche similaire à celle de l'étude actuelle (régression logistique), dans le but de cadrer et de comparer les résultats.

Chaque section se clôture par une conclusion qui résume succinctement l'effet de la variable étudiée. Ces conclusions sont également compilées dans un tableau à la fin de cette section.

2.1 Masse du véhicule

2.1.1 Occupants de voiture

Une analyse des données d'accidents aux Etats-Unis au cours de la période 1975-1989 montre qu'en cas de collision entre deux véhicules, un conducteur court 2,7 à 4,3% plus de risques de perdre la vie que l'opposant à mesure que son véhicule est plus léger de 1% (Evans & Frick, 1993). La valeur précise dépend entre autres de l'année de construction du véhicule : pour les voitures construites avant 1980, le pourcentage est de 3,7% contre 2,7% pour les voitures après 1980. Si l'on tient compte de la situation où le véhicule de l'opposant est deux fois plus lourd, cela signifie que le conducteur du véhicule léger court entre 7 et 14 fois plus de risques de mourir que le conducteur du véhicule lourd. Pour le scénario réaliste d'une collision entre un véhicule ayant une masse de 900 kg et un véhicule ayant une masse de 1800 kg, le conducteur du véhicule léger a 11,5 fois plus de risques de perdre la vie que le conducteur du véhicule lourd. Ce résultat est comparable à une valeur de 13 précédemment obtenue par Evans (1985), laquelle a été ultérieurement confirmée par Fredette et al. (2008), où il a été constaté que le conducteur du véhicule léger court 11 fois plus de risques de décéder que le conducteur du véhicule lourd (au moins deux fois plus lourd que le véhicule léger).

Høye (2017) a également réalisé une étude de littérature sur l'influence de la masse du véhicule sur les lésions graves et mortelles. Il a été conclu qu'une hausse de 100 kg réduit en moyenne de 7,5% le risque de lésions graves ou mortelles pour les occupants du véhicule concerné alors que le risque de subir des lésions graves ou mortelles du côté de la partie adverse augmente de 6,6%.

Ces études confirment et quantifient les deux « lois » ou principes suivants :

1. Plus le véhicule est lourd, plus le risque de lésions mortelles est élevé chez l'opposant.
2. Plus le véhicule est lourd, plus le risque de lésions mortelles est faible chez les occupants de voiture.

2.1.2 Usagers vulnérables

En dépit de l'influence déterminante de la masse du véhicule sur la gravité des lésions dans les accidents entre les deux véhicules, la masse du véhicule n'est pas toujours considérée dans la littérature comme un facteur déterminant lors d'une collision entre un véhicule et un usager vulnérable. Ceci peut s'expliquer par le fait que la différence de masse entre un véhicule et un usager vulnérable est de toute façon très importante (la différence de masse est généralement supérieure à 1000 kg, sauf dans les accidents impliquant des voitures de la classe de segment A) et qu'une variation de poids de quelques centaines de kilos du véhicule n'influence que modérément les conséquences de tout façon graves pour l'usager vulnérable par rapport à d'autres variables. Ainsi, Roudsari et al. (2004) ont indiqué dans une étude basée sur des données récoltées aux Etats-Unis que la masse du véhicule n'exerce aucune influence sur le risque de lésions mortelles chez les piétons. Le même résultat a été observé dans une étude japonaise (Mizuno & Kajzer, 1999). Les deux études ont constaté une hausse du risque de lésions mortelles chez les piétons heurtés par des camions légers ou des camionnettes. Cet effet est donc imputable à la hauteur et à la structure ou à la rigidité du capot plutôt qu'à la masse plus élevée du véhicule.

En revanche, certaines études évoquent un effet de la masse sur le risque de décès des piétons. Ballesteros et al. (2004) ont étudié l'impact des trois variables sur les lésions mortelles des piétons aux Etats-Unis : le type de véhicule (voiture classique, SUV/pick-up, camionnette), la limitation de vitesse et la masse. En effectuant une correction concernant le type de véhicule et la limitation de vitesse, il apparaît que lors d'une collision avec une voiture lourde (> 1451 kg), le risque de perdre la vie est 39% plus élevé qu'avec une voiture légère

(< 1451 kg). Sur la base des lois de Newton, Evans (2004) a calculé qu'un piéton court théoriquement 15% plus de risques de perdre la vie quand il est heurté par un véhicule de 1800kg plutôt que par un véhicule similaire ayant une masse de 900 kg. Tyndall (2021) a récemment constaté, sur la base de données d'accidents aux États-Unis, que pour chaque augmentation de 100 kg de la masse du véhicule, le risque de perdre la vie pour un piéton augmente de 2,4 %.

En résumé, la littérature scientifique ne fait pas état d'effet uniforme de la masse du véhicule sur le risque de lésions mortelles pour les piétons. Certaines études ne constatent aucun effet, tandis que d'autres notent une augmentation à mesure que la masse du véhicule augmente.

2.2 Puissance du véhicule

Dans la littérature scientifique, la puissance du véhicule est rarement explicitement évoquée dans le contexte de gravité des lésions en cas d'accident. Cela s'explique par le fait que la puissance en soi n'a pas de répercussions directes sur la gravité des lésions. En effet, la puissance exprime la force que la voiture peut exercer dans un certain laps de temps. Une voiture plus puissante peut fournir plus de force pendant le même laps de temps et donc accélérer plus fort qu'une voiture moins puissante. Or, lors d'une collision, selon les lois de la physique, la masse, la vitesse et la structure, la hauteur et la rigidité du capot sont les seules caractéristiques du véhicule à jouer un rôle.

L'on pourrait penser que l'on conduit plus rapidement ou plus agressivement avec des véhicules plus puissants, mais l'influence de la puissance est alors imputable au style de conduite des conducteurs et n'est pas une conséquence intrinsèque de la puissance plus élevée. Elvik et Skaansar (1989) en apportent la preuve en se basant sur les statistiques d'accidents norvégiennes d'une compagnie d'assurances. L'étude a comparé le nombre d'accidents signalés à la compagnie d'assurances pour six modèles de voiture. Chaque modèle de voiture était disponible en version standard et en version GTI. Les versions GTI sont dotées de moteurs nettement plus puissants que les versions standard. Le nombre d'accidents était en moyenne 75 % plus élevé pour les modèles GTI. L'étude ne fournit aucune information sur la gravité des lésions en fonction de la puissance. Le risque d'accident plus élevé peut être imputable non seulement à la puissance plus élevée, mais aussi au style de conduite et aux caractéristiques du conducteur.

Ce sentiment est corroboré par une étude sur l'effet de la puissance sur la vitesse, qui a montré que les conducteurs de véhicules puissants sont plus susceptibles de rouler plus vite ou de dépasser la limitation de vitesse (McCartt & Hu, 2017). Krahé & Fenkske (2002) confirment également ces propos : les conducteurs de véhicule puissant adoptent en moyenne un style de conduite plus agressif.

2.3 Hauteur de capot

2.3.1 Occupants de voiture

Seyer et al (2000) ont étudié l'impact de la masse, de la rigidité et de la géométrie d'un véhicule dans les collisions flanc contre flanc. Ils ont constaté que les lésions subies par l'opposant sont plus graves à mesure que la hauteur de capot augmente. Lors d'une collision avec un véhicule dont le capot est plus haut, l'opposant est plus susceptible de subir des lésions au niveau de la partie supérieure du corps qu'autour de la hanche. Siegel et al. (2001) ont également constaté qu'en cas de collisions frontales et latérales entre des berlines¹³ et des SUV ou des camionnettes des lésions au niveau du tronc et des organes survenaient plus souvent qu'en cas de collisions entre deux berlines. L'augmentation de la rigidité du véhicule accroît le risque de lésions à la hanche. Le fait que le capot soit à la fois rigide et haut, ce qui est le cas sur un SUV ou un pick-up classique, accroît le risque de lésions à la hanche et au niveau de la partie supérieure du corps.

¹³ Une berline est une voiture pouvant accueillir jusqu'à cinq personnes et dont le coffre est séparé de l'habitacle, contrairement à un « hatchback » où les deux espaces sont reliés.

L'effet de la hauteur de capot constaté par Seyer et al (2000) était plus important que les effets de la masse et de la rigidité. Buzeman-Jewkes (1998) a constaté que dans les collisions frontales, la rigidité des véhicules est le facteur le plus important, suivi de la hauteur de capot et la masse. Enfin, Padmanaban (2003) a conclu que la hauteur de capot ne jouait qu'un rôle mineur et que la masse était de loin le facteur le plus important.

Les et al (2001) ont étudié l'« agressivité » des véhicules en cas de collision en fonction de leurs caractéristiques physiques, telles que l'empattement (la distance entre la roue avant et la roue arrière), la hauteur et la longueur du capot. L'empattement peut être considéré comme un substitut de la masse du véhicule puisqu'il existe une forte corrélation positive entre l'empattement et la masse du véhicule : un véhicule plus grand, avec un empattement plus long, a une masse plus élevée. L'analyse a montré que la hauteur de capot était le paramètre le plus influent. Il a également été constaté (à l'époque) que les véhicules plus récents étaient plus agressifs, mais en raison de la petite taille de l'échantillon (51 modèles de voiture), des recherches plus approfondies sont nécessaires à ce sujet. L'augmentation de l'agressivité des chocs peut s'expliquer par le fait que le capot des véhicules récents est en moyenne plus haut et plus rigide.

En somme, en relevant le capot, les lésions subies par l'opposant se déplacent de la hanche vers le tronc et les organes vitaux, ce qui accroît la gravité des lésions. Certaines études portant à la fois sur l'effet de la masse du véhicule, de la hauteur et de la rigidité du capot concluent que la hauteur de capot est le paramètre le plus influent, tandis que d'autres considèrent la masse comme le facteur le plus important. Dans les collisions frontales, la rigidité du capot est peut-être le facteur le plus influent.

2.3.2 Usagers vulnérables

On peut émettre l'hypothèse que les usagers vulnérables subiront des lésions plus graves lorsqu'ils sont heurtés par un véhicule dont le capot est plus haut que lorsqu'ils le sont par un véhicule dont le capot est plus bas. Cela pourrait s'expliquer par le fait qu'il est plus facile de rouler sur un capot plus bas, alors qu'il est plus facile de se retrouver sous le véhicule lors d'une collision avec un véhicule ayant un capot plus haut. En outre, lors d'une collision avec un véhicule à capot plus haut, une plus grande partie du corps est touchée par la carrosserie rigide du véhicule.

Ballesteros et al (2004) ont constaté que les piétons heurtés par un SUV ou un pick-up étaient moins susceptibles de subir des lésions sous le genou en raison des capots plus hauts. Dans ce cas, on s'attend à des lésions plus graves au niveau de la hanche. Li et al. (2017) ont confirmé cette hypothèse : pour chaque tranche de 10 % où le capot est plus haut que la hanche du piéton, le risque de lésions graves à la hanche augmente de 74 %. Enfin, Shang et al. (2018) ont constaté que la même augmentation de la hauteur de capot multiplie par 11 le risque de lésions graves à la tête.

Gunasekaran (2021) a constaté dans une thèse que la hauteur et l'angle de capot sont des facteurs prédictifs significatifs des lésions cérébrales. Abaisser le capot des SUV et des pick-up (lesquels ont habituellement un capot haut) réduit le risque de lésions cérébrales chez les piétons, tandis que pour les berlines (qui ont habituellement un capot bas), il est plus probable qu'un capot plus haut réduise le risque. Il existe donc un juste milieu où le risque de lésions cérébrales est le plus faible. En particulier, il a été constaté que les collisions avec des véhicules ayant un capot haut et un angle de capot bas (pensez à une camionnette avec un capot haut, presque horizontal) peuvent souvent entraîner de graves lésions à la tête. Dans une étude précédente, Yin et al (2017) ont constaté que la hauteur de capot était un facteur prédictif significatif du risque de lésions à la tête.

Enfin, sur la base d'une analyse des données d'accidents en France de 2011, Saadé et al. (2020) ont constaté qu'un piéton court sept fois plus de risques d'être mortellement blessé lors d'une collision avec un véhicule à capot haut (> 83,5 cm) que lors d'une collision avec un véhicule à capot bas (< 83,5 cm).

En conclusion, nous pouvons affirmer que les différentes études s'accordent sur le fait que le relèvement du capot accroît le risque de lésions graves, essentiellement en raison du déplacement des lésions du genou vers la hanche, et que le risque de lésions graves à la tête augmente également lorsque la hauteur de capot augmente et que l'angle de capot diminue (par exemple, dans le cas des camionnettes, avec leur capot haut et presque horizontal caractéristique).

2.4 Notations de sécurité Euro NCAP

2.4.1 Occupants de voiture

Euro NCAP (European New Car Assessment Program) est une organisation indépendante à but non lucratif qui teste et évalue la sécurité des voitures à l'aide d'un système d'évaluation à cinq étoiles. Plus une voiture obtient d'étoiles, mieux les occupants sont protégés en cas d'accident. C'est du moins la prédiction théorique basée sur les crash tests. Les données d'accidents permettent de vérifier si, dans la pratique, les occupants des voitures les mieux notées sont effectivement moins susceptibles de subir des lésions (graves).

Newstead et al. (2015) ont analysé les données d'accidents britanniques et françaises pour comparer la résistance aux chocs des véhicules, c'est-à-dire la manière dont un véhicule protège ses occupants en cas d'accident, avec leurs notations de sécurité Euro NCAP. L'analyse des données britanniques montre que des notations de sécurité Euro NCAP plus élevées sont associées à un risque de lésions plus faible et à moins de lésions graves. Seule la différence entre les voitures une étoile et quatre étoiles est statistiquement significative. L'analyse des données françaises débouche sur des résultats similaires : les voitures quatre étoiles protègent mieux leurs occupants que les voitures deux étoiles.

Langwieder et al (2003) avaient déjà effectué la même analyse sur la base des données d'accidents britanniques et françaises de 1993 à 1998. Dans ce cas, il a déjà été constaté que les voitures ayant des notations de sécurité plus élevées protègent mieux leurs occupants. Il est à noter que c'est surtout le risque de lésions graves qui diminue de manière significative à mesure que la notation de sécurité augmente. Bien que le risque de lésions diminue également en général, cette baisse est moins prononcée. C'est logique : même les voitures ayant une notation de sécurité élevée ne peuvent souvent pas éviter les lésions légères en cas de collision.

Lie & Tingvall (2002) ont étudié la réduction du risque de lésions graves et mortelles en Suède en fonction de l'augmentation de la notation de sécurité Euro NCAP. Pour chaque étoile supplémentaire, ils ont constaté une réduction de 12 %. Aucune relation n'a été trouvée pour les lésions légères. Dans l'ensemble, il y a eu 30 % de lésions graves et mortelles en moins dans les accidents impliquant des véhicules ayant une notation de sécurité élevée par rapport à ceux ayant une notation de sécurité faible.

Une étude complémentaire réalisée par Kullgren et al (2010) a comparé le risque de lésions dans les accidents impliquant des véhicules deux et cinq étoiles. Le risque de lésions, toutes catégories de lésions confondues, était inférieur de 10 % pour les véhicules cinq étoiles par rapport aux véhicules deux étoiles. Pour les lésions graves et mortelles, la différence était de 23 % et pour les lésions mortelles uniquement, la différence était la plus significative, à savoir 69 %.

Dans une étude plus récente, Kullgren et al (2019) ont confirmé que les notations de sécurité Euro NCAP reflètent les résultats des données d'accidents réels. Là encore, des accidents impliquant des véhicules deux et cinq étoiles ont été comparés. Le risque de lésions graves et mortelles dans les accidents impliquant des véhicules cinq étoiles était inférieur de 22 %. Le risque de lésions uniquement mortelles était inférieur de 40 %. Enfin, il a également été constaté que le risque de souffrir d'une incapacité physique permanente était inférieur de 42 % dans les accidents impliquant des véhicules cinq étoiles.

Globalement, les différentes études s'accordent sur le fait que les voitures ayant des notations de sécurité Euro NCAP théoriques plus élevées protègent également mieux les occupants dans la pratique, et que le risque de lésions graves pour les occupants est plus faible que dans les voitures ayant des notations de sécurité Euro NCAP moins élevées. L'ampleur de la réduction du risque varie d'une étude à l'autre.

2.4.2 Usagers vulnérables

À côté de la notation de sécurité à cinq étoiles, Euro NCAP a également attribué jusqu'en 2017 une note pour la protection des piétons sur une échelle de 0 à 36, basée sur la protection en cas de collision et le bon fonctionnement d'un Automatic Emergency Braking (AEB), s'il est présent. Depuis 2018, ce score pour les piétons a été remplacé par un score pour les usagers vulnérables qui, au regard d'Euro NCAP, comprend les piétons et les cyclistes.

Strandroth et al. (2011) ont étudié la corrélation entre la gravité des lésions chez les piétons et le score Euro NCAP pour les piétons. Il a été établi que la probabilité qu'un piéton subisse des lésions graves lors d'une

collision avec une voiture 2 étoiles était inférieure de 17 % à celle d'une collision avec une voiture à une seule étoile. Les voitures 2 étoiles ont un score moyen de 13,84 (sur 36) pour les piétons, alors que les voitures 1 étoile n'ont en moyenne qu'un score de 6,24 pour les piétons. Ainsi, dans cette comparaison, la notation à étoiles et le score pour le piéton varient tous les deux, ce qui rend difficile la détermination du facteur qui a provoqué l'effet observé, d'autant plus que ces deux notations peuvent être liées entre elles. Aucune autre explication n'a été fournie dans l'étude. L'analyse s'est limitée aux accidents survenus à des vitesses inférieures à 50 km/h, car il a été constaté qu'à des vitesses plus élevées, il n'y avait pas de différence significative entre les voitures 1 ou 2 étoiles.

Dans une étude analogue plus récente sur le score pour les piétons, Strandroth et al. (2014) ont constaté des réductions significatives des lésions pour les piétons et les cyclistes. La différence entre les véhicules ayant un score faible et élevé pour les piétons variait entre 20 et 56 %. La réduction du risque de lésions à la tête était la plus importante entre 80 et 90 %. Pour les cyclistes, une réduction des lésions n'a été observée qu'entre les véhicules ayant des scores moyens pour les piétons et ceux ayant des scores élevés pour les piétons. Toutefois, la différence était significative pour toutes les parties du corps.

Enfin, Pastor (2013) a analysé des données d'accidents allemandes et a constaté qu'un piéton heurté par un véhicule ayant un score pour les piétons de 22 courait 35 % de risques en moins de subir des lésions mortelles qu'un piéton heurté par un véhicule ayant une notation de cinq. Pour les lésions graves, la différence est moindre, avec seulement 16 % de risques en moins.

En résumé, le risque de lésions graves pour un piéton heurté par un véhicule ayant un score élevé pour les piétons est plus faible que pour un piéton heurté par un véhicule ayant un score plus faible pour les piétons.

2.5 Age du véhicule

2.5.1 Occupants de voiture

Khattak (2001) s'est focalisé sur les collisions par l'arrière et a montré que les conducteurs d'un véhicule plus récent sont mieux protégés dans les collisions par l'arrière que les occupants d'un véhicule plus âgé, à la fois lorsqu'ils se trouvent dans un véhicule plus récent qui est heurté par l'arrière et lorsqu'ils se trouvent dans un véhicule plus récent entrant en collision avec le véhicule qui le précède.

Kockelmann & Kweon (2002) ont constaté, par le biais d'une régression probits, que la gravité des lésions subies par les occupants de voiture augmente avec l'âge du véhicule. La régression probits ne permet pas de quantifier aisément l'ampleur de l'effet, contrairement à la régression logistique.

La régression logistique appliquée aux données d'accidents à Hong Kong par Yau (2004) a montré que le risque de lésions graves est 80% plus élevé pour les occupants d'un véhicule âgé entre cinq et neuf ans que pour ceux d'un véhicule de moins de cinq ans. Le risque de lésions graves pour les occupants d'un véhicule de plus de 9 ans est plus de deux fois plus élevé que le risque de lésions graves chez les occupants d'un véhicule de moins de cinq ans.

Zeng et al. (2016) ont constaté que la gravité des lésions tant chez les occupants que les opposants impliqués dans des accidents avec des véhicules dont l'année de construction est postérieure à 2002 est inférieure à la gravité des lésions dans les accidents avec des véhicules construits avant 2002. Cela indique une tendance positive générale en termes de protection du conducteur.

Enfin, Høye (2017) a noté une augmentation de 2,3 % du risque de lésions graves pour les occupants par tranche d'un an.

En conclusion, la littérature scientifique confirme l'hypothèse selon laquelle les récents véhicules protègent mieux leurs occupants que les véhicules plus âgés.

2.5.2 Usagers vulnérables

La littérature scientifique ne fait guère allusion à l'influence directe de l'âge du véhicule sur la gravité des lésions chez les usagers vulnérables de la route. L'âge du véhicule exerce toutefois une influence indirecte dans la mesure où les véhicules plus récents sont plus souvent équipés de systèmes de freinage automatique d'urgence (AEB) pour prévenir les collisions ou réduire l'impact potentiel en cas d'accident. Cela se reflète dans

le score moyen plus élevé pour les piétons selon Euro NCAP, dont l'effet a été examiné en profondeur dans la section 2.4.2. De cette manière, le risque de lésions graves et mortelles est plus faible chez un usager vulnérable heurté par un véhicule plus récent que chez un usager vulnérable heurté par un véhicule plus âgé.

2.6 Type de voiture : SUV et pick-up

2.6.1 Occupants de voiture

Kockelman & Kweon (2002) ont analysé les accidents bilatéraux et unilatéraux impliquant différentes combinaisons de véhicules dans un échantillon comprenant 0,85 % de tous les accidents survenus aux États-Unis en 1998. Dans les accidents bilatéraux, les conducteurs de SUV et de pick-up couraient respectivement 24% et 23% moins de risques d'être blessés que les conducteurs de voiture classique. En revanche, lorsque le conducteur d'une voiture entre en collision avec un SUV ou un pick-up, il court respectivement 16 % et 10 % plus de risques d'être blessé.

Dans les accidents impliquant un seul véhicule, les conducteurs de pick-up courent 14 % de risques d'être blessés. En outre, les « rollover-crashes », dans lesquels le véhicule se retourne, s'avèrent être les plus dangereux. Il est intéressant de noter que les SUV et les pick-up sont plus enclins à ce type d'accident en raison de leur centre de gravité plus élevé. Par exemple, dans cet échantillon, 7,7 % des SUV se sont retournés, contre 4,7 % des pick-up et seulement 2,3 % des voitures. Cela se reflète également dans le nombre de décès parmi les différents types de véhicules : 63 % des conducteurs tués dans un SUV ont été mortellement blessés dans un roll-over crash, contre 43 % pour les conducteurs de pick-up et 22 % pour les conducteurs de voiture.

Dans une étude canadienne à grande échelle, Fredette et al (2008) ont examiné le risque de lésions mortelles dans des accidents impliquant différentes combinaisons de véhicules. Une analyse de plus de trois millions d'accidents a montré qu'un accident pour un conducteur a presque trois fois plus de chances (2,72x) de se terminer mortellement lorsque l'opposant conduit un pick-up et plus de deux fois plus de chances (2,12x) lorsque l'opposant est au volant d'un SUV. En revanche, le risque de lésions mortelles pour l'opposant (c'est-à-dire le conducteur du pick-up ou du SUV) est inférieur de respectivement 26 % et de 29 %. Il a également été établi que les accidents impliquant un pick-up sont toujours les plus dangereux, quelle que soit l'importance de la différence de masse.

Zeng et al (2016) ont constaté dans une étude fondée sur les statistiques d'accidents de 2007 en Floride que le risque d'être blessé dans un accident est 27 % moins élevé lorsque l'on conduit un pick-up, alors qu'il est 58 % plus élevé lorsque l'opposant conduit un pick-up.

Dans une étude réalisée en Iran, Arefkhani et al. (2019) ont examiné l'« incompatibilité » des accidents entre deux voitures. Celle-ci est définie en fonction de la « résistance aux chocs », ou de la capacité d'un véhicule à protéger son conducteur en cas de collision, et de l'« agressivité des chocs », soit l'impact sur la gravité des lésions de l'opposant. L'étude a montré que les pick-up ont une résistance aux chocs et une agressivité des chocs supérieures à celles des voitures. Ainsi, le risque d'être blessé dans un accident est 15% plus faible lorsque l'on conduit soi-même un pick-up et 20% plus élevé lorsque vous entrez en collision avec un pick-up. Il s'agit là de chiffres fort similaires à ceux rencontrés dans l'étude (Kockelman & Kweon, 2002) menée près de 20 ans plus tôt.

En résumé, les principes ou « lois » qui s'appliquent aux pick-up et aux SUV sont les mêmes que ceux qui s'appliquent à la masse des véhicules :

1. Les occupants d'un pick-up et d'un SUV courent moins de risques de lésions mortelles que les occupants d'une voiture.
2. Les opposants heurtés par un pick-up ou un SUV courent plus de risques d'être grièvement blessés que les opposants heurtés par une voiture.

2.6.2 Usagers vulnérables

L'une des premières études à étudier l'impact potentiel des pick-up et des SUV sur la gravité des lésions chez les piétons est une étude américaine menée par Ballesteros et al (2004). Par rapport aux voitures, les piétons heurtés par un SUV ou un pick-up couraient 48 % plus de risques de subir des lésions graves et 72 % plus de risques de perdre la vie. Ces résultats ont néanmoins cessé d'exister lorsque la masse et la vitesse du véhicule

ont été prises en compte. Ceci indique que l'augmentation de la gravité des lésions est plus probablement imputable à la masse moyenne plus importante des SUV et des pick-up, ainsi qu'à une vitesse moyenne éventuellement plus élevée pour ces véhicules. Cette affirmation est quelque peu corroborée par la proportion plus élevée d'accidents survenus dans des zones où les limitations de vitesse sont plus élevées (plus de 40 mph ou plus de 64 km/h) : 23 % des accidents impliquant des SUV contre 19 % pour les pick-up et 13 % pour les voitures.

Une augmentation comparable (86 %) du risque de décès des piétons heurtés par un SUV ou un pick-up a été constatée dans une étude réalisée en Caroline du Nord par Kim et al. (2008). En revanche, aucune augmentation n'a été relevée par Uddin & Ahmed (2018) dans le cadre d'une étude menée dans l'Ohio. Une augmentation beaucoup plus faible de respectivement 8,6 % et 12,3 %, du risque de lésions graves chez les piétons heurtés par un SUV et un pick-up a été constatée par Pour-Rouholamin & Zhou (2016) sur la base de données d'accidents dans l'Illinois.

Batouli et al (2020) ont récemment analysé les données d'accidents au Colorado entre 2006 et 2016 et constaté que les piétons heurtés par un SUV ou un pick-up couraient respectivement 59 % et 96 % plus de risques de perdre la vie que les piétons heurtés par une voiture. Edwards & Leonard (2022) ont dernièrement constaté qu'un enfant heurté par un SUV court 8 fois plus de risques de décéder qu'un enfant heurté par une voiture. En outre, ils ont noté que les pick-up et les SUV sont surreprésentés dans les accidents mortels : bien que les pick-up et les SUV ne soient impliqués que dans 5,6 % et 14,7 % des accidents impliquant des piétons, ils sont respectivement responsables de 12,6 % et de 25,4 % des décès.

Pour résumer cette section, nous pouvons déclarer que l'effet des types de véhicules sur la gravité des lésions chez les usagers vulnérables varie en importance, mais que parfois aucun effet n'est constaté. Lorsqu'un effet est observé, on peut conclure qu'un piéton heurté par un SUV ou un pick-up est plus susceptible de subir des lésions graves qu'un piéton heurté par une voiture. Pour déterminer avec exactitude l'influence de ces types de véhicules sur la gravité des lésions, des recherches complémentaires sont requises, de préférence des recherches qui prennent en compte la masse du véhicule et les caractéristiques de l'accident, telles que la vitesse.

Enfin, il convient de noter que les études susmentionnées ont toutes été menées aux États-Unis. L'infrastructure routière américaine diffère quelque peu de celle de l'Europe et la voiture américaine moyenne est un peu plus grande que la voiture européenne moyenne. Il convient donc de faire preuve d'une certaine prudence lorsque l'on transpose ces résultats dans un contexte européen. Le fait que presque toutes les études constatent que les SUV et les pick-up sont à la fois agressifs et résistants aux chocs en cas d'accident suggère que les SUV et les pick-up en Europe, même s'ils sont peut-être un peu plus petits que les SUV et les pick-up aux États-Unis, présentent des caractéristiques similaires.

2.7 Voitures électriques

2.7.1 Occupants de voiture

Les voitures électriques sont encore en plein essor et, partant, il y a encore relativement peu de véhicules électriques à batterie (VEB) sur les routes. Logiquement, en termes absolus, ils sont donc encore moins susceptibles d'être impliqués dans des accidents que les véhicules à carburant fossile. Les études scientifiques portant sur les caractéristiques des accidents sont tout aussi rares. Liu et al (2022) ont conduit l'une des premières études consacrées à ce sujet en Norvège, le pays le plus avancé dans l'électrification de son parc automobile.

La part des accidents impliquant un véhicule électrique est passée de 0 à 3,11 % en Norvège entre 2011 et 2018. Sur le plan de la gravité des lésions, les accidents impliquant des VEB ne diffèrent pas de ceux impliquant des véhicules à carburant fossile, malgré la masse plus importante des VEB en raison de leurs batteries lourdes et volumineuses. L'effet de la masse plus importante, qui pourrait causer des lésions plus graves à l'opposant, est peut-être compensé par le fait que les VEB sont nouveaux et par conséquent mieux équipés (avec des ADAS¹⁴ comme l'Automatic Emergency Braking) pour protéger tant les occupants que les opposants.

¹⁴ ADAS signifie « Advanced Driver Assistance Systems » ou « dispositifs d'aide à la conduite ».

2.7.2 Usagers vulnérables

Le bruit d'un véhicule en mouvement est une combinaison du bruit du moteur et du bruit des pneus qui roulent. Le moteur électrique d'un véhicule électrique n'émet pratiquement aucun bruit. Les véhicules électriques sont nettement plus silencieux que les véhicules à moteur à combustion, surtout à faible vitesse (jusqu'à environ 30-50 km/h) ; à plus grande vitesse, le bruit des pneus prend le dessus et la différence entre les véhicules est minime.

Les véhicules électriques sont donc plus silencieux que les véhicules à moteur à combustion, en particulier dans les agglomérations, à des vitesses inférieures à 50 km/h. Cette caractéristique peut entraîner des répercussions sur la sécurité routière : un usager vulnérable peut ne pas remarquer un véhicule électrique en raison de son bruit, alors qu'il peut entendre un véhicule à moteur à combustion interne s'approcher de loin. Une enquête détaillée réalisée auprès de 32 conducteurs de VEB en Belgique montre que 44 % (+- 9 %) des conducteurs ont constaté qu'un usager vulnérable ne les a pas remarqués en raison de l'absence de bruit. (Dons et al., 2023). 56% des conducteurs de VEB indiquent avoir adapté leur comportement pour en tenir compte.

Une analyse des données d'accidents en Norvège par Liu et al. (2022) confirme que les accidents impliquant des usagers vulnérables surviennent plus souvent avec des VEB qu'avec des véhicules roulant aux carburants fossiles : 31,5% des accidents impliquant des VEB étaient des collisions impliquant des usagers vulnérables contre seulement 20,3% des accidents impliquant des véhicules roulant aux carburants fossiles.

2.8 Résumé de littérature

Les principales conclusions de la littérature sont consignées dans le tableau ci-dessous. Pour ce qui concerne les variables continues, une augmentation ou une diminution du risque de lésions graves ou mortelles est respectivement indiquée par « + » et « - ». Lorsqu'aucun effet n'a été relevé, c'est indiqué par « = ». Une combinaison « += » signifie que certaines études constatent une augmentation tandis que d'autres ne relèvent aucun effet. Une cellule vide signifie que nous n'avons pas trouvé de littérature. Une notation analogue s'applique aux variables catégorielles, par exemple les SUV, mais ici l'effet est modélisé par rapport à une catégorie de référence, qui est la deuxième dans la première colonne. Étant donné que l'on trouve des tailles d'effet variables dans la littérature, le tableau ci-dessous n'indique que la « direction » de l'effet. Pour avoir une idée de l'ampleur de l'effet, nous renvoyons le lecteur aux sections précédentes, où la littérature est examinée en détail.

Tableau 7 : Relation entre les caractéristiques de véhicule et la gravité des lésions chez les occupants de voiture, les opposants en voiture et les usagers vulnérables, sur la base de l'étude de littérature

	Occupants de voiture		Partie adverse : occupants en voiture		Partie adverse : usagers vulnérables	
	Risque de lésions graves	Risque de lésions mortelles	Risque de lésions graves	Risque de lésions mortelles	Risque de lésions graves	Risque de lésions mortelles
Augmentation de la masse	-	-	+	+		+=
Augmentation de la puissance						
Augmentation de la hauteur de capot			+		+	+
Augmentation de la notation Euro NCAP	-	-			- (score piéton)	- (score piéton)
SUV versus non-SUV	-	-	+	+	+=	+=
Pick-up versus non-pick-up	-	-	+	+	+=	+=
Voiture électrique versus voiture non électrique ¹⁵	=	=	=	=	=	=
Augmentation de l'âge du véhicule	+	+	+ ¹⁶	+	+ ¹⁷	+

¹⁵ Une seule étude a pu être trouvée sur ce sujet et elle n'a pas montré de différence significative en termes de gravité des lésions entre les accidents impliquant des voitures électriques d'une part et les accidents impliquant des voitures à moteur à combustion d'autre part.

¹⁶ Les opposants heurtés par un véhicule plus récent dans une collisions par l'arrière courent moins de risques de lésions graves que lorsqu'ils sont heurtés par un véhicule plus âgé.

¹⁷ Les piétons heurtés par des véhicules plus récents courent moins de risques de subir des lésions graves grâce à la présence de dispositifs de sécurité récents tels qu'Automatic Emergency Braking (AEB).

3 Données et méthodes

3.1 Sources de données

Pour cette étude, les données officielles d'accidents issues de l'enregistrement des accidents par la police ont été enrichies de données émanant de différentes sources de données :

- 1) La base de données de véhicules - DIV. Cette base de données provient du SPF Mobilité et Transports et comporte des informations sur les véhicules immatriculés en Belgique. Elle comprend entre autres les variables suivantes : masse, puissance, âge du véhicule, type de carburant, type de véhicule (SUV pick-up, etc.) et type de titulaire (voiture privée versus voiture de société). Ladite base de données ne comporte pas d'informations relatives aux véhicules étrangers circulant sur les routes belges.
- 2) Notation de sécurité Euro NCAP. Euro NCAP évalue la sécurité des véhicules équipés de l'équipement de sécurité standard¹⁸, notamment par le biais de crash tests et d'une évaluation de l'équipement de sécurité des voitures. La notation de sécurité Euro NCAP donne, entre autres, lieu aux variables suivantes : la notation de sécurité globale (notation de zéro à cinq étoiles), notation pour les occupants adultes (de 0 à 100 %), notation pour les occupants enfants (de 0 à 100 %), notation pour les usagers vulnérables (de 0 à 100 %), et une notation « safety assist » sur les systèmes d'aide à la conduite (de 0 à 100 %).
- 3) Diverses sources de données sur la hauteur de capot. Pour définir la hauteur de capot, différentes sources de données ont été consultées avec des croquis de modèles automobiles. La hauteur de capot a été mesurée manuellement à partir de ces croquis. L'annexe contient une description de la manière dont la hauteur de capot a été mesurée pour chaque modèle de voiture.

L'enrichissement des données officielles d'accidents avec les sources de données susmentionnées a été effectué à l'aide de couplages basés sur des variables communes telles que la plaque d'immatriculation (version pseudonymisée), le numéro de châssis (version pseudonymisée), le modèle de voiture, l'année du test Euro NCAP et l'année de la première immatriculation d'un véhicule en Belgique. Une description technique détaillée des couplages est reprise en annexe.

3.2 Stratégie d'analyse

Le présent rapport a pour but d'étudier l'impact des caractéristiques des voitures sur la gravité des lésions, chez les occupants de voiture d'une part, et chez la partie adverse d'autre part, en se limitant aux usagers vulnérables et aux voitures.

L'étude sur la gravité des lésions est opérationnalisée en créant une variable dépendante dichotomique : une première catégorie de la variable dépendante comprend les personnes indemnes et légèrement blessées, une deuxième catégorie comprend les personnes grièvement blessées et les personnes décédées. Cette variable dépendante dichotomique est analysée à l'aide d'un modèle statistique, plus précisément une régression logistique. Cette dernière est la technique statistique la plus couramment utilisée pour prédire un résultat dichotomique, en l'occurrence « blessés légers et indemnes » versus « blessés graves et tués ». Ce modèle statistique permet de vérifier l'effet des caractéristiques du véhicule sur la gravité des lésions. La même procédure est appliquée à une deuxième variable dépendante dichotomique consistant en une catégorie de personnes indemnes, légèrement blessées et grièvement blessées, d'une part, et les tués, d'autre part.

Dans une régression logistique les effets sont exprimés à l'aide d'odds ratios. Nous pouvons illustrer la signification d'un odds-ratio via un exemple. Imaginez que l'odds ratio d'un « pick-up » (versus non-pick-up) est égal à 1,5, cela signifie qu'un pick-up accroît de 50% l'odds/le risque de lésions graves ou mortelles. Bien que d'un point de vue statistique les notions « odds » et « risque » ne sont pas pareilles, pour des raisons de communication, le terme « risque » est toujours utilisé dans le présent rapport alors qu'il s'agit en principe d'« odds ». Le chapitre « terminologie » explique plus en détail la notion d'odds ratio et explique également pourquoi il est justifié d'utiliser le terme « risque » au lieu d'« odds » dans ce rapport.

¹⁸ Dans des cas exceptionnels, Euro NCAP permet que la voiture testée soit équipée de technologies de sécurité en option mais uniquement si l'option est disponible sur un grand nombre de voitures vendues et seulement pendant une courte période d'introduction. (Source : <https://www.euroncap.com/fr/euro-ncap/la-s%C3%A9lection-des-voitures/>). Dans ce cas, cependant, la sécurité est toujours évaluée et signalée à partir de la voiture dotée de l'équipement standard.

Outre l'effet de chacune caractéristique du véhicule, nous évoquons aussi la signification statistique de chaque effet. Lorsqu'un effet est statistiquement significatif, cela signifie qu'il est vraisemblable qu'il ne repose pas sur le hasard. Il existe différents niveaux de signification variant de « légèrement significatif » à « très significatif », exprimés comme suit : * $p < ,05$ (« significatif »); ** $p < ,01$; *** $p < ,001$ (« très significatif »).

Dans le chapitre « résultats et discussion », les caractéristiques des véhicules sont réparties en deux groupes. Le premier groupe comprend celles qui ont un effet direct sur la gravité des lésions : la masse du véhicule, la puissance du véhicule, la hauteur de capot et les notations de sécurité Euro NCAP. L'autre groupe est composé de celles qui ont un effet indirect sur la gravité des lésions comme la caractéristique "pick-up". Le raisonnement est qu'un pick-up n'influence pas intrinsèquement la gravité des lésions mais qu'il exerce une influence indirecte par le biais de sa masse, de sa puissance et de la hauteur de son capot par exemple. D'autres caractéristiques considérées comme « indirectes » sont « SUV », « véhicules électriques » et « âge du véhicule ».

Les caractéristiques directes de véhicule sont analysées via une régression logistique univariée. Par exemple, dans le cas de la masse du véhicule, cela signifie que seule la relation entre la masse du véhicule et la gravité des lésions est examinée sans tenir compte des autres caractéristiques des véhicules. Le modèle statistique comprend alors une variable prédictive, à savoir la masse du véhicule, et une variable dépendante, à savoir la gravité des lésions.

Les caractéristiques indirectes de véhicule sont initialement analysées selon la méthode de régression logistique univariée. Cette analyse est ensuite complétée par une analyse multivariée. Le modèle statistique comprend alors plusieurs variables prédictives, par exemple le pick-up, la masse, la puissance et la hauteur de capot. Dans la modélisation multivariée, une caractéristique indirecte de véhicule en tant que variable prédictive, par exemple le pick-up, est combinée à chaque fois avec les caractéristiques directes de véhicule en tant que variables prédictives. L'objectif étant de se servir des caractéristiques directes de véhicule pour expliquer pourquoi une caractéristique indirecte de véhicule a un impact sur la gravité des lésions.

4 Résultats et discussion

4.1 Caractéristiques des véhicules ayant un impact direct sur la gravité des lésions

4.1.1 Cohérence entre les caractéristiques des véhicules

Dans la section 4.1, nous décrivons l'effet de quatre caractéristiques directes des véhicules sur le risque de lésions graves d'une part et de lésions mortelles d'autre part. Il importe de savoir que ces quatre caractéristiques ne sont pas tout à fait indépendantes les unes des autres, mais qu'elles sont en corrélation les unes avec les autres (Tableau 8).

Nous observons au Tableau 8 que la corrélation positive la plus élevée se manifeste entre la masse du véhicule et la puissance du véhicule ($r = ,61$; $p < ,001$). Cette corrélation positive signifie que les voitures ayant une masse supérieure à la moyenne ont généralement aussi une puissance supérieure à la moyenne. Nous notons aussi que ces deux caractéristiques corrélaient positivement avec la hauteur de capot même si la corrélation est moins forte. La corrélation est de $,37$ ($p < ,001$) entre la masse du véhicule et la hauteur de capot et de $,24$ ($p < ,001$) entre la puissance du véhicule et la hauteur de capot.

Pour ce qui est de la notation Euro NCAP à 5 étoiles, les corrélations légèrement positives (Tableau 8) nous indiquent que les voitures ayant une masse plus élevée obtiennent généralement plus d'étoiles. En d'autres termes, les voitures ayant une masse et une puissance plus élevées performant mieux au niveau des crash tests Euro NCAP et disposent d'un meilleur équipement de sécurité que les voitures moyennes. Il existe une corrélation négative entre la notation Euro NCAP à 5 étoiles et la hauteur de capot : les voitures ayant une hauteur de capot supérieure à la moyenne obtiennent dès lors en moyenne une moins bonne évaluation de la sécurité par Euro NCAP.

Tableau 8 : Corrélations entre les variables influençant directement la gravité des lésions

	Masse du véhicule	Puissance du véhicule	Hauteur de capot	Notation Euro NCAP 5 à 5 étoiles
Masse du véhicule	1	,61	,37	,09
Puissance du véhicule	,61	1	,24	,21
Hauteur de capot	,37	,24	1	-,36
Notation Euro NCAP 5 à 5 étoiles	,09	,21	-,36	1

4.1.2 Masse du véhicule

4.1.2.1 Augmentation de la masse absolue

Les risques de lésions graves et mortelles pour les occupants d'une voiture pesant 300 kg de plus que la moyenne et pour les occupants de voiture et les usagers vulnérables heurtés par une voiture pesant 300 kg de plus que la moyenne sont présentés au Tableau 9.

Tableau 9 : Risque de lésions graves et mortelles en cas d'augmentation de la masse de 300 kg

	Lésions graves		Lésions mortelles	
	Odds ratio	Signification	Odds ratio	Signification
Pour les occupants de voiture (+ 300 kg)	0,684	<,001 ***	0,522	<,001 ***
Pour les occupants d'une voiture heurtée par une autre voiture (+ 300 kg)	1,372	<,001 ***	1,766	<,001 ***

Pour les usagers vulnérables heurtés par une voiture (+ 300 kg)	1,074	,030 *	1,282	,011*
---	-------	--------	-------	-------

4.1.2.1.1 Propre voiture

Notre analyse révèle que la masse du véhicule joue un rôle majeur dans les accidents de voiture bilatéraux. Ainsi, les occupants d'une voiture pesant 300 kg de plus qu'une autre voiture courent 31,6% de risques en moins de subir des lésions graves et 47,8% de risques en moins d'être mortellement blessés. L'augmentation de la masse offre donc une protection pour les occupants.

Ces chiffres sont d'une ampleur similaire à la baisse moyenne du risque constatée dans la littérature : pour une hausse de 100 kg, on a constaté (Høye, 2017) une diminution de 7,5% du risque de lésions graves ou mortelles. Une augmentation de 300 kg correspond à une baisse de 24,2% du risque.

4.1.2.1.2 Opposant en voiture

Outre l'effet protecteur de la masse de sa propre voiture, on observe également une « agressivité » croissante à mesure que la masse du véhicule de l'opposant augmente. Par exemple, les occupants d'une voiture heurtée par un véhicule pesant 300 kg de plus que la moyenne courent 37,2 % de risques en plus de subir des lésions graves et 76,6 % de risques en plus de subir des lésions mortelles.

Ces chiffres sont quelque peu supérieurs à la hausse moyenne du risque observée dans la littérature: pour une hausse de 100 kg, on a constaté (Høye, 2017) une augmentation de 6,6% de risque de lésions graves ou mortelles du côté de la partie adverse. Une hausse de 300 kg correspond à une hausse du risque de 21,1%. Cette moyenne est calculée sur la base des résultats de quatre études indépendantes. L'ampleur de l'effet varie également d'une étude à l'autre, ce qui nous amène à conclure que nos chiffres ne sont pas exceptionnellement élevés.

4.1.2.1.3 Usagers vulnérables

Selon notre analyse, la masse du véhicule est déterminante pour la gravité des lésions des usagers vulnérables lorsqu'ils sont heurtés par une voiture. La masse moyenne d'une voiture est de 1397 kg. Lors d'une collision avec une voiture pesant 300 kg de plus, le risque de lésions graves et de lésions mortelles augmente respectivement de 7,4% et de 28,2%.

4.1.2.2 Rapport de masse

Attendu que la masse du véhicule a aussi bien un effet protecteur pour les occupants qu'un effet agressif pour l'opposant, il est opportun de définir le rapport de masse entre le véhicule de la victime et celui de l'opposant.

Tableau 10 : Risque de lésions graves et mortelles pour différents rapports de masse entre le véhicule de la victime et celui de l'opposant

	Lésions graves		Lésions mortelles	
	Odds ratio	Signification	Odds ratio	Signification
Rapport de masse victime versus opposant (réf. Similaire 0,8 – 1,2)				
Très faible (< 0,5)	2,804	<,001 ***	1,166	,879 NS
Faible (0,5 – 0,8)	1,598	<,001 ***	1,473	,028 *
Grand (1,2 – 1,5)	0,686	<,001 ***	0,362	<,001 ***
Très grand (> 1,5)	0,407	<,001 ***	/	/

L'analyse montre que lorsque le rapport de masse est très faible, c'est-à-dire lorsque le véhicule de l'opposant est au moins deux fois plus lourd (par exemple dans une collision entre un véhicule de 1000 kg et un véhicule de 2000 kg), les occupants du véhicule léger courent presque trois fois plus de risques de subir des lésions graves que lorsque les deux véhicules ont une masse similaire. Lorsque la masse du véhicule est comprise entre 50 et 80 % de la masse de l'opposant, on observe une augmentation de 59,8 % du risque de lésions graves. Lorsque le rapport de masse est supérieur à 1,2 - et donc que la victime se trouve dans un véhicule plus lourd que celui de la partie adverse - le risque qu'elle soit grièvement blessée diminue de 31,4 % et de 59,3 % lorsque la différence est très importante. Les effets sont moins significatifs pour les lésions mortelles en raison du faible nombre de tués dans les différentes catégories. Nous nous attendons à observer le même scénario ici, peut-être même avec des effets plus importants que ceux observés dans la littérature.

4.1.3 Puissance du véhicule

Tableau 11 : Risque de lésions graves et mortelles en cas d'augmentation de la puissance de 50 kW

	Lésions graves		Lésions mortelles	
	Odds ratio	Signification	Odds ratio	Signification
Pour les occupants d'une voiture (+ 50 kW)	0,454	<,001 ***	0,354	,003 **
Pour les occupants d'une voiture heurtée par une autre voiture (+ 50 kW)	1,537	<,001 ***	2,275	<,001 ***
Pour les usagers vulnérables heurtés par des voitures (+ 50 kW)	1,069	,197 NS	1,215	,093 ¹⁹

4.1.3.1 Propre voiture

Il ressort de notre analyse que les occupants d'une voiture ayant une puissance de 50kW de plus qu'un autre véhicule courent 54,6% de risques en moins de subir des lésions graves et 64,6% de risques en moins de subir des lésions mortelles que les occupants de cet autre véhicule.

Ces observations peuvent s'expliquer par la forte corrélation (coefficient de corrélation $r = 0,61$) entre la masse et la puissance : des véhicules plus lourds sont en moyenne plus puissants et inversement. L'effet protecteur et agressif de la masse du véhicule est constaté dans la section 4.1.1.

4.1.3.2 Opposant en voiture

Outre l'effet protecteur de la puissance de sa propre voiture, on observe également une « agressivité » croissante à mesure que la puissance du véhicule de l'opposant augmente. Par exemple, les occupants d'une voiture heurtée par un véhicule d'une puissance supérieure de 50 kW à la moyenne courent 53,7 % de risques en plus de subir des lésions graves et 127,5 % de risques en plus de subir des lésions mortelles.

Ici aussi, la forte corrélation entre la masse et la puissance pourrait expliquer la hausse des risques. Par ailleurs, une puissance plus élevée va souvent de pair avec un style de conduite plus sportif, avec éventuellement par conséquent des collisions en cas de vitesses plus élevées. Cette hypothèse est étayée par la littérature scientifique : dans une étude sur l'effet de la puissance sur la vitesse, (McCartt & Hu, 2017) ont constaté que les conducteurs de véhicules puissants sont davantage tentés de dépasser la vitesse maximale autorisée. Selon (Krahé & Fenske, 2002) aussi, les conducteurs de voiture puissante ont en moyenne un style de conduite plus agressif.

4.1.3.3 Usagers vulnérables

Les résultats du Tableau 12 suggèrent une hausse du risque de lésions graves et mortelles chez les usagers vulnérables à mesure que la puissance de la voiture de l'opposant augmente mais ces résultats ne sont pas statistiquement significatifs.

4.1.4 Hauteur de capot

Tableau 12 : Risque de lésions graves et mortelles en cas d'augmentation de la hauteur de capot de 10 cm

	Lésions graves		Lésions mortelles	
	Odds ratio	Signification	Odds ratio	Signification
Pour les occupants d'une voiture (+ 10 cm)	0,955	,419 NS	1,019	,908 NS
Pour les occupants d'une voiture heurtée par une autre voiture (+ 10 cm)	0,999	,995 NS	1,073	,653 NS

¹⁹ Des « . » signifient qu'un effet est presque statistiquement significatif : la valeur p se situe donc entre ,05 et < ,1

Pour les usagers vulnérables heurtés par des voitures (+ 10 cm)	1,031	,356 NS	1,269	,015 *
---	-------	---------	-------	--------

4.1.4.1 Propre voiture

Les articles repris dans l'analyse de la littérature ne mentionnaient pas d'effet protecteur d'un capot plus haut sur sa propre voiture. Notre analyse ne révèle pas non plus d'effets statistiquement significatifs à cet égard.

4.1.4.2 Voiture de l'opposant

La littérature scientifique indique que l'agressivité des chocs augmente avec la hauteur de capot de la voiture de l'opposant. En outre, les lésions se déplacent de la hanche vers le haut du corps, ce qui entraîne des lésions plus graves. Notre analyse ne permet pas de confirmer ces résultats. Nous n'observons ni augmentation ni baisse du risque de lésions graves lorsque la hauteur de capot de la voiture augmente de 10 cm. Le risque de lésions mortelles augmente de 7 %, mais cet effet n'est pas non plus statistiquement significatif.

4.1.4.3 Usagers vulnérables

La plupart des articles de l'étude de littérature indiquent que le risque de lésions graves et mortelles chez les piétons augmente à mesure que la hauteur de capot du véhicule qui les heurte augmente. Nous parvenons au même résultat dans notre analyse ayant trait à l'ensemble des usagers vulnérables. La hauteur de capot moyenne d'une voiture est de 80 cm. En augmentant de 10 cm la hauteur de capot, le risque de lésions mortelles augmente de 26,9%. Etant donné que la littérature se concentre sur les piétons, nous avons également étudié dans l'analyse l'effet spécifique pour les piétons uniquement mais l'échantillon était trop petit pour obtenir des résultats statistiquement significatifs.

4.1.5 Notations de sécurité Euro NCAP

Tableau 13 : Risque de lésions graves et mortelles en cas d'augmentation d'1 étoile de la notation Euro NCAP pour les occupants d'une voiture

	Lésions graves		Lésions mortelles	
	Odds ratio	Signification	Odds ratio	Signification
Pour les occupants d'une voiture (+ 1 étoile sur une échelle de 0 à 5 étoiles)	0,921	,251 NS	0,957	,83 NS
Pour les occupants d'une voiture heurtée par une autre voiture (+ 1 étoile sur une échelle de 0 à 5 étoiles)	1,248	,005 **	1,485	,121 NS

Tableau 14 : Risque de lésions graves et mortelles chez les adultes et les enfants en cas de hausse de 10% respectivement de l'évaluation de la protection des passagers adultes et des jeunes passagers par Euro NCAP

	Lésions graves		Lésions mortelles	
	Odds ratio	Signification	Odds ratio	Signification
Pour les passagers adultes d'une voiture (+ 10 points au niveau de l'évaluation de la protection des passagers adultes <i>Adult Occupant Score</i> (sur une échelle de 0 à 100))	0,966	,554 NS	0,929	,64 NS
Pour les jeunes passagers d'une voiture (+ 10 points au niveau de l'évaluation de la protection des jeunes passagers <i>Child Occupant Score</i> sur une échelle de 0 à 100)	0,834	,548 NS	/	/

4.1.5.1 Propre voiture

Les occupants d'une voiture ayant 1 étoile de plus à la notation Euro NCAP qu'une autre voiture courent 7,9 % de risques en moins de lésions graves et 4,3% de risques en moins de lésions mortelles. Ces effets n'ont toutefois pas été jugés significatifs. Néanmoins, les résultats non significatifs sont conformes à ceux d'autres études, qui ont montré que les voitures avec plus d'étoiles protègent mieux leurs occupants. Pour rappel, dans l'étude (Lie & Tingvall, 2002), l'on relevait une réduction du risque de lésions graves et mortelles de 12% par étoile.

Outre la notation Euro NCAP à étoiles Euro NCAP attribue également un score « Adult Occupant » et un score « Child Occupant » sur une échelle de 0 à 100, reflétant respectivement la manière dont la voiture protège un occupant adulte et un enfant. Pour une augmentation de 10 points du score « Adult Occupant », le risque de lésions graves pour un occupant adulte semble diminuer de 3,4 %. Pour la même augmentation, le risque de lésions mortelles diminue de 7,1 %. Bien que ces effets ne soient pas statistiquement significatifs, ils suggèrent une tendance à la baisse à mesure que le score augmente. Pour la même augmentation du score « Child Occupant », la probabilité qu'un enfant soit grièvement blessé semble diminuer de 16,6 % (ce qui n'est pas non plus statistiquement significatif). Les données disponibles sont insuffisantes pour modéliser le risque de lésions mortelles. Aucun des effets constatés n'est statistiquement significatif. Lorsque davantage de données pourront être collectées et que la taille de l'échantillon augmentera, les effets constatés pourront être établis avec plus de certitude.

4.1.5.2 Voiture de l'opposant

Pour chaque étoile supplémentaire attribuée à la voiture de l'opposant, les occupants d'une voiture heurtée par cette voiture de l'opposant courent 24,8 % de risques en plus de subir des lésions graves. En outre, l'augmentation du risque de lésions graves est statistiquement significative. Les voitures ayant un nombre d'étoiles élevé, qui sont jugées plus sûres sur la base des tests de sécurité que les voitures ayant un nombre d'étoiles plus faible, sont donc plus susceptibles de causer des lésions graves à la partie adverse.

Une explication peut être trouvée dans la corrélation significative entre une notation par étoiles plus élevée et une masse et une puissance de véhicule plus élevées. La masse moyenne d'un véhicule 5 étoiles est de 1414 kg, soit environ 250 kg de plus que celle d'un véhicule 4 étoiles (1167 kg). Une voiture 5 étoiles a également une puissance moyenne supérieure de 21 kW à celle d'une voiture 4 étoiles. Il ressort des analyses antérieures aux sections 4.1.2 et 4.1.3 qu'une masse et une puissance plus élevées font augmenter le risque de lésions graves du côté de la partie adverse. Ce qui confirme le caractère explicatif de la masse et de la puissance, c'est le fait que lorsque l'on corrige la masse et la puissance en ajoutant ces variables au modèle, les augmentations de risque dues à des notations Euro NCAP plus élevées tombent de 25 % à 15 % et de 49 % à 27 %. La masse et la puissance expliquent donc en partie le fait que les voitures ayant une notation Euro NCAP par étoiles plus élevée sont « plus agressives » vis-à-vis de la partie adverse.

4.1.5.3 Usagers vulnérables

Tableau 15 : Risque de lésions graves et mortelles chez les piétons et les cyclistes en cas d'augmentation de 10% du score Euro NCAP Vulnerable Road Users

	Lésions graves		Lésions mortelles	
	Odds ratio	Signification	Odds ratio	Signification
Pour les piétons et les cyclistes heurtés par des voitures (+ 10 points au score VRU sur une échelle de 0 à 100)	1,003	0,984 NS	0, 557	0,237 NS

Outre la notation de sécurité à cinq étoiles, Euro NCAP a également attribué jusqu'en 2017 un score pour la sécurité des piétons en cas de collision avec une voiture. Depuis 2018, ce score pour les piétons est remplacé par un score pour les usagers vulnérables (= « VRU score »). Euro NCAP y inclut les piétons et les cyclistes. Nous limitons donc notre analyse à ces catégories d'usagers également. La notation va de 0 à 100, 100 étant la protection la plus élevée possible pour les usagers vulnérables.

Dans le cadre de cette étude, nous avons étudié l'effet du score Euro NCAP « usager vulnérable », mais aucun effet statistiquement significatif n'a pu être trouvé, que ce soit en termes de lésions graves ou de lésions

mortelles. L'échantillon est vraisemblablement trop petit pour tirer des conclusions : le score Euro NCAP « usagers vulnérables » de la voiture qui les a heurtés n'est connu que pour cinq usagers décédés.

4.2 Caractéristiques des véhicules ayant un impact indirect sur la gravité des lésions

4.2.1 Type de voiture : SUV et pick-up

Tableau 16 : Risque de lésions graves et mortelles lorsqu'un SUV est impliqué dans un accident corporel

	Lésions graves		Lésions mortelles	
	Odds ratio	Signification	Odds ratio	Signification
Pour les occupants de SUV	0,735	<,001 ***	0,482	,007 **
Pour les occupants d'une voiture heurtée par un SUV	1,180	,011 *	0,943	,777 NS

Tableau 17 : Risque de lésions graves et mortelles lorsqu'un pick-up est impliqué dans un accident corporel

	Lésions graves		Lésions mortelles	
	Odds ratio	Signification	Odds ratio	Signification
Pour les occupants de pick-up	0,359	<,001 ***	0,311	,244 NS
Pour les occupants d'une voiture heurtée par un pick-up	1,497	,014 *	1,059	,899 NS

4.2.1.1 Propre voiture

L'étude de littérature nous apprend que les occupants de SUV courent moins de risques de subir des lésions graves ou mortelles que les occupants d'une voiture. C'est également ce que nous avons observé dans notre analyse. Les occupants de SUV ont 26,5 % de risques en moins de subir des lésions graves que les occupants d'une voiture. Pour les lésions mortelles, l'effet s'accroît même jusqu'à la réduction de moitié du risque. Ces résultats sont statistiquement significatifs ($p < 0,01$) et d'une ampleur similaire aux résultats de l'étude de littérature.

Lorsque nous corrigeons les variables exerçant une influence directe dans l'analyse, l'effet protecteur des SUV n'est plus significatif alors que la masse et la puissance du véhicule le sont. En d'autres termes, les SUV ne protègent pas intrinsèquement mieux les occupants, mais leur masse et leur puissance supérieures à la moyenne expliquent pourquoi la probabilité de lésions graves pour les occupants diminue. La masse moyenne des SUV dans l'ensemble de données est de 1469 kg, soit environ 160 kg de plus que celle des autres véhicules. Ils ont également en moyenne une puissance supérieure de 16 kW.

Les pick-up protègent également mieux leurs occupants que les voitures. L'effet est nettement plus important que pour les SUV : les occupants ont 64,1 % de risques en moins de subir des lésions graves que les occupants d'une voiture. Pour les lésions mortelles, la réduction du risque est de 68,9 %, mais elle n'est pas significative en raison de la petite taille de l'échantillon, contrairement à la réduction du risque pour les lésions graves. Les chiffres figurant dans l'étude de littérature étaient de l'ordre de 15 à 25 %. Nous observons donc un effet plus important dans notre analyse.

Lorsque nous corrigeons les variables exerçant une influence directe dans l'analyse, l'effet protecteur des camionnettes n'est plus significatif alors que la masse et la puissance du véhicule le sont. Comme pour les SUV, cela signifie que les pick-up ne protègent pas intrinsèquement mieux les occupants, mais que la masse et la puissance supérieures à la moyenne des pick-up expliquent pourquoi le risque de lésions graves pour les occupants diminue. La masse moyenne des pick-up dans l'ensemble de données est de 2120 kg, soit environ 730 kg de plus que celle des autres véhicules. Ils ont également une puissance supérieure de 63 kW en moyenne. L'effet protecteur observé des pick-up est plus important que celui des SUV en raison de la différence de masse et de puissance beaucoup plus importante.

4.2.1.2 Voiture de l'opposant

Selon l'étude de littérature, les SUV sont plus « agressifs au niveau des chocs » que les voitures, ce qui signifie qu'ils occasionnent plus souvent de graves lésions aux victimes.

L'analyse montre que les occupants d'une voiture heurtée par un SUV ont 18 % de risques en plus de subir des lésions graves que lorsqu'ils sont heurtés par une voiture. Pour les lésions mortelles, nous observons une diminution de 5,7 %, mais celle-ci n'est pas statistiquement significative. La hausse du risque de lésions graves est statistiquement significative ($p < 0,05$) et conforme à la littérature scientifique, en ce sens que l'ampleur de l'effet est à nouveau similaire.

Lorsque nous corrigeons les variables ayant une influence directe dans l'analyse, l'effet « agressif » des SUV n'est plus significatif alors que la masse du véhicule l'est. Nous pouvons dès lors conclure que les SUV ne sont pas intrinsèquement plus agressifs envers la partie adverse, mais que la masse supérieure à la moyenne des SUV explique pourquoi le risque de lésions graves pour la partie adverse augmente.

Les pick-up sont également plus « agressifs » que les voitures. Notre analyse montre que les occupants d'une voiture heurtée par un pick-up courent 49,7 % de risques en plus de subir des lésions graves ($p < 0,05$) que lorsqu'ils sont heurtés par une voiture. Pour les lésions mortelles, nous observons une hausse de 5,9 %, mais cet effet n'est pas statistiquement significatif en raison du faible nombre d'accidents impliquant un pick-up et entraînant un décès.

Lorsque nous corrigeons les variables ayant une influence directe dans l'analyse, l'effet « agressif » des pick-up n'est plus significatif, alors que la masse du véhicule l'est. Nous pouvons dès lors en conclure que les pick-up ne sont pas intrinsèquement plus agressifs envers la partie adverse, mais que la masse supérieure à la moyenne des pick-up explique pourquoi le risque de lésions graves pour la partie adverse augmente.

4.2.1.3 Usagers vulnérables

Tableau 18: Risque de lésions graves et mortelles si les usagers vulnérables sont heurtés par un SUV

	Lésions graves		Lésions mortelles	
	Odds ratio	Signification	Odds ratio	Signification
Autre voiture que SUV (réf.)				
SUV XS	0,990	,863 NS	1,037	,833 NS
SUV S	1,070	,241 NS	1,217	,238 NS
SUV M	0,970	,766 NS	0,847	,623 NS
SUV L	1,402	,210 NS	1,774	,422 NS

Tableau 19: Risque de lésions graves et mortelles si les usagers vulnérables sont heurtés par un pick-up

	Lésions graves		Lésions mortelles	
	Odds ratio	Signification	Odds ratio	Signification
Autre voiture que pick-up (réf.)				
Pick-up	1,910	<,001 ***	2,960	,001 **

Pour analyser l'impact des SUV sur le risque de lésions graves et mortelles chez les usagers vulnérables, nous avons divisé la grande catégorie « SUV » en quatre catégories plus petites en fonction de la taille : SUV XS (longueur inférieure à 4,3 m), SUV S (de 4,3 à 4,6 m), SUV M (de 4,6 à 4,9 m) et SUV L (de 4,9 à 5,3 m). L'analyse au Tableau 18 ne montre aucune hausse/baisse statistiquement significative du risque de lésions graves et mortelles lorsqu'un usager vulnérable est heurté par un SUV, quelle que soit la taille du SUV. Néanmoins, les odds ratios de la plus grande catégorie de SUV, les SUV L, méritent d'être mentionnés. Selon le Tableau 18, le risque de lésions graves pour un usager augmente de 40,2 % lorsqu'il est heurté par un grand SUV ; le risque de lésions mortelles augmenterait même de 77,4 %. Ces résultats ne sont pas statistiquement significatifs en raison de la petite taille de l'échantillon (16 blessés graves et 2 usagers vulnérables tués dans des accidents impliquant un SUV L). Nous ne pouvons donc pas affirmer avec certitude que ces observations ne sont pas dues au hasard.

Lorsqu'un usager vulnérable est heurté par un pick-up, le risque de lésions graves double et le risque de lésions mortelles triple. Lorsque nous corrigeons les variables exerçant une influence directe dans l'analyse des lésions graves, la variable masse devient significative et l'effet de la variable pick-up passe de +91% à +65%. Cela signifie que la masse supérieure à la moyenne des pick-up contribue à expliquer pourquoi les pick-up augmentent le risque de lésions graves pour les usagers vulnérables. Lorsque nous corrigeons les variables ayant une influence directe dans l'analyse des lésions mortelles, la variable « pick-up » n'est plus statistiquement significative, alors que la masse et la hauteur de capot le sont. Cela signifie que la masse et la hauteur de capot supérieures à la moyenne des pick-up expliquent pourquoi les pick-up augmentent le risque de décès chez les usagers vulnérables. La masse des pick-up est en moyenne de 2127 kg contre 1356 kg pour l'ensemble des voitures et des camionnettes ; la hauteur de capot des pick-up est en moyenne de 106 cm contre 82 cm pour l'ensemble des voitures et des camionnettes. La comparaison de nos résultats avec l'étude de littérature se complique du fait que la plupart des autres études considèrent les SUV et les pick-up comme un seul groupe, alors que notre étude traite ces deux catégories de véhicules de manière distincte.

4.2.2 Voitures électriques

Tableau 20 : Risque de lésions graves et mortelles lorsqu'une voiture électrique est impliquée dans un accident corporel

	Lésions graves		Lésions mortelles	
	Odds ratio	Signification	Odds ratio	Signification
Pour les occupants d'une voiture électrique	/ ²⁰	/	/	/
Pour les occupants d'une voiture heurtée par une voiture électrique	0,798	,698 NS	2,356	,394 NS
Pour les usagers vulnérables heurtés par une voiture électrique	0,909	,692 NS	/	/

4.2.2.1 Propre voiture

Seuls 168 accidents de voiture bilatéraux ont été enregistrés au cours de la période 2017-2021, dans lesquels la partie heurtée conduisait une voiture électrique. Dans ces 168 accidents, les occupants de la voiture électrique n'ont subi aucune lésion grave ni aucun décès. Nous ne pouvons donc pas tirer de conclusions significatives sur le risque de lésions graves ou mortelles pour les occupants d'une voiture électrique.

4.2.2.2 Voiture de l'opposant

Notre analyse montre que les occupants d'une voiture heurtée par une voiture électrique courent 21,2 % de risques en moins de subir des lésions graves que lorsqu'ils sont heurtés par une voiture ordinaire. En revanche, le risque de décès est plus de deux fois plus élevé pour la même personne. Il convient toutefois d'être prudent, car ces effets ne sont pas statistiquement significatifs en raison d'un petit échantillon d'accidents impliquant des véhicules électriques. Seuls 154 accidents de voiture bilatéraux ont été enregistrés entre 2017 et 2021 dans lesquels l'opposant conduisait un véhicule électrique. Dans ces 154 accidents, 1 décès (0,5 %) est survenu du côté de la partie qui a été heurtée. À titre de comparaison, 96309 accidents de voiture bilatéraux impliquant des voitures classiques ont entraîné 205 décès (0,2 %) chez la partie qui a été heurtée.

On peut craindre un effet « agressif » des voitures électriques en raison de leur masse et de leur puissance supérieure à la moyenne. Cet effet n'est pas perceptible dans les données actuelles. Cependant, il est certain que le petit nombre de voitures électriques dans notre ensemble de données ont une masse moyenne de 1940 kg, soit environ 550 kg de plus que les voitures non électriques, et ont une puissance moyenne de 182 kW, soit 100 kW de plus que les voitures non électriques.

Pour l'instant, notre échantillon est trop petit pour tirer des conclusions. Avec la multiplication des voitures électriques et l'augmentation du nombre d'accidents les impliquant, on saura si la gravité des lésions dans les accidents impliquant des voitures électriques est significativement différente de celle des accidents impliquant des voitures ordinaires. La seule étude que nous ayons trouvée sur ce sujet et qui est basée en Norvège ne peut pas faire apparaître de différences significatives (Liu et al., 2022).

²⁰ Aucune donnée en raison de la taille trop réduite de l'échantillon.

4.2.2.3 Usagers vulnérables

Dans l'étude de littérature, nous n'avons trouvé aucune source d'information sur la gravité des lésions subies par les usagers vulnérables lorsqu'ils sont heurtés par une voiture électrique. Compte tenu de la masse plus élevée des voitures électriques impliquées dans les accidents corporels (1834 kg contre 1397 kg pour les voitures non électriques) et du bruit presque nul de leur moteur, on pourrait s'attendre à ce que les voitures électriques augmentent le risque de lésions graves et mortelles chez les usagers vulnérables, mais ce n'est pas ce qui ressort de notre analyse.

En raison du petit nombre d'accidents corporels impliquant des voitures électriques et des usagers de la route vulnérables, il est trop précoce pour tirer des conclusions sur le risque de lésions mortelles et, par conséquent, de lésions graves. En ce qui concerne l'évaluation des accidents de voiture bilatéraux, des conclusions définitives sur les accidents entre les voitures électriques et les usagers vulnérables ne pourront être formulées que lorsqu'il y aura davantage de voitures électriques sur nos routes.

4.2.3 Age du véhicule

Tableau 21 : Risque de lésions graves et mortelles en cas d'augmentation de l'âge du véhicule

	Lésions graves		Lésions mortelles	
	Odds ratio	Signification	Odds ratio	Signification
Pour les occupants d'une voiture d'un âge déterminé				
0-3 ans (réf.)				
4-11 ans	1,252	,018 *	0,953	,860 NS
12+	1,602	< ,001 ***	1,763	,088 .
Pour les occupants d'une voiture heurtée par une autre voiture d'un âge déterminé				
0-3 ans (réf.)				
4-11 ans	1,059	,518 NS	1,029	,909 NS
12+	0,834	,192 NS	0,581	,229 NS
Pour les usagers vulnérables heurtés par des voitures				
0-3 ans (réf.)				
4-11 ans	1,082	,153 NS	1,448	,034 *
12+	1,170	,049 *	1,306	,293 NS

4.2.3.1 Propre voiture

Les occupants des voitures plus âgées courent plus de risques de lésions graves que les occupants des voitures plus récentes. Par exemple, le risque de lésions graves augmente respectivement de 25,2 % et de 60,2 % en cas de collision avec un véhicule âgé de 4 à 11 ans ou de plus de 12 ans. La corrélation entre l'âge et la masse du véhicule révèle que les véhicules plus âgés sont plus légers. Par ailleurs, un effet protecteur de la masse a été constaté à la section 4.1.2. A l'inverse les véhicules plus légers protègent moins bien leurs occupants. Une autre explication réside dans le fait que les véhicules plus âgés sont moins bien équipés en systèmes de sécurité passive, tels que les zones de déformation, les airbags et les ceintures de sécurité avec prétensionneur.

Lorsque l'on corrige pour tenir compte de la masse et de la puissance du véhicule, l'effet de l'âge du véhicule sur le risque de lésions graves reste significatif. L'ampleur des effets diminue : le risque de lésions graves pour les occupants d'un véhicule âgé de 4 à 11 ans augmente de 21 % (contre 25 % auparavant) et pour les occupants d'un véhicule âgé de plus de 12 ans de 39 % (contre 60 % auparavant). Cela signifie que la masse et la puissance expliquent en partie l'augmentation du risque. Les voitures de plus de 12 ans ont une masse moyenne de 1 285 kg, soit environ 65 kg de moins que les véhicules de moins de 3 ans. Elles ont également une puissance moyenne de 65 kW, soit 16 kW de moins que les véhicules plus récents. Le fait que l'effet de l'âge du véhicule reste significatif suggère qu'il doit y avoir une autre explication à l'augmentation du risque

pour les occupants des véhicules plus âgés par rapport aux véhicules plus récents. Les voitures récentes disposent de plus de systèmes de sécurité et sont plus résistantes aux chocs que les véhicules plus âgés.

4.2.3.2 Voiture de l'opposant

Le risque de lésions graves et mortelles en fonction de l'âge du véhicule de l'opposant n'a pas augmenté ou diminué de manière significative. Bien que l'effet ne soit pas statistiquement significatif, l'analyse suggère une tendance à la baisse du risque de lésions graves et mortelles lorsque le véhicule de l'opposant a plus de 12 ans. La corrélation entre l'âge et la masse du véhicule montre que les véhicules plus âgés sont plus légers. Les véhicules plus légers sont moins susceptibles d'infliger des lésions graves à la partie adverse, ce qui explique les réductions de risque suggérées.

4.2.3.3 Usagers vulnérables

Plus l'ancienneté d'une voiture augmente, plus le risque de lésions graves pour l'utilisateur vulnérable heurté augmente. En comparant trois catégories d'âge du véhicule, on constate une augmentation statistiquement significative du risque de lésions graves dans la catégorie « >12 ans » par rapport à la catégorie « 0-3 ans » (odds ratio = +17%). Et pour les lésions mortelles, nous observons un risque accru statistiquement significatif dans la catégorie « 4-11 ans » par rapport à la catégorie « 0-3 ans » (odds ratio = +45%).

Les vieilles voitures augmentent donc le risque de lésions graves malgré une masse et une hauteur de capot inférieures en moyenne. Au chapitre 4.1, nous avons vu qu'une masse et une hauteur de capot inférieures réduisent la gravité des lésions subies. La masse des anciens véhicules (>12 ans) est de 1291 en moyenne contre 1346 kg pour les récents véhicules (0-3 ans); la hauteur de capot des anciennes voitures (>12 ans) est en moyenne de 79 cm contre 82 cm chez les voitures récentes (0-3 ans).

Lorsque nous corrigeons dans l'analyse les variables exerçant une influence directe sur les lésions graves, la variable âge du véhicule reste statistiquement significative, mais la variable masse devient également statistiquement significative. L'ampleur de l'effet de l'âge du véhicule ne change cependant pas : le risque de lésions graves reste accru de 17 % ($p < 0,05$) dans la catégorie « >12 ans » par rapport à la catégorie « 0-3 ans ». En ce qui concerne les lésions mortelles, le modèle multivarié corrigeant les variables ayant une influence directe ne change guère non plus : outre l'âge du véhicule, les variables masse et hauteur de capot deviennent significatives, et le risque accru de lésions mortelles dans la catégorie « 4-11 ans » par rapport à la catégorie « 0-3 ans » diminue de 45 % à 37 % ($p < 0,05$). Quoi qu'il en soit, nous pouvons en conclure que la masse et la hauteur de capot n'expliquent pas vraiment les effets observés de l'âge du véhicule sur la gravité des lésions chez les usagers vulnérables. Une explication possible est que les vieilles voitures sont moins équipées en systèmes de sécurité active et passive et sont donc moins sûres pour les usagers vulnérables, mais il n'est pas possible de le vérifier sur la base de l'ensemble de données actuel en raison du trop petit nombre d'accidents d'usagers vulnérables pour lesquels la « notation Euro NCAP » mesurant spécifiquement la sécurité pour les usagers vulnérables est connue.

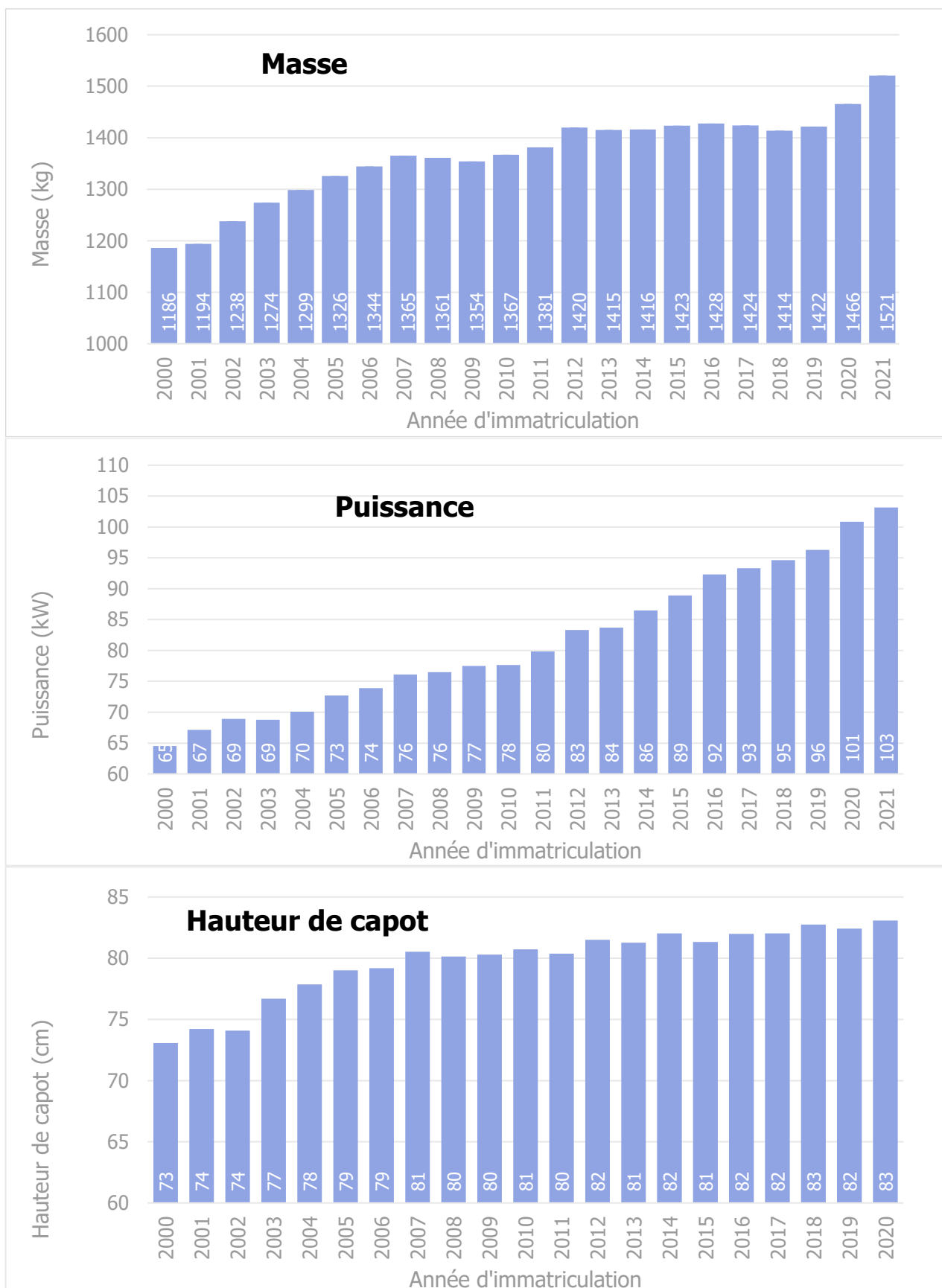
4.3 Evolution des caractéristiques des véhicules

Dans l'ensemble de données couplées, il y a également une variable concernant l'année d'immatriculation. Cette variable reflète l'année où un véhicule a été immatriculé pour la première fois auprès de l'administration belge, plus précisément auprès de la Direction pour l'Immatriculation des Véhicules (DIV) du Service Public Fédéral Mobilité et Transports. Pour la plupart des voitures, l'année d'immatriculation correspond à peu près à leur année de construction. L'année d'immatriculation donne donc une indication de l'ancienneté du véhicule. Pour une petite part des voitures, ce n'est pas le cas, notamment pour les voitures qui ont d'abord été immatriculées et utilisées à l'étranger, puis importées et immatriculées en Belgique.

La variable « année d'immatriculation » permet de connaître l'évolution des caractéristiques des voitures impliquées dans des accidents corporels. Comment les caractéristiques des véhicules récents (impliqués dans des accidents corporels) se comportent par rapport à celles des véhicules plus âgés (impliqués dans des accidents corporels) ? Cette question est examinée et illustrée par les figures dans le présent chapitre.

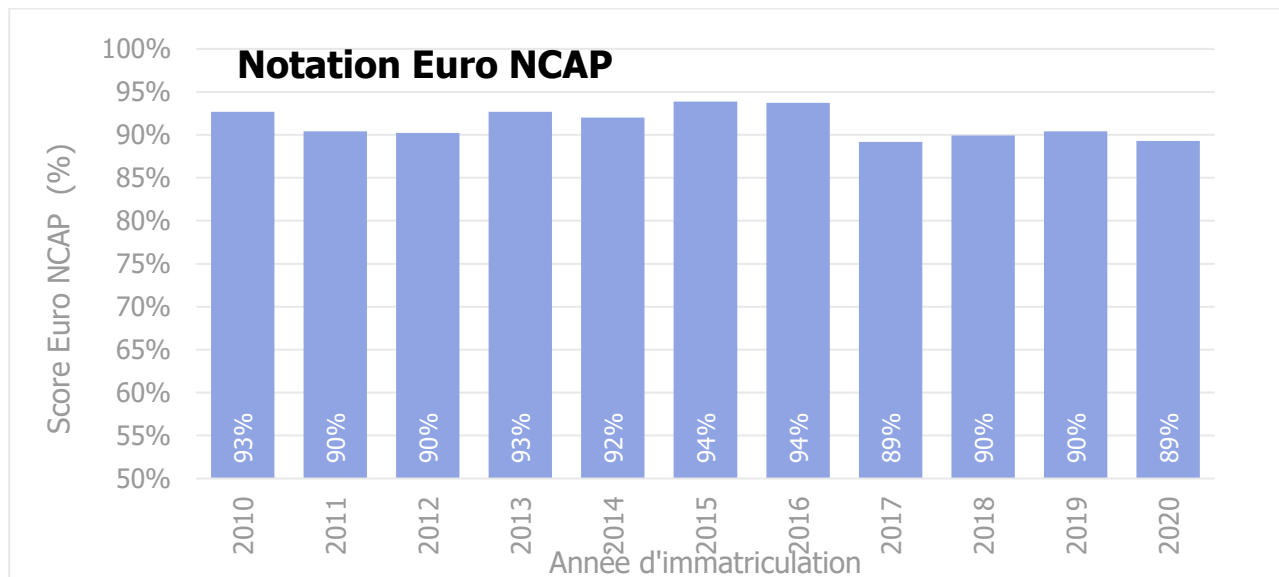
Figure 1 présente l'évolution de la masse moyenne, de la puissance et de la hauteur de capot. En 20 ans, depuis 2000, la masse moyenne des voitures a augmenté de 28%, la puissance moyenne de 60%, et la hauteur de capot moyenne de 14%. Au chapitre 4.1, nous avons vu qu'une masse et une puissance élevées augmentaient la « résistance aux chocs », ou la capacité d'un véhicule à protéger ses occupants. D'un autre côté, « l'agressivité des chocs », l'impact sur la gravité des lésions de l'opposant croît à mesure que la masse et la puissance augmentent. Nous avons par ailleurs observé au chapitre 4.1 qu'une hausse de la hauteur de capot augmente le risque de lésions mortelles chez les usagers vulnérables. L'évolution des caractéristiques des véhicules (masse, puissance et hauteur de capot) semble donc plus profitable pour les occupants de voiture et préjudiciable pour les opposants.

Figure 1 : Masse, puissance et hauteur de capot moyennes des voitures impliquées dans les accidents corporels selon l'année d'immatriculation



La Figure 2 montre l'évolution de la part de voitures avec une notation de sécurité Euro NCAP d'au moins 4. Cette part varie entre 94% et 89% et semble baisser au cours des quatre dernières années par rapport à avant. Ceci ne signifie pas que les voitures récentes soient moins résistantes aux chocs ou disposent d'un moins bon équipement de sécurité. En effet, l'organisation Euro NCAP met à jour son système d'évaluation année après année car la technologie ne cesse d'évoluer et que de nouvelles innovations arrivent sur le marché. La signification d'une notation Euro NCAP 5 ou 4 évolue donc au fil des ans.

Figure 2 : Part de voitures impliquées dans les accidents corporels avec une notation Euro NCAP d'au moins 4 selon l'année d'immatriculation



Quatre voitures sur 10 immatriculées pour la première fois au sein de l'administration belge sont des SUV (Figure 3). En 2000, il ne s'agissait encore que d'1 voiture sur 100. La part croissante de SUV explique partiellement la hausse annuelle de la masse, de la puissance et de la hauteur de capot des voitures (Figure 1). Les analyses au chapitre 4.2, statistiquement significatives ou non, semblent indiquer une résistance plus élevée aux chocs et une plus grande agressivité des SUV en comparaison des non-SUV. L'évolution de la part de SUV dans le parc automobile semble par conséquent plutôt avantager les occupants de voiture et porter préjudice aux opposants. Figure 4 montre en outre qu'au sein du groupe de SUV, la part de SUV moyennement grands à très grands augmente depuis 2013 environ tandis que la part de SUV de plus petite taille diminue.

Figure 3 : Part de SUV impliqués dans les accidents corporels selon l'année d'immatriculation

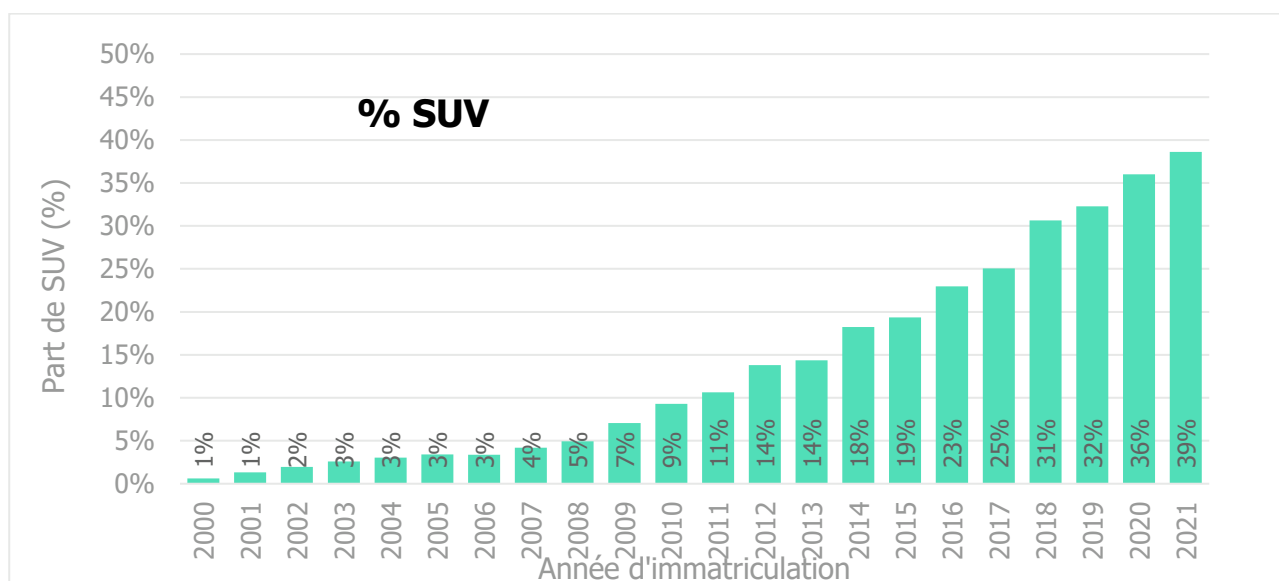
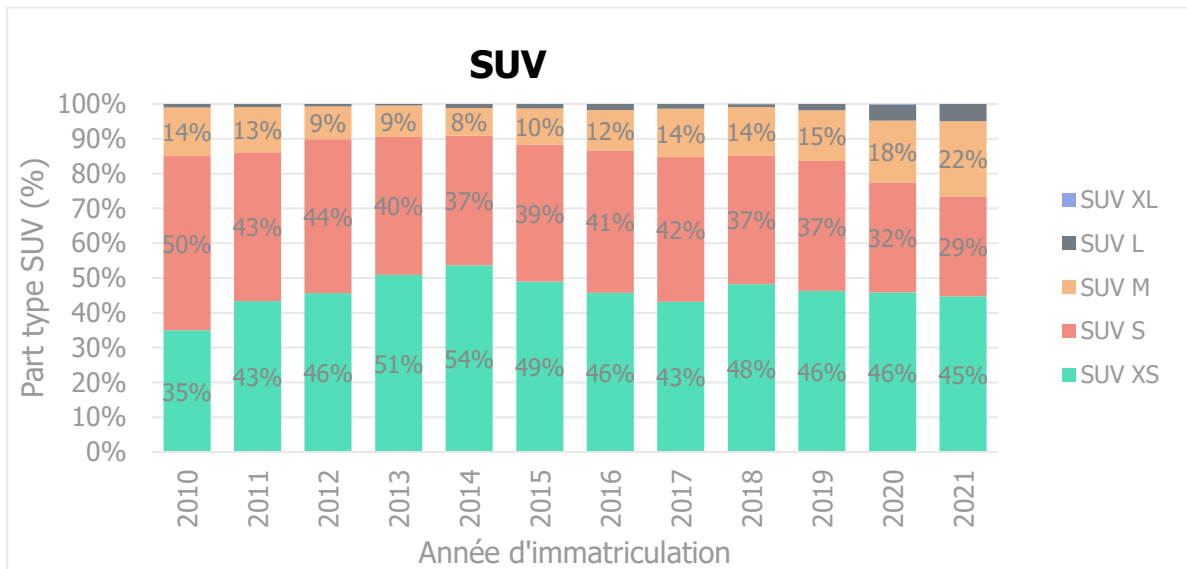
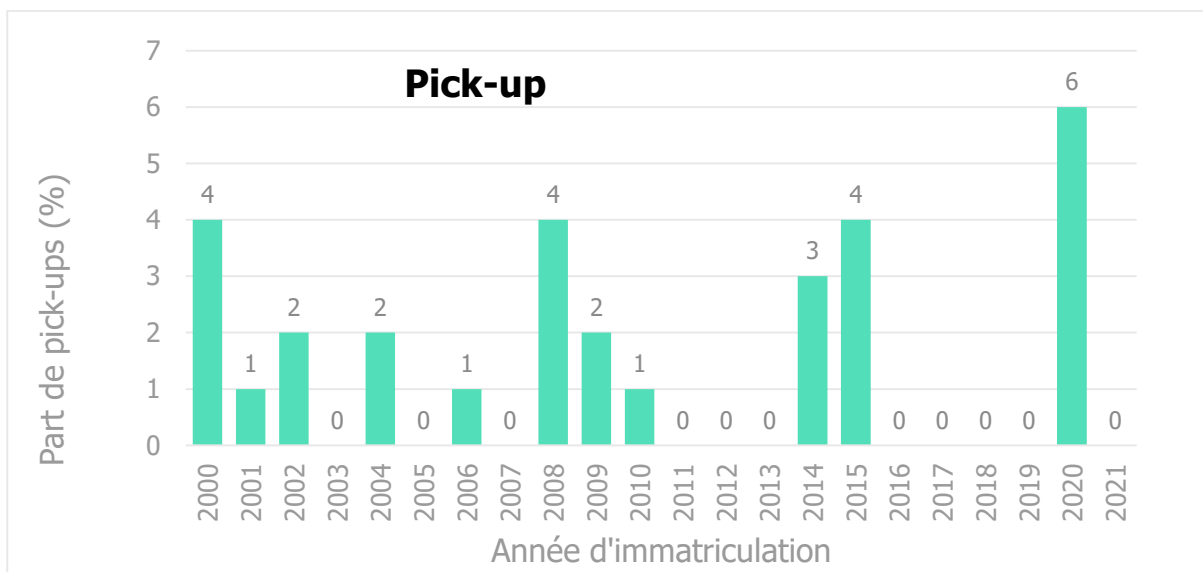


Figure 4 : Part de SUV impliqués dans les accidents corporels selon la taille et l'année d'immatriculation



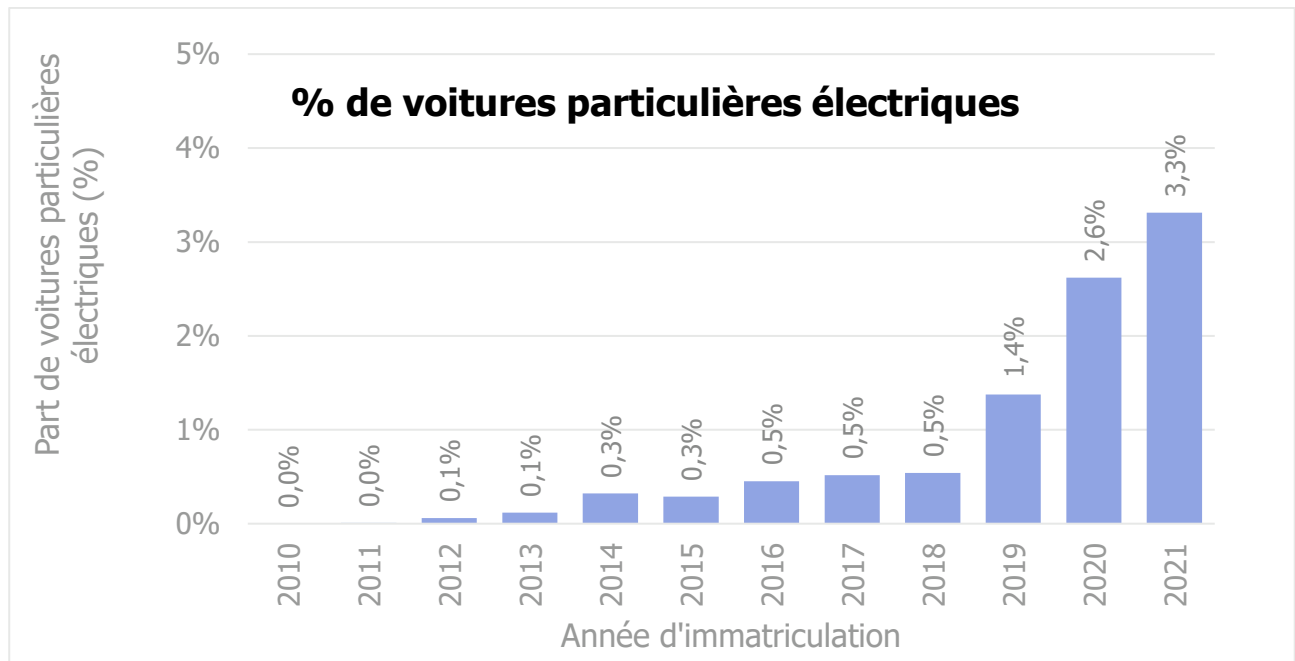
Le nombre de pick-up impliqués dans les accidents corporels est très faible (Figure 5). Certaines années, aucun pick-up n'a été impliqué dans un accident corporel. Sur la base de la figure ci-dessous, il n'est par conséquent pas possible d'émettre d'avis sur l'évolution des pick-up dans les accidents corporels, et plus globalement, dans le parc automobile.

Figure 5 : Nombre de pick-up impliqués dans les accidents corporels selon l'année d'immatriculation



Plus le parc automobile rajeunit, plus la part de voitures électriques augmente. 3% des voitures immatriculées en 2021 sont électriques (Figure 6). Il est à supposer que cette tendance à la hausse se poursuive à l'avenir. Il est apparu au chapitre 4.2.2 que la part de véhicules électriques est encore trop faible dans les accidents corporels pour tirer des conclusions quant à leur lien avec la gravité des lésions. Partant, nous ne pouvons pas nous prononcer non plus sur l'impact de la croissance des voitures électriques sur la sécurité de leurs occupants et de leurs opposants. Nous pouvons émettre comme hypothèse que la masse plus élevée des voitures électriques leur confère davantage de résistance aux chocs et les rend plus agressives que les voitures non électriques, mais que cette agressivité est en partie compensée par des systèmes de sécurité plus récents et plus performants par rapport à d'autres voitures.

Figure 6 : Part de voitures électriques impliquées dans les accidents corporels selon l'année d'immatriculation



5 Conclusions et recommandations

Les questions de recherche de cette étude sont les suivantes :

- Quelles caractéristiques d'une voiture déterminent la gravité des lésions des occupants de voiture (dans les accidents corporels impliquant d'autres voitures) ?
- Quelles caractéristiques d'une voiture influencent la gravité des lésions des opposants parmi les occupants des voitures et les usagers vulnérables ?

Il est répondu à ces questions dans la présente étude par le biais d'une étude de littérature et d'une analyse statistique des données d'accidents belges.

L'étude de littérature nous montre qu'un certain nombre de caractéristiques des véhicules ont un effet sur la gravité des lésions des occupants et des opposants. L'ampleur des effets constatés varie d'une étude à l'autre. Tout d'abord, la masse du véhicule a un effet à la fois protecteur et « agressif » : les occupants de véhicules ayant une masse plus élevée risquent moins d'être grièvement ou mortellement blessés, tandis que les opposants heurtés par un véhicule ayant une masse plus élevée courent davantage de risques de subir des lésions graves ou mortelles. Lorsque l'opposant est un usager vulnérable, certaines études constatent une hausse du risque de lésions mortelles à mesure que la masse du véhicule augmente, tandis que d'autres études ne relèvent aucun effet. Des tendances similaires sont observées pour les pick-up et les SUV : les occupants de pick-up et de SUV courent moins de risques de subir des lésions graves et mortelles que les occupants d'une voiture, alors que les opposants heurtés par un pick-up ou un SUV risquent plus d'être grièvement blessés ou mortellement blessés que les opposants heurtés par une voiture. Une fois encore, certaines études montrent que les usagers vulnérables percutés par un pick-up ou un SUV courent plus de risques de subir des lésions graves ou mortelles que les usagers vulnérables heurtés par une voiture alors que d'autres études ne relèvent aucun effet. Très peu de recherches ont été menées sur la gravité des lésions dans les accidents impliquant des voitures électriques. La seule étude trouvée à ce sujet ne révèle aucune différence au niveau de la gravité des lésions entre les accidents impliquant des voitures électriques et les accidents impliquant des voitures à moteur à combustion.

Il ressort de l'étude de littérature que le risque de lésions graves chez les opposants augmente à mesure que la hauteur de capot du véhicule qui les heurte augmente. Le risque de lésions graves et mortelles augmente chez les usagers vulnérables. De surcroît, le risque de lésions graves et mortelles augmente selon que l'âge du véhicule augmente.

Enfin, les notations de sécurité Euro NCAP se reflètent également dans la pratique : les occupants de voiture risquent moins de subir des lésions graves ou mortelles à mesure que le score de sécurité Euro NCAP augmente. De même, les usagers vulnérables courent moins de risques d'être grièvement ou mortellement blessés selon que le score Euro NCAP pour les piétons augmente.

L'analyse statistique montre que les caractéristiques des véhicules suivantes limitent la gravité des lésions des occupants de voiture : masse élevée, puissance élevée, SUV (versus non-SUV) et pick-up (versus non-pick-up). En même temps, les quatre caractéristiques précitées accroissent la gravité des lésions du côté de *la partie adverse* (dans le cas de la puissance et des SUV, uniquement pour les occupants de la voiture), de même qu'une hauteur de capot élevée (hausse uniquement chez les usagers vulnérables) et une notation générale Euro NCAP élevée (hausse uniquement chez les opposants en voiture). Enfin, un âge de véhicule élevé accroît aussi bien la gravité des lésions chez les occupants de voiture que chez les usagers vulnérables. L'analyse statistique n'a pu mettre en évidence de corrélation avec la gravité des lésions que pour la caractéristique de véhicule « véhicule électrique (versus véhicule non électrique) ». L'étude de littérature n'a pas non plus révélé de corrélation entre les deux.

En dehors de l'âge du véhicule, les caractéristiques des véhicules limitant la gravité des lésions des occupants de voiture (la masse par exemple) semblent augmenter la gravité des lésions de l'autre partie, qu'il s'agisse d'occupants de voiture ou d'usagers vulnérables. En d'autres termes, les caractéristiques des véhicules augmentant la résistance aux chocs (c'est-à-dire la capacité à protéger les occupants en cas de collision) semblent également augmenter l'agressivité des chocs (c'est-à-dire l'incapacité à protéger l'opposant en cas de collision).

En outre, nous constatons dans le présent rapport que les caractéristiques des véhicules précitées ont évolué de plus en plus à l'avantage des occupants et de plus en plus au détriment des opposants. En effet, la masse,

la puissance et la hauteur de capot moyennes des voitures n'ont fait qu'augmenter au cours des 20 dernières années. Concernant les SUV, la part de SUV de taille moyenne à grande n'a cessé de croître.

Au vu des collisions étudiées dans ce rapport, c'est-à-dire les accidents de voiture bilatéraux et les accidents entre voitures et usagers vulnérables, les observations et les tendances décrites sont particulièrement préjudiciables aux catégories d'usagers suivantes :

- Les usagers vulnérables : alors que les voitures gagnent en robustesse, les usagers vulnérables, en particulier les piétons et cyclistes, sont toujours aussi vulnérables qu'il y a vingt ans.
- Les occupants d'une voiture moins robuste (masse et puissance plus faibles) qu'une autre voiture.

Sur la base de ces observations, il est recommandé d'axer les mesures sur la réduction de l'hétérogénéité entre les voitures et sur la protection des usagers vulnérables en cas de collision avec des voitures.

Une mesure possible est l'introduction d'un nouvel indicateur Euro NCAP évaluant la sécurité d'un véhicule testé pour l'opposant en voiture. En effet, l'organisation Euro NCAP a développé une série d'indicateurs évaluant la sécurité des occupants comme la notation générale Euro NCAP, le score « adult occupant score » et le score « child occupant score ». En outre, cette organisation a développé un indicateur pour évaluer la sécurité des usagers vulnérables heurtés.²¹ Un indicateur Euro NCAP sur la sécurité de l'opposant en voiture pourrait compléter le système d'évaluation Euro NCAP.

Les occupants de voiture courent 60% plus de risques de lésions graves dans les anciens véhicules (≥ 12 ans) que dans les véhicules récents (0-3 ans). Les usagers vulnérables risquent également davantage d'être grièvement blessés lorsqu'ils sont heurtés par une ancienne voiture que quand ils sont percutés par une voiture récente mais ce pourcentage est plus faible, à savoir 17%. Le fait que les récentes voitures soient, malgré une masse et une hauteur de capot moyennes plus élevées, plus sûres pour les usagers vulnérables que les anciennes voitures est probablement lié aux améliorations apportées à la conception et à l'équipement des véhicules. Il est essentiel que les améliorations se poursuivent à l'avenir et qu'il y ait au niveau européen des exigences plus strictes au niveau des véhicules, de meilleurs systèmes d'aide à la conduite pour protéger les usagers vulnérables et une limitation de la masse maximale des voitures.

Une autre mesure possible consiste à prendre en compte les caractéristiques des véhicules qui augmentent le risque de lésions graves chez les opposants lors du calcul de la taxe de circulation annuelle. Dans un certain nombre de pays tels que les Pays-Bas, la Lettonie ou le Japon, la masse du véhicule est prise en compte dans le calcul de la taxe de circulation annuelle, parfois en combinaison avec une mesure de la cylindrée. En Belgique, les taxes de circulation annuelles sont prélevées par les Régions et tiennent actuellement compte de la puissance (fiscale) et de certaines caractéristiques environnementales. Comme il existe une forte corrélation entre la puissance (fiscale) et la masse des voitures, cela signifie que les Régions taxent déjà indirectement en partie sur la base de la masse.

²¹ Ce score ciblant les piétons et les cyclistes n'a été instauré qu'en 2018. En raison de la petite taille de l'échantillon, nous n'avons pas pu trouver d'effet significatif du « score VRU » sur le risque de lésions graves ou mortelles pour les usagers vulnérables.

Références

- Arefkhani, H., Besharati, M. mehdi, Azizi Bondarabadi, M., & Tavakoli Kashani, A. (2019). How does the incompatibility of different vehicle types affect the odds of driver injury? *Journal of Transportation Safety and Security*, 13(8), 860–876. <https://doi.org/10.1080/19439962.2019.1691101>
- Ballesteros, M. F., Dischinger, P. C., & Langenberg, P. (2004). Pedestrian injuries and vehicle type in Maryland, 1995-1999. *Accident Analysis and Prevention*, 36(1), 73–81. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(02\)00129-X](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(02)00129-X)
- Batouli, G., Guo, M., Janson, B., & Marshall, W. (2020). Analysis of pedestrian-vehicle crash injury severity factors in Colorado 2006–2016. *Accident Analysis and Prevention*, 148. <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2020.105782>
- Buzeman-Jewkes, D. (1998). *Car Compatibility in Frontal Crashes: New Methods to Determine the Influence of Mass, Structure, Stiffness, and Geometry, and their Interactions on Injuries*.
- Dons, E., Wrzesinska, D., Ben Messaoud, Y., & Deleuze, J.-J. (2023). *The transition to electric vehicles in the private fleet (GREENPARK) – Identification of the technical, societal and taxation framework for an efficient transition to greener fleets*.
- Edwards, M., & Leonard, D. (2022). Effects of large vehicles on pedestrian and pedalcyclist injury severity. *Journal of Safety Research*, 82, 275–282. <https://doi.org/10.1016/J.JSR.2022.06.005>
- Elvik, R., & Skaansar, E. (1989). *Utviklingen av bilenes fartsressurser etter ca 1960*.
- Evans, Leonard (2004). *Traffic Safety*. Bloomfield Hills, Michigan: Science Serving Society.
- Evans, L. (1985). Car size and safety: Results from analysing U.S. accident data. *Proceedings of the Tenth International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles*, 548–556.
- Evans, L., & Frick, M. C. (1993). Mass ratio and relative driver fatality risk in two-vehicle crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 25(2), 213–224. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(93\)90062-2](https://doi.org/10.1016/0001-4575(93)90062-2)
- Fredette, M., Mambu, L. S., Chouinard, A., & Bellavance, F. (2008). Safety impacts due to the incompatibility of SUVs, minivans, and pickup trucks in two-vehicle collisions. *Accident Analysis and Prevention*, 40(6), 1987–1995. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.08.026>
- Gunasekaran, T. K. K. (2021). *Significance of the vehicle front design and gait postures on traumatic brain injuries sustained by different pedestrian populations during car-to-pedestrian collisions (CPCs) - A computational approach* [The University of Western Ontario]. <https://ir.lib.uwo.ca/etdhttps://ir.lib.uwo.ca/etd/8218>
- Høye, A. K. (2017). *Road safety effects of vehicles crashworthiness, weight, and compatibility - Transportøkonomisk institutt*. <https://www.toi.no/publications/road-safety-effects-of-vehicles-crashworthiness-weight-and-compatibility-article34633-29.html>
- Khattak, A. J. (2001). Injury Severity in Multivehicle Rear-End Crashes. *Transportation Research Record*, 1746, 59–68. <https://doi.org/10.3141/1746-08>
- Kim, J. K., Ulfarsson, G. F., Shankar, V. N., & Kim, S. (2008). Age and pedestrian injury severity in motor-vehicle crashes: A heteroskedastic logit analysis. *Accident Analysis and Prevention*, 40(5), 1695–1702. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.06.005>
- Kockelman, K. M., & Kweon, Y. J. (2002). Driver injury severity: An application of ordered probit models. *Accident Analysis and Prevention*, 34(3), 313–321. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(01\)00028-8](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(01)00028-8)
- Krahé, B., & Fenske, I. (2002). Predicting Aggressive Driving Behavior: The Role of Macho Personality, Age, and Power of Car. *Aggressive Behavior*, 28(1), 21–29. <https://doi.org/10.1002/ab.90003>
- Kullgren, A., Axelsson, A., Stigson, H., & Ydenius, A. (2019). *DEVELOPMENTS IN CAR CRASH SAFETY AND COMPARISONS BETWEEN RESULTS FROM EURO NCAP TESTS AND REAL-WORLD CRASHES*. <http://www.euroncap.com>.

- Kullgren, A., Lie, A., & Tingvall, C. (2010). Comparison Between Euro NCAP Test Results and Real-World Crash Data. *https://doi.org/10.1080/15389588.2010.508804*, 11(6), 587–593. <https://doi.org/10.1080/15389588.2010.508804>
- Langwieder, K., Fildes, B., Ernvall, T., & Cameron, M. (2003). *SARAC-SAFETY RATING BASED ON REAL-WORLD CRASHES FOR SUPPLEMENTATION OF NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMS*.
- Les, M., Morris, A., & Olsson, T. (2001). Vehicle properties determining aggressivity. *Road Safety Researcher's Conference. 2001: Road Safety Research, Policing and Education*.
- Li, G., Lyons, M., Wang, B., Yang, J., Otte, D., & Simms, C. (2017). The influence of passenger car front shape on pedestrian injury risk observed from German in-depth accident data. *Accident; Analysis and Prevention*, 101, 11–21. <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2017.01.012>
- Lie, A., & Tingvall, C. (2002). How do Euro NCAP results correlate with real-life injury risks? A paired comparison study of car-to-car crashes. *Traffic Injury Prevention*, 3(4), 288–293. <https://doi.org/10.1080/15389580214632>
- Liu, C., Zhao, L., & Lu, C. (2022). Exploration of the characteristics and trends of electric vehicle crashes: a case study in Norway. *European Transport Research Review*, 14(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/S12544-022-00529-2/TABLES/9>
- McCartt, A. T., & Hu, W. (2017). Effects of vehicle power on passenger vehicle speeds. *Traffic Injury Prevention*, 18(5), 500–507. <https://doi.org/10.1080/15389588.2016.1241994>
- Mizuno, K., & Kajzer, J. (1999). Compatibility problems in frontal, side, single car collisions and car-to-pedestrian accidents in Japan. *Accident; Analysis and Prevention*, 31(4), 381–391. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(98\)00076-1](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(98)00076-1)
- Newstead, S., Delaney, A., Watson, L., Cameron, M., & Langwieder, K. (2015). *INJURY RISK ASSESSMENT FROM REAL WORLD INJURY OUTCOMES IN EUROPEAN CRASHES AND THEIR RELATIONSHIP TO EURONCAP TEST SCORES*.
- Padmanaban, J. (2003). Influences of Vehicle Size and Mass and Selected Driver Factors on Odds of Driver Fatality. *Annual Proceedings / Association for the Advancement of Automotive Medicine*, 47, 507. <https://pmc/articles/PMC3217563/>
- Pastor, C. (2013). Correlation between pedestrian injury severity in real-life crashes and Euro NCAP pedestrian test results. *23rd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*.
- Pour-Rouholamin, M., & Zhou, H. (2016). Investigating the risk factors associated with pedestrian injury severity in Illinois. *Journal of Safety Research*, 57, 9–17. <https://doi.org/10.1016/J.JSR.2016.03.004>
- Roudsari, B. S., Mock, C. N., Kaufman, R., Grossman, D., & Roudsari, B. S. (2004). Pedestrian crashes: higher injury severity and mortality rate for light truck vehicles compared with passenger vehicles. *Injury Prevention*, 10, 154–158. <https://doi.org/10.1136/ip.2003.003814>
- Saadé, J., Cuny, S., Labrousse, M., Song, E., Chauvel, C., & Chrétien, P. (2020). Pedestrian injuries and vehicles-related risk factors in car-to-pedestrian frontal collisions. *Ircobi*, 278–289.
- Seyer, K., Newland, C., Terrell, M., & Dalmotas, D. (2000). The effect of mass, stiffness and geometry on injury outcome in side impacts - a parametric study. *Stapp Car Crash Journal*, 44(November). <https://doi.org/10.4271/2000-01-SC01>
- Shang, S., Otte, D., Li, G., & Simms, C. (2018). Detailed assessment of pedestrian ground contact injuries observed from in-depth accident data. *Accident Analysis & Prevention*, 110, 9–17. <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2017.10.011>
- Siegel, J. H., Loo, G., Dischinger, P. C., Burgess, A. R., Wang, S. C., Schneider, L. W., Grossman, D., Rivara, F., Mock, C., Natarajan, G. A., Hutchins, K. D., Bents, F. D., McCammon, L., Leibovich, E., & Tenenbaum, N. (2001). Factors influencing the patterns of injuries and outcomes in car versus car crashes compared to sport utility, van, or pick-up truck versus car crashes: Crash Injury Research Engineering Network Study. *The Journal of Trauma*, 51(5), 975–990. <https://doi.org/10.1097/00005373-200111000-00024>

- Strandroth, J., Rizzi, M., Sternlund, S., Lie, A., & Tingvall, C. (2011). The Correlation Between Pedestrian Injury Severity in Real-Life Crashes and Euro NCAP Pedestrian Test Results. *Http://Dx.Doi.Org/10.1080/15389588.2011.607198*, 12(6), 604–613. <https://doi.org/10.1080/15389588.2011.607198>
- Strandroth, J., Sternlund, S., Lie, A., Tingvall, C., Rizzi, M., Kullgren, A., Ohlin, M., & Fredriksson, R. (2014). Correlation Between Euro NCAP Pedestrian Test Results and Injury Severity in Injury Crashes with Pedestrians and Bicyclists in Sweden. *Stapp Car Crash Journal*, 58, 213–231.
- Tyndall, J. (2021). Pedestrian deaths and large vehicles. *Economics of Transportation*, 26–27, 100219. <https://doi.org/10.1016/J.ECOTRA.2021.100219>
- Uddin, M., & Ahmed, F. (2018). Pedestrian Injury Severity Analysis in Motor Vehicle Crashes in Ohio. *Safety 2018*, Vol. 4, Page 20, 4(2), 20. <https://doi.org/10.3390/SAFETY4020020>
- Yau, K. K. W. (2004). Risk factors affecting the severity of single vehicle traffic accidents in Hong Kong. *Accident Analysis and Prevention*, 36(3), 333–340. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(03\)00012-5](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(03)00012-5)
- Yin, S., Li, J., & Xu, J. (2017). Exploring the mechanisms of vehicle front-end shape on pedestrian head injuries caused by ground impact. *Accident Analysis & Prevention*, 106, 285–296. <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2017.06.005>
- Zeng, Q., Wen, H., & Huang, H. (2016). The interactive effect on injury severity of driver-vehicle units in two-vehicle crashes. *Journal of Safety Research*, 59, 105–111. <https://doi.org/10.1016/J.JSR.2016.10.005>

Annexes

5.1 Annexe 1 : Détermination de la hauteur de capot

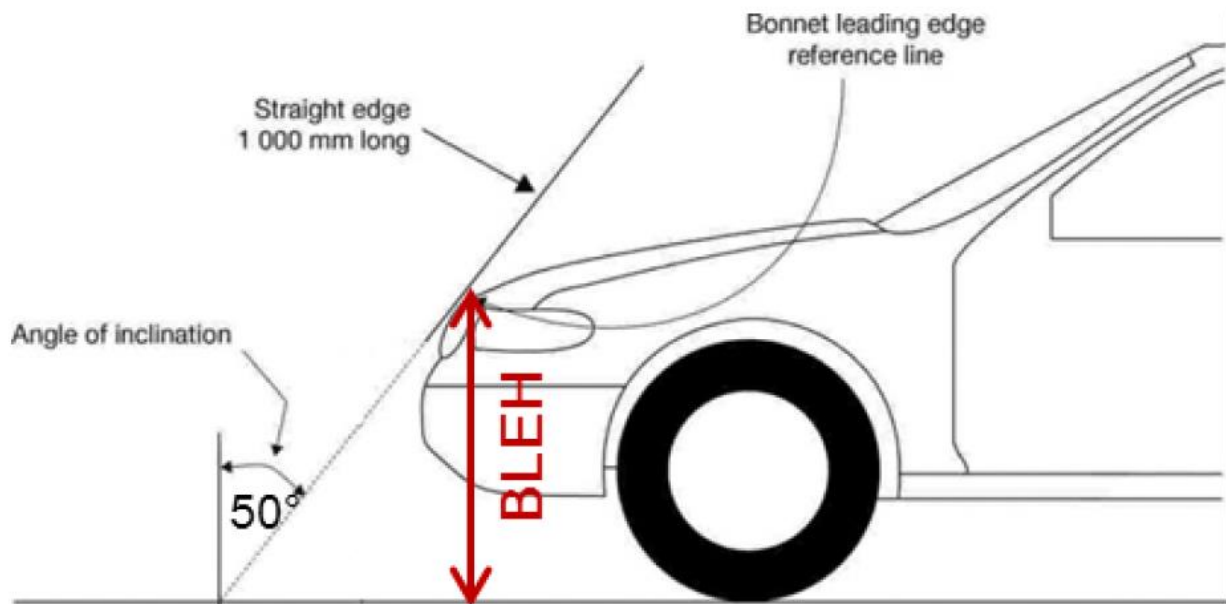
Il n'existe pas de base de données générale contenant des informations sur la hauteur de capot par version du modèle de voiture. Pour cette étude, la hauteur de capot par version de modèle a donc dû être calculée de manière indépendante. Ce calcul a été effectué pour 115 modèles de voiture et toutes leurs différentes versions depuis 2000. Les 115 modèles de voiture ont été sélectionnés sur la base de leur fréquence dans les statistiques d'accidents. En raison de la méthode de calcul manuelle intensive de la hauteur de capot, il n'a pas été possible d'effectuer le calcul pour tous les modèles de voiture figurant dans les données d'accidents.

Le calcul de la hauteur de capot, également appelée *bonnet lead edge height* ou BLEH, a été basé sur la définition de la hauteur de capot dans le règlement européen 631/2009 et sur la méthode de calcul décrite dans l'article de (Saadé et al., 2020). La description faite par (Saadé et al., 2020) est la suivante :

"Supposing that a print of the vehicle profile was available, a line was drawn tangent to the vehicle front-end and inclined by 50° from the vertical line. The intersection between this line and the vehicle front-end is called the bonnet leading edge reference line. The height of this reference line or its distance from the ground is called the BLEH."

Pour cette étude, nous avons utilisé la même stratégie de mesure que (Saadé et al., 2020). La Figure 7 est une représentation visuelle de la détermination de la hauteur de capot. La *bonnet leading edge reference line* étant parfois parallèle au capot, une hauteur minimale et une hauteur maximale de capot ont été déterminées pour chaque modèle. Pour les analyses, la moyenne de ces deux valeurs a été utilisée pour chaque version du modèle. Les croquis sur la base desquels la hauteur de capot a été calculée proviennent généralement de l'un des deux sites Internet suivants : <https://www.the-blueprints.com/> , <https://drawingdatabase.com/> .

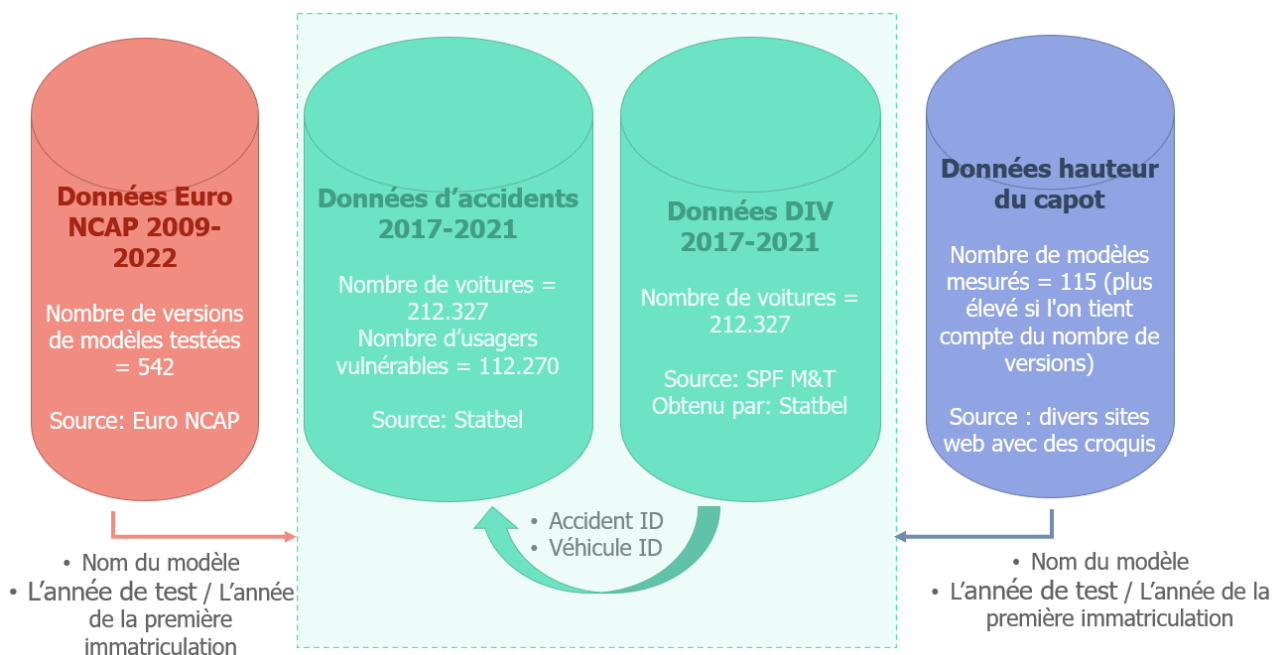
Figure 7 : Détermination de la hauteur de capot ou bonnet lead edge height (BLEH) (Figure issue de (Saadé et al., 2020) déjà déduite d'une Figure du Règlement européen n° 631/2009)



5.2 Annexe 2 : Couplage de bases de données

La Figure 8 offre un aperçu schématique des couplages entre les bases de données réalisés pour parvenir à l'ensemble de données sur base duquel les analyses ont été effectuées. Avant de coupler les bases de données, certaines variables de couplage ont dû être préalablement « nettoyées ». Les variables de couplage sont des variables communes à deux bases de données qui permettent de coupler les informations de deux bases de données entre elles. Un exemple est la variable « nom du modèle » qui apparaît dans les quatre bases de données de la Figure 8 et qui a dû être nettoyée dans certaines bases de données. Le nettoyage du « nom du modèle » comprenait la déduplication des noms de marque : par exemple, « Nissan Nissan Micra » est devenu « Nissan Micra » dans la base de données « données d'accidents ». Les modèles qui avaient plusieurs appellations dans la base de données « données d'accidents » ont été réduits à une seule dans la mesure du possible : par exemple, « VW Golf », « Volkswagen Golf » et « Volkswagen VW Golf » ont tous été convertis en « VW Golf ».

Figure 8 : Couplage de bases de données



Après le nettoyage, le couplage proprement dit a pu être effectué. Le premier couplage a été réalisé entre la base de données « données d'accidents » et la base de données « données DIV ». L'institut Vias a obtenu les deux bases de données par l'intermédiaire de Statbel. Les données DIV ou les données sur les véhicules n'ont été fournies par Statbel que pour les véhicules immatriculés en Belgique et qui ont été impliqués dans un accident de la circulation. L'institut Vias n'a donc pas accès aux données sur les véhicules pour l'ensemble du parc automobile en Belgique. Le couplage entre les deux bases de données est basé sur deux variables de couplage : un numéro d'identification unique pour le véhicule²² et un numéro d'identification unique pour l'accident. Ces variables de couplage communes ont été fournies par Statbel.

Le couplage suivant est celui entre les données couplées dans le paragraphe précédent et les données sur la hauteur de capot en fonction de la version d'un modèle de voiture. Ce lien est établi sur la base de plusieurs variables de couplage. L'une d'entre elles est la variable nettoyée nom du modèle. Cette variable ne suffit toutefois pas car différentes versions de modèles de voitures sont publiées au fil des ans et ces versions peuvent avoir des hauteurs de capot différentes. À des fins de couplage, l'année de sortie d'une version de modèle est donc également prise en compte dans les données relatives à la hauteur de capot, d'une part, et l'année au cours de laquelle un véhicule a été immatriculé pour la première fois dans l'administration belge (Direction pour l'Immatriculation des Véhicules ou DIV), d'autre part. Les informations sur la hauteur de capot de la version du modèle qui est la plus proche de l'année d'immatriculation de la voiture du modèle correspondant sont ajoutées aux données déjà couplées.

²² Ce numéro ne permet pas de vérifier si un même véhicule (portant un même numéro de châssis) a été impliqué à plusieurs reprises dans un accident. Un véhicule reçoit autant de numéros d'identification uniques qu'il est impliqué dans des accidents.

Il est ensuite renvoyé aux données Euro NCAP. Ces données Euro NCAP comprennent notamment les informations suivantes : une notation de sécurité globale (de 1 à 5 étoiles), un score pour les occupants adultes (en %), un score pour jeunes occupants (enfants) (en %) et un score pour les usagers vulnérables (en %). L'une des variables de couplage utilisées est à nouveau le nom du modèle. Bien que la variable « nom du modèle » soit nettoyée, différentes appellations de modèles de voitures existent toujours dans les données à coupler. C'est pourquoi un algorithme de couplage a été élaboré tenant compte, dans une certaine mesure, des différentes appellations. Par ailleurs, l'algorithme prend également en considération l'année de test dans les données Euro NCAP et l'année à laquelle un véhicule a été immatriculé pour la première fois dans l'administration belge.

L'algorithme de couplage donne lieu à deux types de correspondances (*matches*) :

- Correspondance exacte : c'est le cas lorsque le nom du modèle du véhicule dans les données déjà couplées correspond exactement au nom du modèle dans les données Euro NCAP.
- Correspondance approximative : dans ce cas, il n'y a pas de correspondance exacte ; via le « cosine similarity algorithm » la similarité entre les noms de modèle dans les différents ensembles de données est mesurée ; la similarité va de 0 % (aucune similarité) à 100 %.

À l'aide de l'algorithme, le nom du modèle de chaque véhicule dans les données couplées est comparé aux données Euro NCAP. Si les noms de modèle correspondent exactement, nous parlons de « correspondance exacte ». Une condition supplémentaire pour une correspondance exacte est que l'année de test dans les données Euro NCAP soit la plus proche de l'année d'immatriculation. Après tout, certains modèles de voiture sont testés plusieurs fois par Euro NCAP parce qu'il existe différentes versions du modèle. Cette condition supplémentaire est indispensable pour garantir que la version correcte du modèle de voiture dans les données Euro NCAP est associée à la version correcte dans les données déjà associées.

Lorsqu'il n'y a pas de correspondance exacte, le « cosine similarity algorithm » donne le degré de similarité sous la forme d'un pourcentage. Le « cosine similarity algorithm » mesure la similarité entre deux vecteurs d'un espace de produit interne. Il est mesuré par le cosinus de l'angle entre deux vecteurs et détermine si deux vecteurs sont orientés approximativement dans la même direction. Il est souvent utilisé pour mesurer la similarité des documents dans l'analyse de texte. Par conséquent, dans notre analyse lors de la correspondance approximative, chaque nom de modèle de voiture a été converti en un vecteur à l'aide du pack R CountVectorizer.²³ Les vecteurs générés ont ensuite été comparés à l'aide du « cosine similarity algorithm » pour générer une probabilité de correspondance²⁴. Pour qu'un couplage soit établi, l'algorithme de correspondance doit indiquer un taux de couplage d'au moins 70 % et les conditions relatives à l'année du test et à l'année d'immatriculation doivent être remplies.

²³ https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.feature_extraction.text.CountVectorizer.html

²⁴ <https://towardsdatascience.com/understanding-cosine-similarity-and-its-application-fd42f585296a>



institut Vias

Chaussée de Haecht 1405
1130 Bruxelles

+32 2 244 15 11

info@vias.be

www.vias.be