

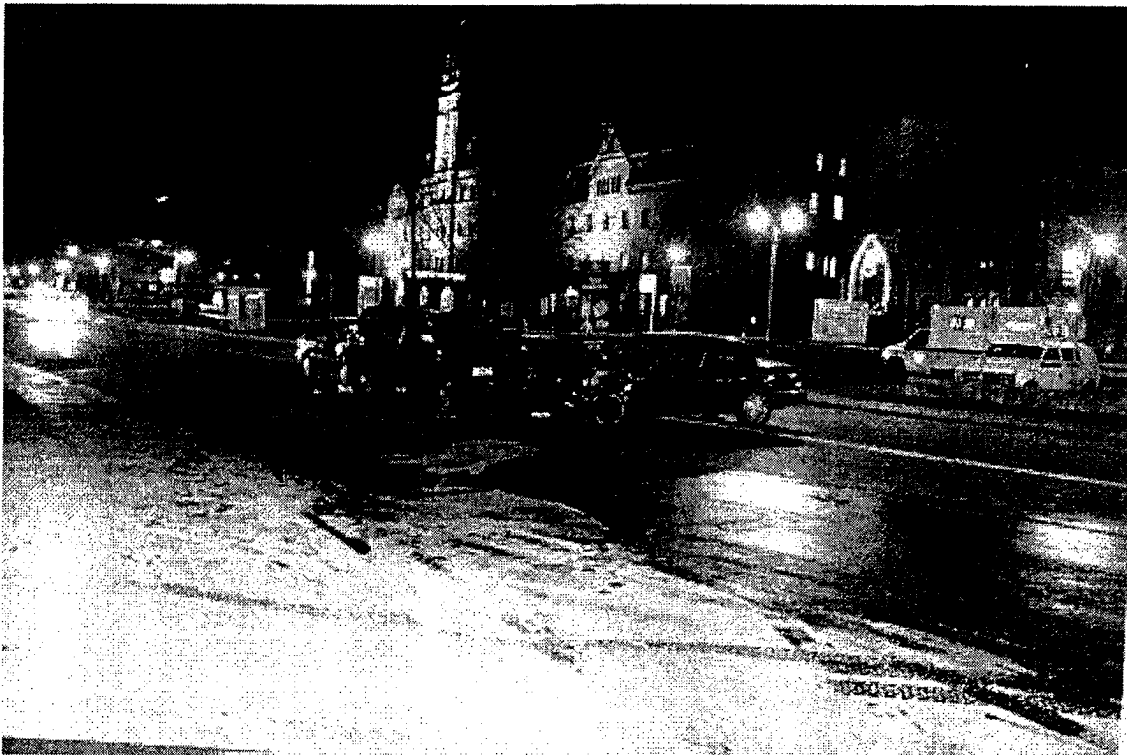
CTE - 20 M
C.P. - SECURITE
ROUTIERE AU QUEBEC

PROJET 00-SR-70842


ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL

*génie
sans frontières*

INCIDENCE DE LA VITESSE SUR
LE RISQUE D'ÊTRE IMPLIQUÉ DANS UNE
COLLISION GRAVE OU MORTELLE EN MILIEU URBAIN



Mars 2003

Projet subventionné par :

Société de l'assurance
automobile

Québec



ASSEMBLEE NATIONALE
REQU

6 MAY 21 15 50

RAPPORT FINAL

PROJET 00-SR-70842

**INCIDENCE DE LA VITESSE SUR
LE RISQUE D'ÊTRE IMPLIQUÉ DANS UNE
COLLISION GRAVE OU MORTELLE EN MILIEU URBAIN**

Préparé pour :

SOCIÉTÉ DE L'ASSURANCE AUTOMOBILE DU QUÉBEC
À l'attention de Mme Lyne Vézina

Préparé par :

Michel Gou, ing., M.Sc.A.
Bernard Clément, Ph.D.
Olivier Bellavigna-Ladoux, ing., M.Sc.

Projet subventionné par la
Société de l'assurance automobile du Québec

Mars 2003

Michel Gou, ing.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée grâce à une subvention de la Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ) par le truchement du Fonds pour la Formation de Chercheurs et l'Aide à la Recherche (Fonds FCAR).

L'équipe de recherche tient en particulier à remercier le Service de Police de la Ville de Montréal, section enquête collision, ainsi que le personnel de la Corporation d'Urgences Santé de Montréal Métropolitain pour leur grande et très appréciée collaboration lors de la collecte des données de collisions de la route.

RÉSUMÉ

Tous les intervenants s'accordent pour dire que la vitesse est l'une des principales causes des collisions de la route. C'est pour cette raison que les responsables de la sécurité routière déterminent des vitesses limites basées sur l'environnement routier, mais on peut toujours se demander si la vitesse choisie est adéquate. La présente étude vise à valider la vitesse limite légale de 50 km/h en milieu urbain et à quantifier le risque d'être impliqué dans une collision grave ou mortelle lorsque cette limite est dépassée.

L'étude s'est appuyée sur la reconstitution de collisions graves ou mortelles recueillies sur le territoire de la ville de Montréal. L'étude a porté sur 39 collisions survenues dans les zones où la limite légale est de 50 km/h durant les années 2001 et 2002. Les collisions traitées devaient obéir à un certain nombre de critères permettant d'éliminer les effets masquants de l'effet spécifique de la vitesse. La plupart de ces collisions étaient des impacts mortels et, dans les autres cas, l'état des victimes était critique. Afin de calculer le risque relatif d'être impliqué dans une collision grave ou mortelle, la vitesse libre de 4 véhicules témoins a été relevée. Les véhicules témoins sont des véhicules circulant dans les mêmes conditions météorologiques, au même endroit, dans la même direction et à la même heure que le véhicule cas impliqué dans la collision.

Des scénarios de réduction de vitesse à 50 km/h ont également été appliqués aux collisions pour lesquelles la vitesse calculée du véhicule cas dépassait la limite légale de 50 km/h. Ainsi, suite aux scénarios de réduction de vitesse, il nous a donc été possible de quantifier les effets de la réduction de vitesse sur la sévérité des blessures aux occupants ainsi que sur la réduction du nombre de collisions.

Les résultats de l'étude démontrent que si les conducteurs des véhicules cas avaient respecté la limite de 50 km/h, il y aurait eu une diminution de 44 % de l'ensemble des collisions, soit une diminution de 83 % des collisions frontales, de 33 % des collisions latérales et de 23 % des collisions avec piétons. Par ailleurs, les résultats indiquent que le risque relatif d'être impliqué dans une collision grave ou mortelle augmente très rapidement avec chaque tranche de 10 km/h de vitesse supérieure à la limite légale pour atteindre un facteur multiplicatif de 81 à des vitesses

de circulation de 80 km/h et plus. L'ensemble des données confirme donc la validité de la vitesse limite légale de 50 km/h en milieu urbain, qui apparaît comme étant la limite indiquée par un objectif général de réduction des blessures.

ABSTRACT

All stakeholders seem to agree that speed is one of the main causes of road collisions. Thus road safety experts determine speed limits based on road environment. The present study aims at validating the 50 kph legal speed limit in urban environment in Quebec, and to quantify the risk to be involved in a collision with fatal or serious injuries when this limit is exceeded.

In this study, reconstruction of collisions with fatal or serious injuries on Montreal urban roads was carried out. The study encompassed 39 collisions which occurred on roads with posted speed limit of 50 kph during the years 2001 and 2002. The selected collisions had to satisfy a number of criterion allowing to eliminate masking effect such as alcohol and illegal manoeuvre. The majority of cases were fatal collisions while the remaining cases involved life threatening injuries. In order to evaluate the relative risk of being involved in a collisions with fatal or serious injuries the travelling speed of 4 control vehicles was recorded. These vehicles were then travelling at free speed on the same road, under similar weather conditions, and at same time as the vehicle case.

Fifty kph speed reduction scenarios were applied to the collisions for which the case vehicle speed exceeded the legal limit. This made possible the determination of the effect of excessive speed on collisions with fatal or serious injuries.

Results of the study shows that if the drivers had followed the 50 kph limit, there would have been a reduction of 44% in the total number collisions with a reduction of 83% of frontal collisions, 33% of side collisions and 23% of collisions with pedestrians. The results also show that the relative risk of being involved in a collision with fatal or severe injuries is greatly increased at speeds exceeding the legal limit, with a multiplicative factor of 81 at travelling speeds above 80 km/h. Global data shows quite clearly that the legal limit speed of 50 kph in an urban environment constitutes a valid reference in terms of collision injury reduction and overall road safety.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ	IV
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX	VIII
LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XI
PROBLÈME DE LA VITESSE	1
CHAPITRE I - REVUE DE LA LITTÉRATURE	4
CHAPITRE II - MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE	16
2.1 Sélection des cas de collisions	16
2.2 Sélection des cas de véhicules contrôlés (cas témoins)	18
2.3 Incidence de la vitesse sur la gravité des blessures	19
2.3.1 Collisions frontales	26
2.3.2 Collisions latérales	35
2.3.3 Collisions avec piétons	37
2.3.4 Sélection des courbes delta V vs cote AIS des blessures	39
CHAPITRE III - RECONSTITUTION DES COLLISIONS	44
3.1 Données physiques	44
3.1.1 Traces de freinage et de dérapage	45
3.1.2 Positions initiales et finales	45
3.1.3 Déformations des véhicules	46
3.1.4 Caractéristiques des véhicules, emplacement et poids des occupants	46
3.2 Temps de réaction au freinage	47
3.3 Coefficient de frottement	50
3.4 Méthodes de calcul des vitesses	51
3.4.1 Lois de la cinématique	52
3.4.2 Conservation de la quantité de mouvement	53
3.4.3 Coefficient de restitution	54
3.4.4 Conservation de l'énergie	55
3.4.5 Détermination des coefficients de rigidité	61
3.4.6 Analyse des enregistreurs embarqués	62
3.4.7 Calcul de la vitesse initiale	63
3.5 Scénarios de réduction de la vitesse	65
CHAPITRE IV - ANALYSE DES RÉSULTATS	69
4.2 Taille et qualité de l'échantillonnage	69
4.2 Calcul du risque relatif	72
4.3 Effets de la réduction de la vitesse	76
4.4 Analyse et recommandations	80
RÉFÉRENCES	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 -	Bilan routier pour l'année 1999 (source SAAQ)	1
Tableau 1.2 -	Risque relatif d'être impliqué dans une collision en fonction de la vitesse (Kloeden et al., 1997).....	6
Tableau 1.3 -	Effet de la limitation de la vitesse sur les collisions (Kloeden et al., 1997)	7
Tableau 1.4 -	Taux de collisions et leurs conséquences (Solomon, 1964)	10
Tableau 2.1 -	Données des collisions de la NASS entre 1982 et 1991, occupants non attachés (Evans, 1996)	24
Tableau 2.2 -	Données des collisions de la NASS entre 1982 et 1991, occupants attachés (Evans, 1996)	25
Tableau 3.1 -	Temps de réaction au freinage (Wortman et Matthias, 1983).....	48
Tableau 3.2 -	Temps de réaction au freinage (Trigers et Harris, 1982)	49
Tableau 3.3 -	Coefficients de frottement des chaussées (Trafic Accident Reconstruction)	51
Tableau 3.4 -	Résultats des tests d'impact des véhicules à 35 mph sur une barrière rigide (McHenry, Accident Reconstitution).....	57
Tableau 4.1 -	Collisions étudiées.....	71
Tableau 4.2 -	Nombre de cas de collisions et cas témoins par intervalle de vitesse	73
Tableau 4.3 -	Risque relatif en fonction de la vitesse	75
Tableau 4.4 -	Effet de la réduction de la vitesse à 50 km/h	78
Tableau 4.5 -	Comparaison avant et après réduction de vitesse	79
Tableau 4.6 -	Taux de réduction des collisions après réduction de vitesse par type de collisions	79
Tableau 4.7 -	Pourcentage de collisions où les blessures ont été fortement diminuées, par type de collisions.....	80

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 -	Risque relatif d'être impliqué dans une collision en fonction de la vitesse (Kloeden et al., 1997).....	6
Figure 1.2 -	Vitesses des cas de collisions (en noir) et vitesses des véhicules contrôlés (en hachuré) (Moore et al., 1995).....	9
Figure 1.3 -	Taux de collisions vs vitesse de circulation, jour et nuit (Solomon, 1964).....	10
Figure 2.1 -	Cinématique d'un impact frontal : premier et second impacts (Ian V. Lau et al., 1991)....	20
Figure 2.2 -	Modèle statistique de la probabilité de blessures en fonction de la sévérité de la collision (Leonard Evans, 1985)	21
Figure 2.3 -	Relation entre la vitesse et la probabilité de décès (Joksh, 1983)	22
Figure 2.4 -	Relation entre la vitesse et la probabilité de décès (Joksh, 1992)	23
Figure 2.5 -	Risque de subir des blessures graves ou mortelles en fonction du delta V (Evans, 1996)	25
Figure 2.6 -	Probabilité de blessures en fonction du delta V relatif (Krafft, 2000).....	26
Figures 2.7 et 2.8 -	Comparaison des résultats du NASS et du NCSS sur la probabilité de subir une blessure de cote AIS de 2+ et 3+ ou une blessure mortelle en fonction du delta V (Roberts, 1993).....	27
Figures 2.9 et 2.10 -	Probabilité de subir une blessure à la tête de cote AIS de 2+ et 3+ en fonction du delta V (Roberts, 1993)	28
Figures 2.11 et 2.12 -	Probabilité de subir une blessure au visage de cote AIS de 2+ et 3+ en fonction du delta V (Roberts, 1993)	28
Figures 2.13 et 2.14 -	Probabilité de subir une blessure cervicale et aux côtes de cote AIS de 2+ et 3+ en fonction du delta V (Roberts, 1993).....	29
Figures 2.15 et 2.16 -	Probabilité de subir une blessure au thorax de cote AIS de 2+ et 3+ en fonction du delta V (Roberts, 1993)	29
Figures 2.17 et 2.18 -	Probabilité de subir une blessure au foie et au fémur de cote AIS de 2+ et 3+ en fonction du delta V (Roberts, 1993)	29
Figures 2.19 et 2.20 -	Probabilité de subir une blessure de cote AIS de 2+ et 3+ selon l'âge et le sexe en fonction du delta V (Roberts, 1993)	30
Figure 2.21 -	Diagramme d'équivalence entre les collisions simulées et les collisions réelles (Langdwieder, 1979).....	31
Figure 2.22 -	Modèle mathématique appliqué à la simulation des collisions (Langdwieder, 1979).....	31
Figure 2.23 -	Degré de gravité des blessures en fonction du delta V (occupants attachés) (Langdwieder, 1979).....	32
Figure 2.24 -	Probabilité pour une cote AIS 3+ de blessure en fonction du delta V pour un occupant non attaché (Winnicki et al., 1998).....	33
Figure 2.24a -	Probabilité pour une cote AIS 4+ de blessure en fonction du delta V pour un occupant non attaché (Winnicki et al., 1998).....	33
Figure 2.24b -	Probabilité pour une cote AIS 5+ de blessure en fonction du delta V pour un occupant non attaché (Winnicki et al., 1998).....	34
Figure 2.25 -	Collision latérale : delta V vs AIS (Rouhana et al., 1985).....	36
Figure 2.26 -	Cote MAIS en fonction du delta V (Miltner et al., 1991).....	37
Figures 2.27 et 2.28 -	Collision véhicule/piéton : niveau de tolérance critique des blessures en fonction de la vitesse d'impact (Schneider et al., 1973).....	37
Figure 2.29 -	Collision véhicule/piéton : gravité de la blessure en fonction de la vitesse d'impact (Niederer et al., 1983)	38
Figure 2.30 -	Collision véhicule/piéton : probabilité de blessures à la tête en fonction de la vitesse d'impact (Pritz, 1983).....	39

Figure 3.1 -	Relevé des déformations sur les véhicules (impact latéral et frontal).....	46
Figure 3.2 -	Temps de réaction au freinage (Olson et al., 1984).....	49
Figure 3.3 -	Déformation résiduelle en fonction du delta V (McHenry, Accident Reconstitution)	58
Figure 3.4 -	Déformation des véhicules en fonction de la force d'impact (McHenry, Accident Reconstitution)	58
Figure 3.5 -	Courbe des déformations résiduelles en fonction de la force d'impact (McHenry, Accident Reconstitution)	59
Figure 3.6 -	Flambement d'une poutre, courbe force vs déformation (R.K. NOON)	60
Figure 3.7 -	Comparaison des longueurs de distance de freinage entre un véhicule roulant à 70 km/h et un véhicule roulant à 50 km/h (au moment de la décision de freinage, l'obstacle se situe à 39 m du véhicule)	66
Figure 3.8 -	Coefficient de restitution en fonction de la vitesse d'impact (McHenry, Accident Reconstitution)	68
Figure 4.1 -	Comparaison par tranche de vitesse du nombre de cas de collisions et du nombre de cas témoins	74
Figure 4.2 -	Vitesse des véhicules en fonction du risque relatif d'être impliqué dans une collision grave ou mortelle	76

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AIS	Abbreviated Injury Scale
g	accélération gravitationnelle
a	accélération du véhicule
ΔV	changement de vitesse
ΔV	changement de vitesse
V	vitesse
f, μ	coefficient de frottement
R	distance de projection du piéton
S	distance de glissement du piéton
S, D	distance parcourue par le véhicule
M, m	masse du véhicule
I	impulsion
t	temps
e	coefficient de restitution
E	énergie cinétique et potentielle des véhicules
U	travail irréversible fourni durant la collision
F	force de résistance à la déformation
A	rigidité élastique du véhicule
B	rigidité du véhicule
C	déformations du véhicule
F_{cr}	force d'Euler de flambage
K	coefficient de rigidité
E	module d'élasticité
I	moment d'inertie
L	longueur de la pièce
b_0, b_1	coefficients de déformation

PROBLÈME DE LA VITESSE

Les accidents de la route représentent l'une des principales causes de mortalité au Québec. D'après le bilan routier de 1999 établi par la Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ) et dont le détail est donné au tableau 1.1, on a enregistré, sur les routes du Québec, 673 morts et 34 029 blessés dont 4087 blessés graves. Pour la seule ville de Montréal, on relève, pour cette période, 70 morts et 733 blessés graves.

Tableau 1.1 - Bilan routier pour l'année 1999 (source SAAQ)

Sévérité de la collision	Nombre			Variation (%)	
	Moyenne 5 ans 94/99	1998	1999	1999/98	1999/moy. 1994-1998
Mortelle	697	625	673	7,7	-3,4
Blessures graves	4 487	4 442	4 087	-8,0	-8,9
Blessures légères	29 120	28 262	29 942	5,9	2,8
Total	34 304	33 329	34 702	4,1	1,2

En outre, le bilan établi par la SAAQ révèle que la vitesse excessive serait la cause de 19 % des collisions graves et de 23 % des décès au Québec. Ces chiffres sont similaires à ceux obtenus aux États-Unis où la vitesse excessive serait la cause de 12 % de toutes les collisions et d'environ du tiers des collisions graves (Bowie et Walz, 1991) [1]. Par ailleurs, les coûts indirects dus à des collisions ayant pour cause la vitesse sont évalués par la SAAQ à 60 millions de dollars pour la province de Québec seulement. En Australie, la vitesse excessive serait responsable d'approximativement 20 % des collisions graves (Harworth et Rechnitzerj, 1993) [2].

Au cours des 30 dernières années, plusieurs études ont démontré l'incidence de la vitesse sur les collisions, ce qui a donné lieu aux directives de limitation de vitesse émises par la plupart des juridictions, notamment dans les zones urbaines. Cependant, cette limitation de la vitesse ne rapporte pas nécessairement les dividendes escomptés puisqu'elle n'est pas toujours respectée.

Au Québec, en dépit des efforts déployés pour réduire le nombre de victimes de la route et malgré la baisse régulière du taux de décès causés par les collisions routières durant les dernières années, la possibilité d'atteindre l'objectif fixé par le gouvernement de réduire de 25 % le bilan routier reste incertaine. L'une des principales causes de cette incertitude pourrait être le non-respect, par les conducteurs, des mesures restrictives qui ont été prises pour prévenir les collisions et, entre autres, des réglementations sur la limitation de vitesse. Les chiffres sont là pour le confirmer puisque d'après les données de la SAAQ, 70 % des conducteurs ne respectent pas la vitesse limite affichée. Pour sa part, le Ministère des transports du Québec indique que 77 % des conducteurs des véhicules de tourisme excèdent la vitesse limite en ville, 64 % l'excèdent sur les routes principales et 75 % sur les autoroutes. D'ailleurs, il n'est pas rare de voir la vitesse moyenne de circulation excéder de 10 km/h la limite légale en milieu urbain et même de 20 km/h sur les boulevards urbains.

Par ailleurs, on observe que les autorités n'appliquent pas toujours des moyens efficaces pour faire respecter la vitesse limite prescrite, soit par manque d'effectifs, mais également parce qu'on ne croit pas toujours en la validité de cette limitation, particulièrement en milieu urbain. La question se pose donc : la vitesse limite légale choisie en milieu urbain est-elle valide ? En l'absence de preuves démontrant clairement qu'au-delà de la vitesse limite fixée le risque de collisions augmente considérablement, les décisions prises pour faire respecter cette mesure risquent de rester sans conséquences. En effet, la majorité des conducteurs préfèrent établir leur vitesse en fonction de la perception de leur sécurité et de leur perception de la probabilité de se voir infliger une amende plutôt que de suivre la vitesse légale. Ainsi, les usagers de la route semblent avoir besoin d'être convaincus de la légitimité de la vitesse maximale autorisée avant qu'il ne soit possible de mettre en application, de façon efficace, une mesure perçue comme diminuant leur mobilité.

Pour tenter de pallier à ce problème, la présente étude réalisée grâce à une subvention de la Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ) se concentre sur l'implication de la vitesse dans les collisions mortelles ou graves en zone urbaine sur le territoire de la ville de Montréal. Les résultats permettront de vérifier la validité de la vitesse limite actuelle de 50 km/h en milieu

urbain au Québec et de quantifier le risque d'être impliqué dans une collision grave ou mortelle lorsque cette limite est dépassée.

Afin de faire ressortir l'effet de la vitesse excessive dans les collisions, en excluant les autres effets dits effets masquants, la méthodologie retenue pour ce projet est une étude rigoureuse de cas réels de collisions et de cas témoins. La vitesse préimpact du véhicule cas impliqué dans l'accident sera déterminée suite à une reconstitution mathématique de la collision. La comparaison de la vitesse d'un véhicule impliqué dans un accident grave ou mortel avec la vitesse de véhicules témoins non impliqués dans des collisions, mais circulant au même endroit, dans des conditions similaires, permettra ensuite d'établir le risque relatif d'être impliqué dans une collision grave ou mortelle. Finalement, les calculs et analyses des conséquences d'une circulation à la vitesse légale permettront d'établir la possibilité de réduction de blessures dans le cas où le véhicule cas aurait circulé à 50 km/h.

CHAPITRE I - REVUE DE LA LITTÉRATURE

L'implication de la vitesse dans les collisions de la route a fait l'objet de plusieurs études, dont l'objectif était de quantifier la relation vitesse *vs* le risque d'être impliqué dans une collision. La principale constatation qui ressort de ces études est que la relation entre la vitesse et le risque d'être impliqué dans une collision est positive et qu'elle est également non linéaire. Prenons comme exemple Joksh [3] qui a constaté que le risque d'être impliqué dans une collision est 2,5 fois plus grand à 60 km/h qu'à 40 km/h, 6 fois plus grand à 70 km/h et presque 20 fois plus grand à 80 km/h. Le même constat a été établi par Kloeden, Mclean, Moore et Ponte [4]. Dans cette étude réalisée à Adélaïde en Australie, les auteurs ont observé que le risque d'être impliqué dans une collision grave ou mortelle est 2 fois plus grand à 65 km/h par rapport à 60 km/h, qu'il est 4 fois plus grand à 70 km/h et enfin qu'il est 10 fois plus grand à 75 km/h.

Essentiellement, trois approches ont été utilisées pour déterminer cette relation. La première consiste à établir, suite à l'examen de son comportement au volant, le rapport entre la vitesse habituelle d'un conducteur impliqué dans une collision et sa vitesse au moment de cette collision, cette dernière vitesse était obtenue suite à une entrevue. Cette approche peut avoir tendance à sous-estimer les vitesses des collisions puisque, tout au moins pour les vitesses très élevées, il y a une grande probabilité que le conducteur soit mort ou encore ne se souvienne pas des détails de l'accident.

Une deuxième approche étudie le nombre et les caractéristiques des collisions avant et après un changement de la limitation de la vitesse. Ces études, qui se concentrent sur l'impact d'un changement de vitesse sur les collisions, fournissent des éléments qui nous permettent de croire que la relation entre la vitesse et les collisions est positive. Citons par exemple l'étude réalisée par Walz et *al.* (1983) [5] et qui montre que la réduction de la vitesse limite de 60 à 50 km/h dans la ville de Zurich en Suisse a amené une diminution de 20 % de toutes les collisions de la route et de 25 % des collisions mortelles. Cependant, les résultats de ce type d'études ne peuvent vraiment être généralisés pour divers cas de changement de vitesse. Par exemple, la variation du taux de collisions liées au changement d'une vitesse de 70 km/h à 60 km/h ne peut être appliquée à chaque incrément de 10 km/h étant donné la non-linéarité de la relation reliant la vitesse et le

risque d'être impliqué dans une collision. De plus, cette méthode ne permet pas de séparer l'effet de la vitesse des autres effets masquants.

Une troisième approche consiste à déterminer la vitesse préimpact et à la comparer avec la vitesse des véhicules témoins, sélectionnés dans les mêmes conditions, en circulation libre. Cette approche permet alors de quantifier le risque relatif d'être impliqué dans une collision. Elle permet aussi d'établir la relation entre la vitesse et le risque d'être impliqué dans une collision, tout en éliminant les effets masquants.

L'étude la plus intéressante utilisant cette dernière approche est celle qui a été réalisée à l'Université d'Adélaïde par Kloeden et *al.* (1997). Cette étude visait à déterminer la relation entre la vitesse et le risque d'être impliqué dans une collision grave ou mortelle et de justifier la vitesse limite urbaine de 60 km/h en vigueur en Australie. Notons que cette limite de vitesse en zone urbaine est supérieure à la limite de 50 km/h habituellement utilisée au Québec et presque partout ailleurs dans le monde. Ainsi, pour chacune des collisions étudiées, la vitesse préimpact a été déterminée et on y a associé, pour fins de comparaison, des relevés de vitesses d'autres véhicules passant au même endroit, le même jour de la semaine à la même heure. Un outil informatique a été utilisé pour la reconstitution des collisions de même que pour la simulation de l'effet des changements de vitesses sur le risque de collision.

D'après cette étude, la relation entre la vitesse et le risque relatif d'être impliqué dans une collision serait une courbe exponentielle ($R^2 = 0.993$ pour des vitesses supérieures à 60 km/h). Les résultats de cette étude sont présentés au tableau 1.2 et à la figure 1.1. Ainsi, on constate qu'à partir de 60 km/h et pour chaque intervalle de 5 km/h, le risque d'être impliqué dans une collision augmente rapidement. Par ailleurs, il semble que le risque relatif d'être impliqué dans une collision ne varie que très peu pour des vitesses inférieures à 60 km/h.

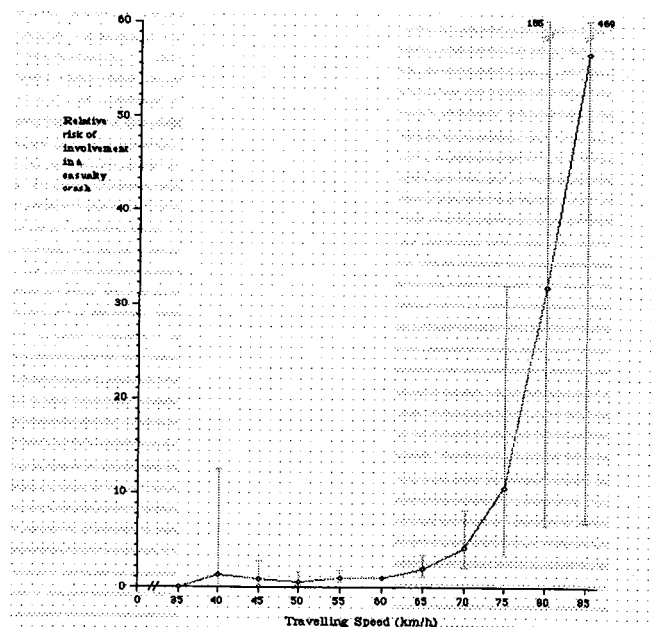


Figure 1.1 - Risque relatif d'être impliqué dans une collision en fonction de la vitesse (Kloeden et al., 1997)

Tableau 1.2 - Risque relatif d'être impliqué dans une collision en fonction de la vitesse (Kloeden et al., 1997)

Nominal Speed	Speed Range	No. of Cases	No. of Controls	Relative Risk	Lower Limit	Upper Limit
35	33-37	0	4	0	-	-
40	38-42	1	5	1.41	0.16	12.53
45	43-47	4	30	0.94	0.31	2.87
50	48-52	5	57	0.62	0.23	1.67
55	53-57	19	133	1.01	0.54	1.87
60	58-62	29	205	1.00	1.00	1.00
65	63-67	36	127	2.00	1.17	3.43
70	68-72	20	34	4.16	2.12	8.17
75	73-77	9	6	10.60	3.52	31.98
80	78-82	9	2	31.81	6.55	154.56
85	83-87	8	1	56.55	6.82	468.77
-	88+	11	0	infini	-	-
Total		151	604			

L'analyse du tableau 1.2 permet de constater que les véhicules impliqués dans des collisions roulaient généralement au-dessus de la vitesse limite : 68 % des véhicules impliqués dans une collision mortelle, comparées à 42 % des véhicules non impliqués dans une collision (véhicules témoins). La différence devient plus grande pour les grandes vitesses, ainsi 14 % des véhicules impliqués dans des collisions graves excédaient les 80 km/h dans une zone de 60 km/h contre seulement 1 % des véhicules non impliqués.

L'effet de la limitation de vitesse est illustré au tableau 1.3, les résultats indiquant que si la limitation de vitesse était respectée, les collisions graves ou mortelles diminueraient de 46 %. Par contre, une évaluation plus conservatrice qui tiendrait compte des distances d'arrêt et de la vitesse d'impact indique que le nombre de collisions graves ou mortelles diminuerait de 29 % si la limite de vitesse était respectée.

Tableau 1.3 - Effet de la limitation de la vitesse sur les collisions (Kloeden et al., 1997)

Nominal Speed	Speed Range	No. of Cases	Relative Risk	Expected Cases*	% Reduction in Crashes
35	33-37	0	0	0	0
40	38-42	1	1.41	1	0
45	43-47	4	0.94	4	0
50	48-52	5	0.62	5	0
55	53-57	19	1.01	19	0
60	58-62	29	1.00	29	0
65	63-67	36	2.00	18.0	50.0
70	68-72	20	4.16	4.8	76.0
75	73-77	9	10.60	0.8	90.6
80	78-82	9	31.81	0.3	96.9
85	83-87	8	56.55	0.1	98.2
-	88+	11	infini	0.0	100.0
Total		151		82.0	45.6

De plus, en utilisant le modèle de calcul selon la vitesse d'impact et la distance d'arrêt, l'étude fait ressortir qu'une réduction de la vitesse à 50 km/h, par rapport à la vitesse légale de 60 km/h, entraînerait une réduction de 33 % des collisions liées à la vitesse.

La relation entre la vitesse et l'alcool y a également été étudiée et les résultats ont fait apparaître que le risque relatif d'avoir une collision liée à la vitesse est tout aussi important, dans des proportions fixes, que celui d'un conducteur présentant un taux d'alcoolémie élevé. Notons que le taux d'alcoolémie considéré comme illégal dans cette étude était de 0.05 g/100 ml. Ceci nous permet donc de confirmer que dans le cas des conducteurs possédant un taux d'alcoolémie élevé, la prise de risque est augmentée et ainsi ces cas particuliers ne peuvent être considérés dans une étude portant sur les risques liés à la vitesse uniquement.

Les recommandations suivantes ont également été émises :

- la tolérance à l'application de la limitation de vitesse par les policiers doit être réduite ou même abolie;
- les mesures pour faire respecter la limitation de vitesse doivent être multipliées et mises en œuvre de manière plus rigoureuse;
- une campagne de sensibilisation de l'opinion publique sur les dangers de la vitesse devrait être mise en place et des débats publics sur la question doivent être organisés;
- la vitesse légale de 60 km/h devrait être strictement appliquée sur toutes les rues; après une certaine période, il faudra réduire la vitesse à 50 km/h.

Toujours en milieu urbain à Adélaïde, une étude antérieure à celle de Kloeden *et al.* a été réalisée par Moore *et al.* (1995) [6]. Dans cette étude, moins exhaustive, la vitesse de 45 véhicules impliqués dans des collisions a été comparée avec les vitesses enregistrées sur des véhicules témoins passant au même endroit, le même jour de la semaine à la même heure, dans des conditions environnementales similaires. La vitesse des véhicules impliqués dans les collisions a été déterminée en utilisant des méthodes traditionnelles de reconstitution des accidents de la route. Les résultats ont fait ressortir que le risque d'être impliqué dans une collision augmente rapidement pour des vitesses dépassant 75 km/h (voir figure 1.2).

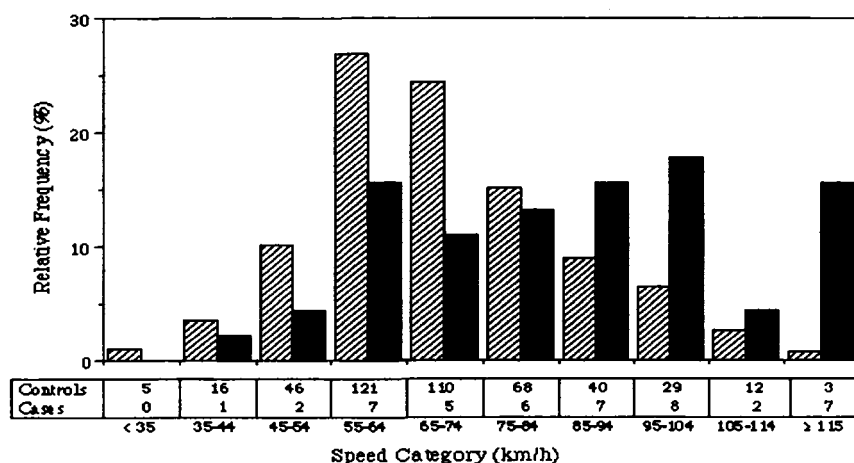


Figure 1.2 - Vitesses des cas de collisions (en noir) et vitesses des véhicules contrôlés (en hachuré) (Moore et al., 1995)

Une autre étude (Anderson et *al.*) [7] de même type a été effectuée, également à Adélaïde, mais cette fois-ci pour évaluer l'impact de la vitesse dans des collisions graves ou mortelles pour les piétons. L'étude a montré qu'une réduction de 10 km/h de la vitesse limite de 60 km/h permettrait de réduire de 48 % les collisions mortelles avec des piétons.

En utilisant une procédure différente, d'autres études ont été réalisées sur le sujet, notamment aux États-Unis où, au cours des trente dernières années, au moins trois études traitant de la relation entre la vitesse et le risque d'être impliqué dans une collision ont été réalisées.

La plus connue de ces études est celle de Solomon (1964) [8]. Cette étude a débuté vers la fin des années 50 et visait à déterminer la relation liant différents paramètres de la conduite incluant la vitesse avec le risque d'être impliqué dans une collision de la route. Pour effectuer son analyse, Solomon a comparé les vitesses calculées se rapportant à près de 10 000 cas de collisions avec les vitesses enregistrées pour un total de 290 000 cas témoins de véhicules non impliqués dans une collision. Pour recueillir les données, il a utilisé 35 tronçons de route dans 11 états, les trois quarts étant des tronçons d'autoroutes, de longueur moyenne de 17 milles. La vitesse limite était de 50 à 70 milles/h sur 28 de ces tronçons, de 40 milles/h sur deux autres tronçons, alors qu'aucune limite n'était fixée pour les tronçons restants.

Solomon a conclu que la relation entre la vitesse et le risque d'être impliqué dans une collision est une fonction en forme de U. Le taux le plus élevé d'être impliqué dans une collision est atteint pour une vitesse de 22 milles/h (43 238 cas pour 100 millions de véhicules par mille). Le taux le plus faible est atteint pour une vitesse de 60 milles/h, mais il augmente à nouveau pour les vitesses supérieures à 73 milles/h (voir tableau 1.4 et figure 1.3).

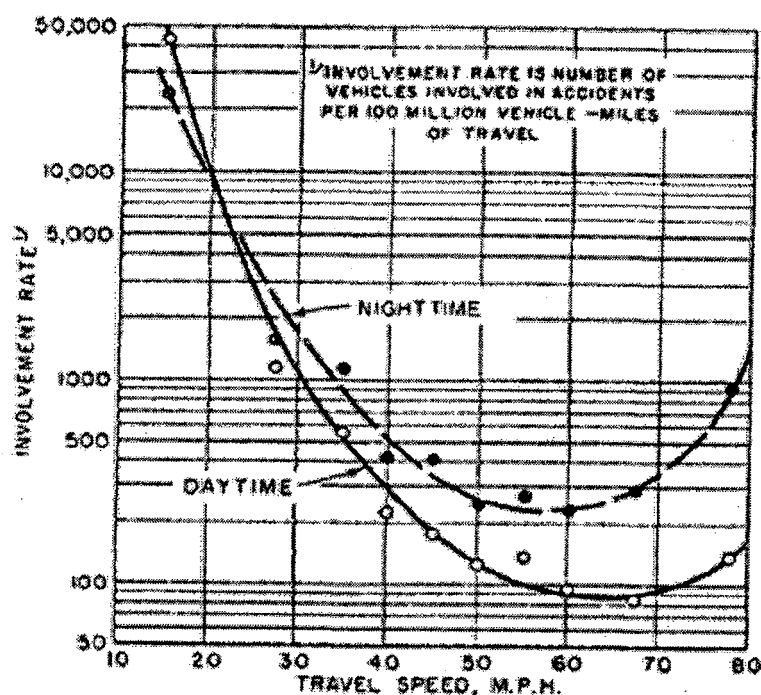


Figure 1.3 - Taux de collisions vs vitesse de circulation, jour et nuit (Solomon, 1964)

Tableau 1.4 - Taux de collisions et leurs conséquences (Solomon, 1964)

Speed Category (mph)	Involvements per 100 mvm*	Persons Injured per 100 mvm*	Persons Killed per 100 mvm*
≤ 22	38,873	9,343	446
23 - 32	1,274	356	12
33 - 42	362	110	5
43 - 52	188	62	5
53 - 62	143	70	4
63 - 72	121	93	2
≥ 73	289	313	118

* mvm : millions de véhicules mille

Par une étude similaire, Cirillo (1968) [9] a confirmé le résultat obtenu par Solomon. Pour sa part, il s'est intéressé aux autoroutes et aux routes de campagne et il a utilisé les données relevées sur vingt-deux sections d'autoroutes départementales pour établir une banque de données.

L'information recueillie comportait les vitesses moyennes de circulation pour chaque section étudiée, ainsi que les vitesses des collisions étudiées. Les résultats de cette étude ont indiqué que le risque de collisions était plus grand pour les véhicules qui roulaient à 32 milles/h en dessous de la vitesse moyenne, ce ratio atteignant un minimum à environ 12 milles/h en dessous de la vitesse moyenne.

La relation entre le risque de collisions et le trafic a également été examinée sur les échangeurs et les résultats ont montré que le risque de collisions augmente sur les échangeurs, surtout en zone urbaine. Ceci confirme que le risque de collisions diminue lorsque les véhicules circulent à la vitesse moyenne du trafic.

Une troisième étude utilisant la méthode de Solomon a été publiée par le Research Triangle Institute (1970) [10]. La banque de données utilisées provenait alors de l'étude de tronçons de routes et d'autoroutes du comté de Monroe en Indiana, couvrant un total de 70 milles et sur lesquels la vitesse limite ou/et moyenne était de 40 milles/h. L'étude s'est concentrée sur la détermination de la vitesse préimpact en ayant pour base le rapport de collisions rempli par les policiers et incluait l'utilisation de moyens informatiques pour la reconstitution des collisions. Cette étude a conclu que la relation entre la vitesse et le risque de collisions est une fonction en U, confirmant ainsi le résultat de Solomon. Toutefois, l'étude identifie un risque de collisions lié aux vitesses lentes moins important que celui obtenu par Solomon.

Une autre étude, celle de Garber et *al.* (1988) [11], concluait que la relation entre la vitesse et le risque d'être impliqué dans une collision est négative. D'après ces derniers auteurs, les facteurs géométriques, en l'occurrence la vitesse de conception et les caractéristiques géométriques de la route, sont les paramètres déterminants pour prévenir les collisions.

Les résultats de cette étude vont à l'encontre des conclusions des autres études réalisées jusqu'à aujourd'hui. Toutefois, elle relève le fait que la relation entre la vitesse et le risque de collisions peut être cachée par d'autres paramètres : ce qu'on appelle des effets masquants.

D'autres voies ont été explorées pour déterminer la relation entre la vitesse et le risque d'être impliqué dans une collision grave ou mortelle. À titre d'exemple, une étude réalisée en Angleterre par Quimby et *al.* (1999)[12] du Transport Research Laboratory (TRL) s'est intéressée aux facteurs influençant le choix d'une vitesse par le conducteur. En bref, cette étude a essayé de trouver la relation entre la vitesse choisie par différentes catégories de conducteur selon l'âge, le sexe, etc. et le risque d'être impliqué dans une collision. Des enregistrements de vitesse ont été effectués afin de bâtir une banque de données. De plus, 9452 questionnaires ont été envoyés à des conducteurs et de ce nombre 4526 ont été remplis. Les questions étaient d'ordre psychologique telles que : le type de décision à prendre en cas de situation soudaine, le style de conduite, l'intolérance face aux autres usagers de la route, le stress au volant, les sensations liées à la vitesse, etc. Les résultats ont également été séparés selon le sexe du conducteur. La relation entre la vitesse et les collisions identifiées par cette étude suggère qu'une variation de seulement 1% du choix de la vitesse par le conducteur peut entraîner un changement de 7,75 % du nombre des collisions (tant négatif que positif).

La conclusion de cette étude apporte donc une certaine crédibilité à la relation positive entre la vitesse et le risque d'être impliqué dans une collision, bien qu'elle n'apporte rien de vraiment nouveau quant à la quantification de cette relation. Toutefois, cette étude est intéressante du point de vue du comportement au volant des usagers de la route. Ce sujet en lui-même constitue un domaine de recherche important qui est susceptible de nous éclairer sur la relation entre ces comportements du conducteur et leurs influences sur les collisions.

Toujours au TRL, Baruya et *al.* (1999)[13] ont analysé l'effet de la vitesse sur les collisions en utilisant les bases de données européennes. Selon son étude, la forme que prend la relation entre la fréquence d'être impliqué dans une collision et la vitesse est une fonction de forme logarithmique $(\Delta \ln(AF) = (1.573/V - 0.02146)\Delta V$, dans laquelle AF est la fréquence de collision,

V est la vitesse moyenne et ΔV est l'écart positif ou négatif du véhicule par rapport à la vitesse moyenne).

En faisant abstraction des différences entre les bases de données des divers pays européens, l'étude conclut que de façon générale, la vitesse moyenne est grandement influencée par les différents paramètres de l'environnement routier à savoir le flux de circulation, la géométrie ainsi que la vitesse maximale autorisée. On note que le modèle proposé de la relation entre la vitesse limite et les collisions n'est pas vraiment adéquat du fait que l'effet de la vitesse n'a pu être séparé des autres effets masquants.

En somme, toutes les études qui ont été réalisées pour maîtriser le problème de la sécurité routière lié à la vitesse se rejoignent au niveau de la constatation que la relation entre la vitesse et les collisions est positive tout en étant non linéaire. Le point de discordance principal est essentiellement lié à la forme que prend cette relation. Pour les études réalisées aux États-Unis, la relation serait en forme de U, ce qui fait ressortir que le risque d'être impliqué dans une collision est plus bas à proximité de la vitesse moyenne. L'étude de l'Université d'Adélaïde en Australie montre pour sa part que le risque de collisions graves ou mortelles prend la forme d'une fonction exponentielle dans le cas de dépassement de la vitesse limite. Cette différence s'explique par le fait que les études de type « Cross-Studies » tiennent compte, lors de l'analyse, de tous les types de collisions, sans séparation de l'influence des divers effets masquants.

Pour confirmer notre thèse de l'influence des effets masquants, on peut ajouter comme preuve la conclusion de l'étude de Baruya (1999) qui fait ressortir que la seule analyse des banques de données ne permet pas de conclure sur l'effet de la vitesse. Pour ce faire, il faudrait aussi confronter les données à l'expérience et aux mesures sur le terrain. De plus, l'étude conclut que le modèle d'un pays ne peut pas être directement appliqué à un autre pays.

À la lumière de ces études, il ressort donc que les effets masquants sont à l'origine de la complexité de toute analyse abordant le thème de la relation entre la vitesse et le risque d'être impliqué dans une collision. Les études réalisées par Solomon, Cirillo, RTI et autres ont essayé de contourner cette difficulté, mais ils n'ont pas vraiment réussi du fait de leur méthode d'analyse

des données en bloc sans tentative de séparation des divers effets contributifs tels que la vitesse et l'alcool. Prenons par exemple l'étude de Solomon, où on remarque qu'on a tenu compte de toutes les collisions y compris de celles qui ont pour cause la congestion du trafic urbain (véhicules non en circulation libre). Un biais est ainsi introduit dans la relation établie entre la vitesse et le risque d'être impliqué dans une collision. L'étude de Solomon n'est pourtant pas sans utilité. Au travers des résultats qu'il obtient, on constate que si les conducteurs circulaient à une vitesse avoisinant la vitesse moyenne de 60 km/h, la probabilité d'être impliqué dans une collision diminuerait.

La méthodologie adoptée par Kloeden et al. (1997) dans l'étude intitulée *Travelling Speed and the Risk of Crash Involvement* a permis de contourner la difficulté des effets masquants. Ceci rend cette étude plus intéressante en matière de relation vitesse vs collisions. Cependant, la question qui se pose est la suivante : les résultats de cette étude peuvent-ils être transposés à la situation nord-américaine et plus spécifiquement au Québec ? La réponse est négative. En effet, dans la région de Montréal, l'environnement routier en général ainsi que plusieurs paramètres définis comme effets masquants ne sont pas identiques ou équivalents à ceux d'Adélaïde. L'environnement routier est propre à chaque ville. Il est caractérisé par la géométrie et l'état des routes, le flux de circulation, les aménagements urbains, le code de la route, l'état qualitatif et quantitatif du parc des véhicules, sans oublier l'éthique des usagers de la route. L'étude australienne ne peut donc être transposée directement d'un endroit à un autre sauf dans les cas où les conditions régulatrices sont les mêmes ou encore très sensiblement équivalentes, ce qui n'est pas a priori le cas entre Montréal et Adélaïde.

D'autre part, la méthodologie adoptée par l'étude australienne pour évaluer l'effet de la réduction de la vitesse ne nous semble pas rigoureuse. En effet, faire ressortir de la courbe de la situation initiale (avant réduction de vitesse) du risque relatif un pourcentage des collisions évitées en réduisant la vitesse n'est pas indiqué. Les deux situations d'avant et après réduction de vitesse sont différentes, la première étant à vitesse libre et la seconde à vitesse imposée. On compare donc des pommes avec des oranges, ce qui n'est pas très indicatif de la situation réelle. Pour évaluer l'effet de la réduction de vitesse sur les blessures, nous proposons plutôt de procéder à

des simulations de réduction de vitesse des véhicules cas en se basant sur la physique de la collision.

Toutefois, notre étude s'inspirera grandement de la méthodologie adoptée par Kloeden et *al.* Quelques modifications sont par ailleurs apportées, notamment la prise en compte des cas de collisions avec piétons et cyclistes, ainsi que celle des collisions sous conditions de chaussée glissante (pluie, neige, glace). De même, nous éliminerons les cas où le taux d'alcoolémie relevé sur le conducteur est jugé trop important (une limite de 0.05 g/100 ml est proposée) de manière à ne pas induire un biais.

CHAPITRE II - MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE

Suite à la collecte et l'analyse de cas de collisions et de cas témoins, les vitesses préimpact des véhicules cas impliqués dans les collisions sont évaluées à l'aide d'outils de calculs informatiques spécifiques, en utilisant les mesures et observations faites sur le terrain ainsi que sur les véhicules impliqués. Par la suite, les cas témoins permettent d'estimer la vitesse pratiquée en circulation libre sur le site de l'accident dans des conditions similaires. L'analyse comparative des vitesses permet ensuite d'obtenir une classification du nombre d'accidents et de cas témoins selon des tranches de vitesse définies afin de calculer le risque relatif d'être impliqué dans une collision grave ou mortelle. Finalement, des scénarios de réduction de vitesse à 50 km/h sont étudiés, par calculs et analyses, pour les collisions où la vitesse calculée du véhicule cas dépassait la limite légale de 50 km/h, de manière à quantifier les effets de la réduction de vitesse sur la sévérité des blessures ainsi que sur la réduction du nombre de collisions.

2.1 Sélection des cas de collisions

La méthodologie adoptée doit permettre de séparer les effets masquants de celui de la vitesse sur les collisions. Ainsi, de manière à étudier uniquement l'effet de la vitesse, les critères de sélection des cas de collisions suivants ont été utilisés :

- la collision a lieu dans une région urbaine (Montréal) et la vitesse limite légale sur les lieux de la collision est de 50 km/h;
- le véhicule cas, celui dont la vitesse est étudiée, est en circulation libre et ne marque pas un arrêt en passant à l'emplacement de la collision;
- au moins l'un des usagers de la route impliqué a été transporté d'urgence en ambulance suite à la collision et a subi des traitements pour blessures graves;
- les facultés du conducteur du véhicule cas n'étaient pas affaiblies par l'alcool ou autres drogues et médicaments (taux d'alcoolémie maximal de 0.05 g/100 ml);
- la collision n'a pas pour cause le malaise soudain du conducteur du véhicule cas (dossier médical);

- des renseignements suffisants sont disponibles pour reconstituer la collision (présence de traces de freinages, mesures des déformations des véhicules, etc.);
- le véhicule cas n'est pas impliqué dans une poursuite policière;
- le conducteur cas, celui dont la vitesse est étudiée, n'a pas effectué de manœuvre illégale précédant la collision.

Si on prend l'exemple d'une manœuvre illégale, il s'agit d'un facteur de risque autre que la vitesse qui peut agir comme effet masquant lors de l'analyse. Par exemple, effectuer un virage à gauche interdit ou passer sur un feu rouge augmente le risque de collisions, indépendamment de la vitesse choisie par le conducteur du véhicule cas.

Le choix d'une seule région urbaine est dicté par un souci d'uniformité. De ce fait, aucune des collisions survenues sur les rues et boulevards dont la vitesse légale diffère de 50 km/h sur le territoire de la ville de Montréal ne sera couverte.

Pour qu'un cas de collisions soit considéré comme suffisamment grave, le transport d'urgence des victimes par ambulance est requis. De même, la codification des blessures du rapport de collisions rempli par les policiers sera utilisée comme l'un des facteurs de sélection initiale.

Les cas de collisions sélectionnées doivent l'être pour les situations où le véhicule sélectionné était en circulation libre au moment de la collision. À ce sujet, Brault (1995) [14] a souligné qu'on considère qu'un véhicule est en circulation libre si le temps intervéhiculaire est supérieur ou égal à 4 secondes. Comme il faut évaluer la prise de risque pour un conducteur ayant consciemment choisi sa vitesse de circulation il ne doit pas donc pas être empêché de le faire par d'autres usagers de la route ou encore être en train de commettre une manœuvre illégale au sens du code de la route, en suivant un autre véhicule de trop près par exemple.

De manière à éviter les interférences de facteurs contributifs autres que la vitesse, il a également été décidé d'exclure les cas de collisions dans lesquelles les facultés des conducteurs sont affaiblies par l'alcool ou des drogues de façon suffisante pour avoir eu un effet sur la collision et ses conséquences.

De même, pour permettre la reconstitution par mesures et calculs des cas de collisions, des renseignements suffisants doivent être disponibles et doivent être recueillis. Il est ici principalement question des traces caractéristiques laissées sur la chaussée, des positions finales des véhicules, des positions des zones d'impact, de déformation des véhicules, etc. Si aucune information n'est disponible, le cas ne pourra être retenu.

La collecte des données de collisions s'est effectuée en collaboration avec le Service de Police de la ville de Montréal (SPVM) et plus particulièrement avec son service d'enquêtes de collisions. Nous avons ainsi été avisé rapidement des cas de collisions susceptibles d'être analysés. Une fois avisé de l'existence d'un cas répondant aux critères mentionnés ci-haut, l'équipe de recherche a donc procédé aux activités suivantes : photographie de la scène de collision, prise de mesures des déformations des véhicules, identification et mesure des zones d'impact, des déplacements des véhicules, incluant leurs positions finales, ainsi que des diverses traces laissées sur la chaussée, mesure des coefficients de frottement de la chaussée, recueil des divers témoignages disponibles, entrevues des policiers et ambulanciers intervenus sur les lieux, etc. De plus, de manière à recueillir certains cas de collisions avec des blessures graves, la collaboration de patrouilleurs ambulanciers de la Corporation d'Urgences Santé de Montréal Métropolitain a également été mise à contribution.

2.2 Sélection des cas de véhicules contrôlés (cas témoins)

Afin de calculer le risque relatif d'être impliqué dans une collision grave ou mortelle, chaque cas de collision est associé à 4 cas témoins. Les cas témoins répondent aux critères de sélection suivants :

- Les véhicules circulent au même endroit et dans la même direction, le même jour de la semaine et à la même heure, sous les mêmes conditions météorologiques, ainsi que dans des conditions de densité de circulation équivalente. Les cas témoins sont enregistrés de préférence une semaine après la collision; une dérogation à cette règle peut se faire dans la mesure où les conditions météorologiques ou de circulation égales (jour férié par exemple) ne sont pas réunies.

- Les véhicules témoins effectuent une manœuvre similaire au véhicule impliqué dans la collision (par exemple, effectuant un virage, traversant une intersection, etc.).
- Les véhicules témoins sont sélectionnés au hasard. L'acquisition de vitesse débute 15 minutes avant l'heure de la collision et un intervalle minimum de 90 secondes est assuré entre chaque prise de données.
- Les véhicules témoins doivent être en circulation libre au moment de la prise par radar de leur vitesse de circulation. Rappelons que la circulation libre est obtenue quand le temps minimum séparant deux véhicules est de 4 secondes.

L'utilisation combinée du radar et d'une caméra vidéo a permis d'obtenir les informations nécessaires pour chaque cas témoin, soit la vitesse, le type de véhicules, la plaque minéralogique, le nombre d'occupants ainsi que leur groupe d'âge et leur sexe. De plus, l'examen visuel direct a été utilisé pour permettre l'identification ou la confirmation du numéro de la plaque d'immatriculation ainsi que pour l'identification des occupants. Les données liées au groupe d'âge et à l'immatriculation seront utilisées ultérieurement lors d'une étude portant entre autres sur les comportements des conducteurs.

2.3 Incidence de la vitesse sur la gravité des blessures

L'impact de la réduction de la vitesse sur les collisions étudiées est basé sur la relation entre la gravité des blessures et la vitesse. Cependant, une telle relation n'est pas facile à établir, de nombreux facteurs pouvant entrer en ligne de compte, comme par exemple l'âge ou l'état de santé préalable de l'individu. Des résultats statistiques obtenus d'études précédentes indiquent toutefois qu'il existe une relation entre la gravité des blessures et le delta V subit lors de l'impact.

La gravité des blessures est déterminée selon la codification AIS (Abbreviated Injury Scale). Le AIS est l'échelle de mesure de gravité de blessure adoptée en 1971 par l'AMA (American Medical Association). Les blessures mortelles ont une cote AIS de 6, les blessures graves ont une cote supérieure ou égale à 3, les blessures mineures ont une cote AIS de 1 ou 2. Dans cette étude, l'objectif est de déterminer la réduction de la cote AIS des blessures en fonction de la vitesse.

Le delta V correspond à la décélération presque instantanée (de l'ordre de 100 à 150 ms) subie par le véhicule lors de l'impact. La valeur du delta V subie par le véhicule permet de déterminer la sévérité de l'impact. Elle est déterminée à partir des mesures des forces d'impact et des décélérations subies. La sévérité de la collision est déduite à partir de l'énergie absorbée par le véhicule, i.e. elle est reliée au delta V. Généralement, plus ce delta V est grand, plus la blessure est grave. Le choix du delta V comme indicateur de la sévérité de la collision et des blessures découle initialement de la cinématique de la collision. Par exemple, pour une collision frontale contre un objet fixe, la collision se fait en trois temps. En premier lieu, le véhicule entre en collision et subit des déformations qui dissipent l'énergie cinétique du véhicule. On appelle cette phase le premier impact. Durant la phase de déformation du véhicule, l'occupant non retenu continue à se déplacer à l'intérieur du véhicule et sa vitesse relative par rapport au véhicule est égale au delta V. Lorsque l'occupant entre en contact avec un objet dans l'habitacle, le second impact se produit. L'énergie cinétique de l'occupant se transforme alors en énergie de déformation et si les forces induites par la décélération du mouvement de l'occupant dépassent la tolérance du tissu humain, la blessure se produit. Finalement, les organes internes de l'occupant qui se déplacent maintenant relativement par rapport au corps à la vitesse delta V viennent s'immobiliser sur les parois internes du corps causant le cas échéant des blessures internes. La figure 2.1 montre une illustration de la cinématique d'un impact frontal.

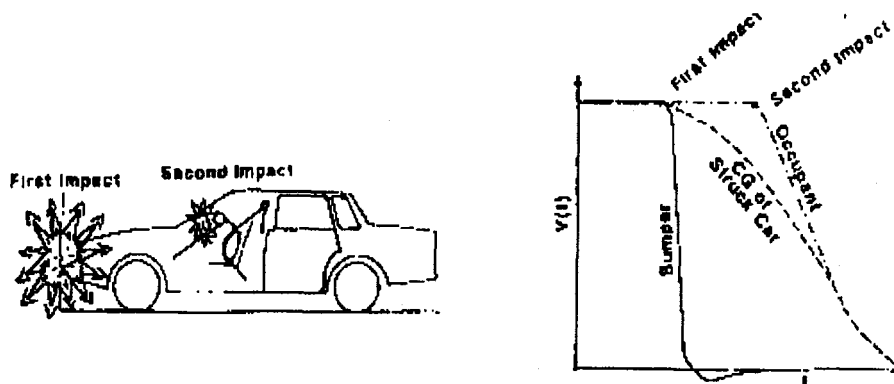


Figure 2.1 - Cinématique d'un impact frontal : premier et second impacts (Ian V. Lau et al., 1991)

Il reste que la gravité de la blessure n'est pas toujours directement liée au delta V. D'autres facteurs liés à la résistance propre de chaque individu peuvent intervenir dans le degré de la blessure. Cependant, la relation entre le delta V et la blessure a été déterminée sur une base statistique [15]. Diverses études, basées sur les données des collisions recueillies par le National Crash Severity Study (NCSS) ou le National Accident Sampling System (NASS) ont permis de démontrer que la sévérité des blessures augmente avec l'augmentation du delta V et que cette relation n'est pas linéaire. À titre d'exemple, l'énergie cinétique d'un véhicule pesant 1400 kg et voyageant à une vitesse de 50 km/h est de 270 000 Joules. Cette énergie devient 4 fois plus élevée lorsque la vitesse du véhicule est augmentée à 100 km/h. Cette relation exponentielle indique que la probabilité et la gravité de la blessure augmente considérablement en fonction de l'augmentation de la vitesse et donc du delta V correspondant.

Evans (1986) [16] a développé une méthode statistique pour la détermination du risque relatif d'être impliqué dans une collision avec blessures graves en fonction de la sévérité de la collision. Cette méthode statistique repose sur les données de 300 000 collisions fatales obtenues de la banque de données de la FARS (Fatal Accident Reporting System). La figure 2.2 donne l'allure des courbes reliant la probabilité de décès en fonction de la sévérité de la collision exprimée par le delta V, tel que :

$$\Delta V = V_{rel} * M2 / (M1 + M2) \quad (2.1)$$

dans laquelle V_{rel} est la vitesse relative entre les masses $M1$ et $M2$ des véhicules.

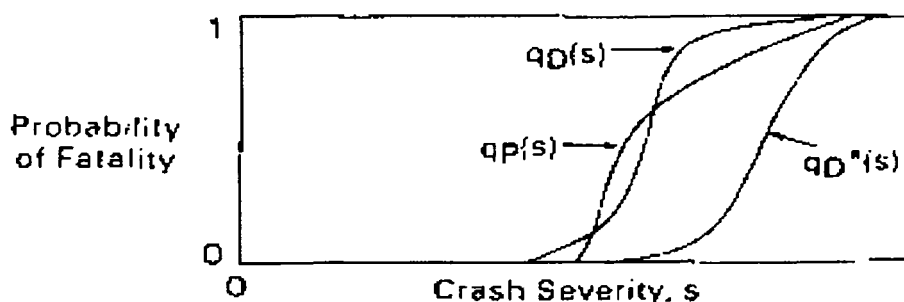


Figure 2.2 - Modèle statistique de la probabilité de blessures en fonction de la sévérité de la collision (Leonard Evans, 1985)

Joksh (1983, 1992) [17] a déterminé la relation qui relie la probabilité de décès en fonction du delta V. Il a utilisé les données de la NCSS pour déterminer en 1983 la relation entre la probabilité d'une collision mortelle et le delta V des collisions entre deux véhicules. La probabilité que le conducteur soit décédé dans une collision est une fonction à la 4^e puissance du delta V tel que (figure 2.3) :

$$r = (\Delta V / 61.5)^4 \quad (2.2)$$

Cette relation a été revue par Joksh en 1992 en utilisant cette fois les données des collisions de la NASS recueillies entre 1980 et 1986. Cette nouvelle relation est :

$$r = (\Delta V / 70.6)^{3.88} \quad (2.3)$$

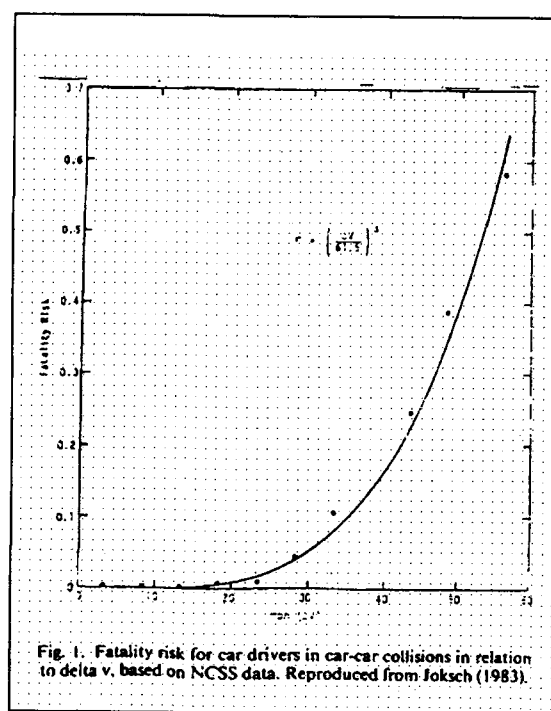


Figure 2.3 - Relation entre la vitesse et la probabilité de décès (Joksh, 1983)

Selon Joksh, il y a beaucoup de collisions pour lesquelles le ΔV est inconnu, essentiellement pour les collisions à basses vitesses. Ainsi, pour déterminer une relation entre le risque d'être

impliqué dans une collision mortelle et le delta V, il faudra introduire une certaine correction de l'équation établie en 1992 pour les cas où les ΔV sont inconnus. Deux méthodes ont été suggérées: la première est de considérer, pour les cas où les ΔV sont inconnus, que les véhicules correspondants roulaient à la vitesse maximale autorisée. Dans ce cas, le risque d'être impliqué dans une collision mortelle est :

$$r = (\Delta V / 83.4)^{3.95} \quad (2.4)$$

La deuxième approche est basée sur l'exploration plus approfondie entre le risque d'être impliqué dans une collision mortelle et la limitation de la vitesse. Par exemple, pour une vitesse limite de 55 mph, le risque d'être impliqué dans une collision mortelle correspondant à un ΔV inconnu se situe entre celui d'une vitesse limite de 50 mph et d'une vitesse limite de 55 mph correspondant aux cas où le ΔV est connu. L'équation du risque est alors :

$$r = (\Delta V / 81.7)^{4.08} \quad (2.5)$$

La figure 2.4 présente l'illustration de ces fonctions sur une échelle logarithmique.

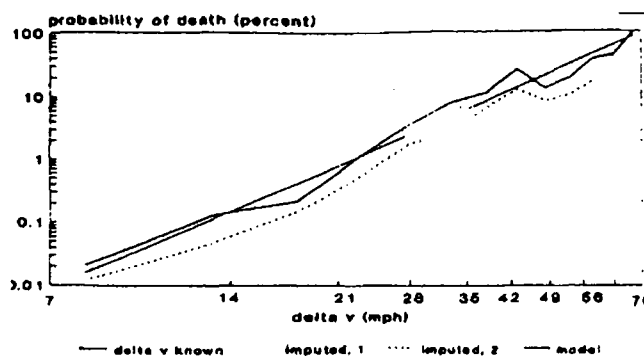


Fig. 2. Fatality risk for car drivers in relation to delta v. Drivers of 1980 and later model cars in 1980 through 1986 accidents; NASS data. The solid line represents only cases with known delta v; the straight line shows the relation $(\Delta v / 71)^4$. The broken lines represent all cases; missing Δv are imputed, using different assumptions.

Figure 2.4 - Relation entre la vitesse et la probabilité de décès (Joksh, 1992)

Evans (1996) [18] a utilisé les données du NASS ainsi que sa propre méthode d'évaluation du risque selon la gravité de la collision, présentée précédemment, pour étudier l'influence du port de la ceinture de sécurité sur la sévérité de la collision et des blessures. Pour ce faire, il a comparé la probabilité de blessures sans et avec le port de la ceinture pour une même gravité de collision exprimée selon le delta V. Pour faire cette comparaison, Evans a eu recours à la banque de données du NASS qui regroupe les collisions entre 1982 et 1991 (voir tableaux 2.1 et 2.2). Les courbes présentées à la figure 2.5 sous une échelle logarithmique illustrent la relation entre la vitesse et la probabilité de subir des blessures graves ou mortelles. Le calcul de probabilité de blessures en fonction du delta V a été déterminé à partir des fonctions établies par Joksh (1983, 1992).

Tableau 2.1 - Données des collisions de la NASS entre 1982 et 1991, occupants non attachés (Evans, 1996)

Table 1. Data for unbelted drivers							
<i>Δv</i> , mph		Raw data			Weighted data		
Range	Midpoint	Fatalities	Injuries	Crashes	Fatalities	Injuries	Crashes
0 - 4	2	0	2	108	0	55	4,255
5 - 9	7	4	34	2,206	33	581	84,325
10 - 14	12	14	129	4,402	152	2,644	145,660
15 - 19	17	49	231	3,601	368	3,780	90,437
20 - 24	22	67	291	2,060	676	3,445	42,964
25 - 29	27	100	262	989	685	3,001	16,668
30 - 34	32	73	176	504	600	1,836	7,557
35 - 39	37	66	139	265	561	1,435	3,767
40 - 44	42	45	69	113	398	642	1,245
45 - 49	47	28	42	65	166	355	738
50 - 54	52	20	26	40	127	209	403
55 - 59	57	6	11	16	36	94	134
60 - 64	62	7	8	13	53	65	146
65 - 69	67	4	4	4	26	26	26
70 - 74	72	4	5	5	23	28	28
75 - 79	77	1	1	1	2	2	2
80 - 84	82	1	1	1	10	10	10
90 - 94	92	1	1	1	5	5	5
TOTALS		490	1432	14,394	3,921	18,214*	398,371*

* Not exact because of rounding of weighted estimates.

Source: Tabulations of 1982 - 1991 NASS data kindly provided by Susan Partyka.

Tableau 2.2 - Données des collisions de la NASS entre 1982 et 1991, occupants attachés (Evans, 1996)

Δv , mph		Raw data			Weighted data		
Range	Midpoint	Fatalities	Injuries	Crashes	Fatalities	Injuries	Crashes
0 - 4	2	0	0	68	0	0	3,443
5 - 9	7	0	16	1362	0	258	71,371
10 - 14	12	4	54	2849	26	820	128,812
15 - 19	17	14	100	1976	111	1427	68,341
20 - 24	22	25	101	894	120	1058	21,838
25 - 29	27	23	91	398	112	829	7,169
30 - 34	32	21	48	155	107	396	2,436
35 - 39	37	18	50	92	148	447	1,187
40 - 44	42	7	16	38	39	114	527
45 - 49	47	6	13	19	30	96	130
50 - 54	52	4	8	13	42	75	176
55 - 59	57	2	3	4	17	19	64
60 - 64	62	5	5	5	21	21	21
65 - 69	67	2	2	3	5	5	7
70 - 74	72	1	2	2	9	18	18
TOTALS		132	509	7878	786*	5583	305,541*

* Not exact because of rounding of weighted estimates

Source: Tabulations of 1982 - 1991 NASS data kindly provided by Susan Partyka.

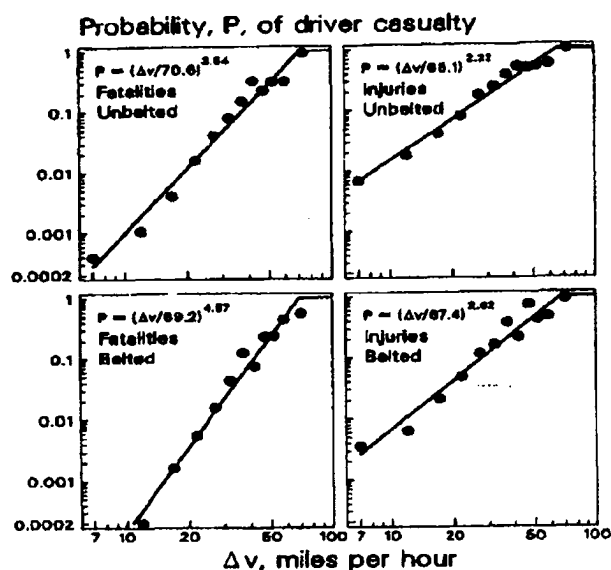


Figure 2.5 - Risque de subir des blessures graves ou mortelles en fonction du delta V (Evans, 1996)

Les études citées précédemment présentent les méthodes utilisées dans la détermination de la gravité des blessures en fonction du delta V, mais sans tenir compte du type de collisions. Il est toutefois important de tenir compte du type de collisions qui a une influence importante sur la génération des blessures. Nous avons donc consulté d'autres études se basant sur la même

méthodologie que celles présentées précédemment mais qui tiennent compte du type de collisions. Les types de collisions identifiés sont : les collisions frontales et latérales, ainsi que les collisions avec piétons. Ce dernier type de collisions représente un cas particulier dans lequel c'est plutôt la vitesse d'impact qui détermine la gravité de la blessure, la perte de vitesse causée par le choc étant essentiellement nul.

2.3.1 Collisions frontales

Pour les collisions frontales, M. Krafft et *al.* (2000) [19] ont eux aussi suivi la méthode de Evans pour l'évaluation du risque de la blessure en fonction de la sévérité de la collision. Ils ont toutefois exprimé la sévérité de la collision par le delta V relatif. Le delta V relatif est le rapport du delta V du premier véhicule par rapport au delta V du deuxième véhicule. Pour effectuer leur étude probabilistique, les auteurs ont utilisé les données recueillies pour des collisions frontales en Australie (1991-97) ainsi que celles recueillies pour des collisions avec impact arrière en Suède (1994-98). Le rapport de masse entre les deux véhicules caractérise le delta V relatif entre les deux véhicules. Ce rapport de masse est la base du calcul du risque relatif que le conducteur du premier véhicule subisse une blessure par rapport au risque de blessures du conducteur du second véhicule. La figure 2.6 illustre le risque relatif de blessures sur les différentes parties du corps en fonction du delta V relatif.

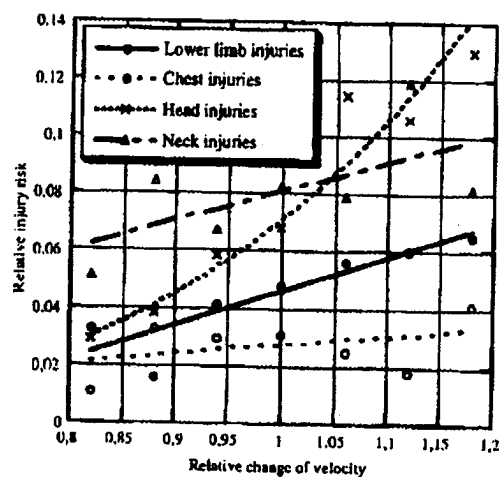
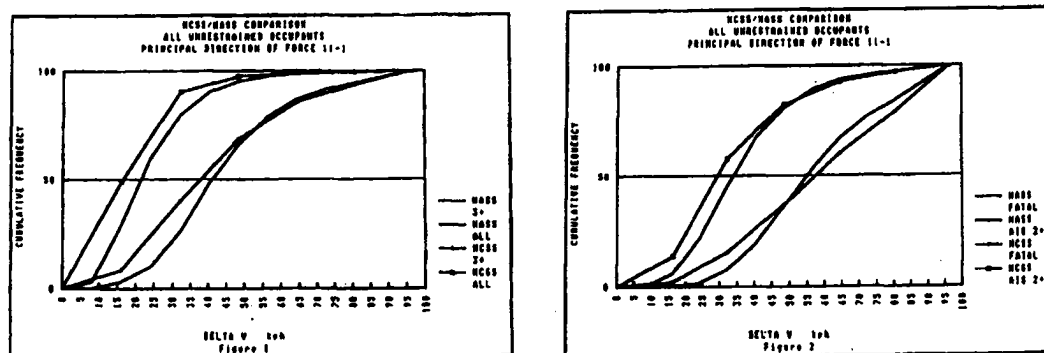


Figure 2.6 - Probabilité de blessures en fonction du delta V relatif (Krafft, 2000)

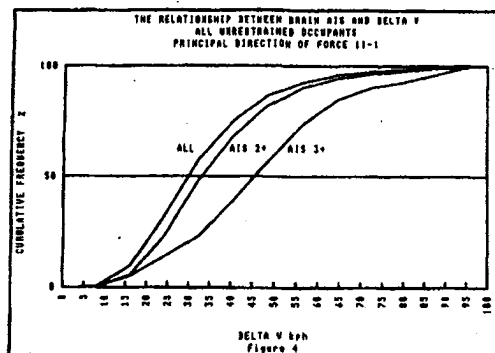
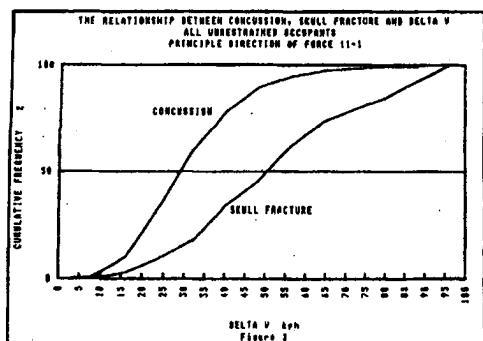
L'étude de V.L. Roberts et C.P. Comptons [20] est une étude statistique faite sur 20 000 cas de collisions figurant dans les banques de données du NASS ainsi que du NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) entre 1980 et 1991. Les résultats obtenus ont permis d'établir des courbes donnant la relation entre le risque relatif de subir une blessure donnée exprimée par le AIS et le delta V. Cette étude a été réalisée pour des collisions frontales dans lesquelles la direction principale de la force d'impact est située entre 11 et 13 heures (12 heures représentent l'axe longitudinal du véhicule orienté vers l'avant de ce dernier) et touchant des occupants non retenus par des ceintures de sécurité. Pour évaluer le bien-fondé de la méthodologie de l'étude et la validité du choix de la banque de données, une comparaison des résultats obtenus à partir des données du NASS et du NCSS portant sur la gravité des blessures en fonction du delta V a été réalisée par les auteurs. D'après les courbes montrées aux figures 2.7 et 2.8, les résultats provenant des deux banques de données sont assez semblables. Cependant, les résultats qui découlent des données du NASS ne présentent pas de changements de valeurs brusques du risque relatif, alors que c'est le cas pour les résultats obtenus du NCSS. Les données du NASS semblent donc par conséquent être plus intéressantes, d'où le choix de cette banque de données.



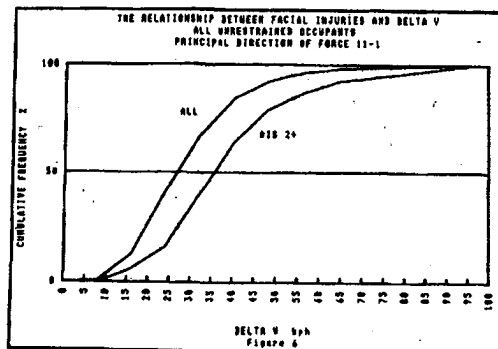
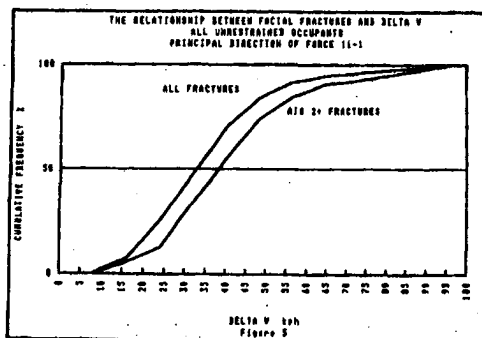
Figures 2.7 et 2.8 - Comparaison des résultats du NASS et du NCSS sur la probabilité de subir une blessure de cote AIS de 2+ et 3+ ou une blessure mortelle en fonction du delta V (Roberts, 1993)

Les auteurs ont ensuite établi la relation entre la probabilité de subir des blessures sur diverses régions du corps et le delta V. Les figures 2.9 et 2.10 établissent la relation entre les blessures et le delta V pour des blessures à la tête. De même, les figures 2.11 et 2.12 établissent la relation

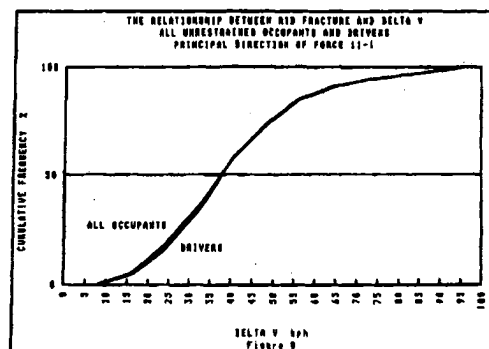
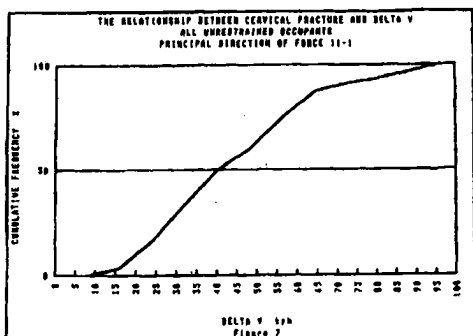
entre le delta V et les blessures au visage. Les figures 2.13 et 2.14 font de même pour les blessures cervicales. Les figures 2.15 et 2.16 présentent les résultats pour les blessures à la colonne vertébrale. Les figures 2.17 et 2.18 présentent les blessures à l'abdomen et au fémur et, enfin, les figures 2.19 et 2.20 présentent les courbes pour les blessures selon l'âge et le sexe.



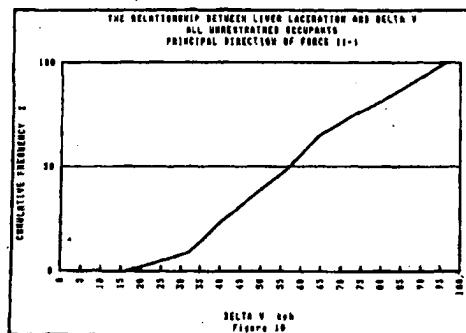
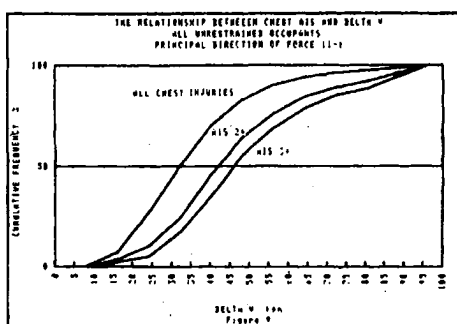
Figures 2.9 et 2.10 - Probabilité de subir une blessure à la tête de cote AIS de 2+ et 3+ en fonction du delta V (Roberts, 1993)



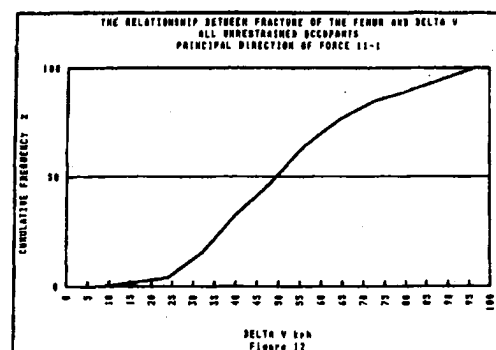
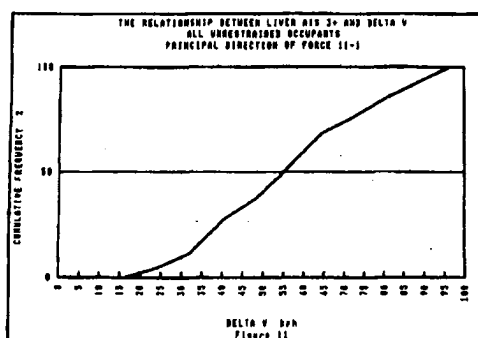
Figures 2.11 et 2.12 - Probabilité de subir une blessure au visage de cote AIS de 2+ et 3+ en fonction du delta V (Roberts, 1993)



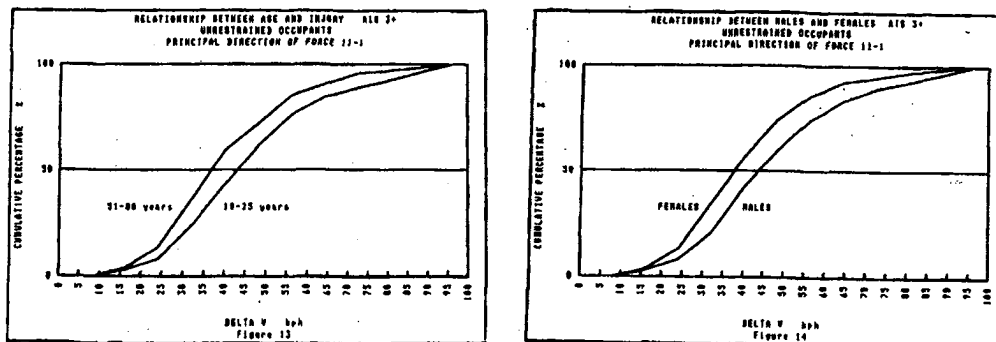
Figures 2.13 et 2.14 - Probabilité de subir une blessure cervicale et aux côtes de cote AIS de 2+ et 3+ en fonction du delta V (Roberts, 1993)



Figures 2.15 et 2.16 - Probabilité de subir une blessure au thorax de cote AIS de 2+ et 3+ en fonction du delta V (Roberts, 1993)



Figures 2.17 et 2.18 - Probabilité de subir une blessure au foie et au fémur de cote AIS de 2+ et 3+ en fonction du delta V (Roberts, 1993)



Figures 2.19 et 2.20 - Probabilité de subir une blessure de cote AIS de 2+ et 3+ selon l'âge et le sexe en fonction du delta V (Roberts, 1993)

L'étude Klauss Langdwieder et *al.* réalisée en 1979 [21] propose une relation entre la blessure et le delta V pour des occupants portant la ceinture de sécurité. La méthode utilisée par les auteurs est la corrélation entre des collisions frontales réelles impliquant 318 occupants portant la ceinture de sécurité et des chargements sur mannequin permettant de simuler les blessures sur les différentes parties du corps. À partir d'un programme qui simule les chargements sur le mannequin, les courbes des chargements ont été tracées. Les résultats des essais de collisions, qui déterminent les accélérations mesurées dans chaque partie du corps sur un mannequin instrumenté, ont été utilisés comme données de base de calculs. La figure 2.21 illustre la corrélation entre la simulation et l'accident réel. La figure 2.22 illustre l'application du modèle mathématique avec l'introduction du delta V pour le calcul des accélérations. Ce calcul permet de déduire la sévérité des blessures en mesurant les accélérations, les forces, les cotes HIC (Head Injury Criteria) et SI (Servical Injuries) etc. La figure 2.23 présente finalement les courbes des blessures en fonction du delta V. On y retrouve ainsi les cotes OAIS (Over all Abbreviated Injury Scale), AIS pour la tête, AIS pour l'abdomen, ainsi que AIS pour le pelvis.

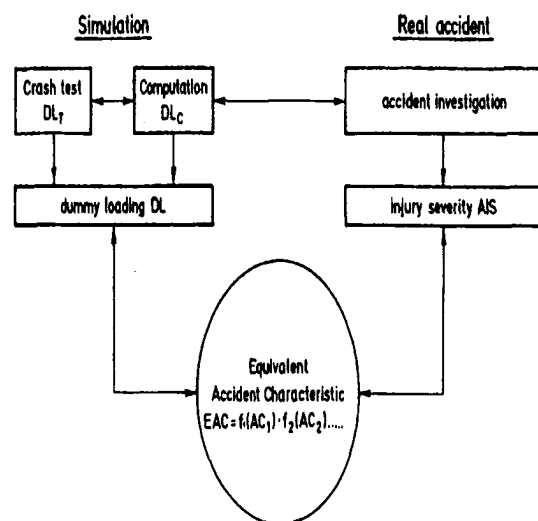


Figure 2.21 - Diagramme d'équivalence entre les collisions simulées et les collisions réelles (Langdwieder, 1979)

○ : applied mathematical models of TU Berlin

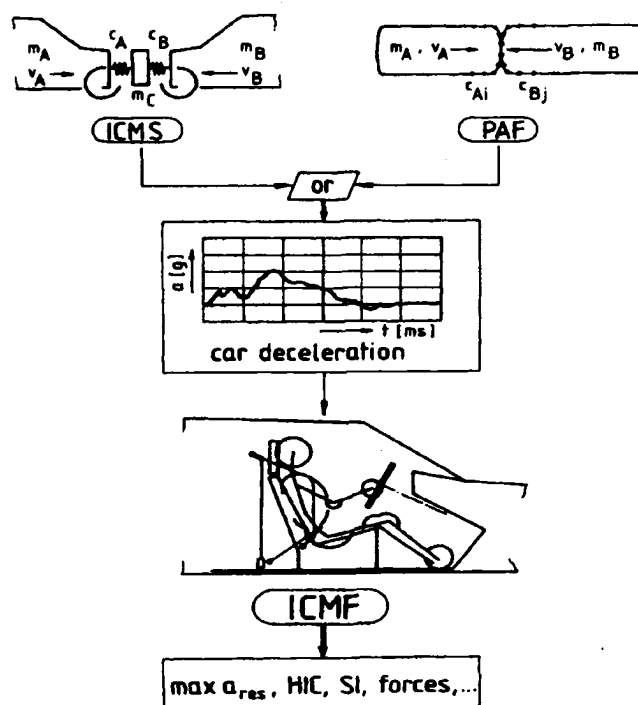


Figure 2.22 - Modèle mathématique appliqué à la simulation des collisions (Langdwieder, 1979)

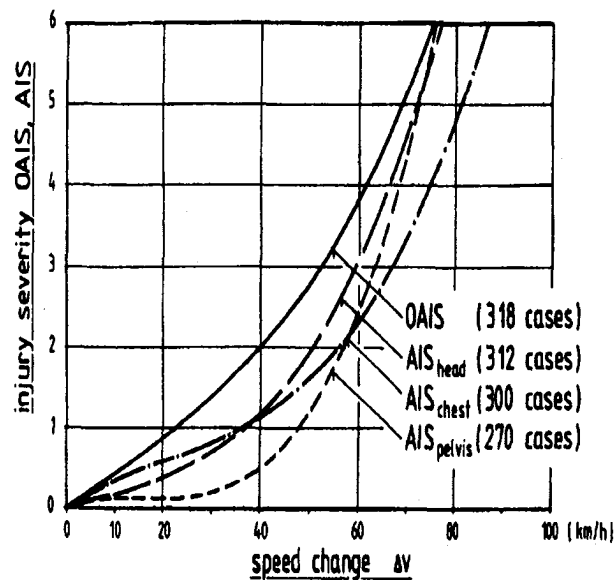


Figure 2.23 - Degré de gravité des blessures en fonction du delta V (occupants attachés) (Langdwieder, 1979)

L'étude de Winnicki et Eppinger (1998) [22] cherche à déterminer l'impact d'un delta V sur les blessures. Dans ce cas, c'est le changement de la vitesse de déploiement des coussins gonflables de sécurité qui a été étudié. Une comparaison avant/après le changement de vitesse a été effectuée pour en déterminer l'impact sur la sécurité des occupants. Cette étude s'applique aux occupants non retenus par une ceinture de sécurité. En effet, la norme FMVSS - 208 du Motor Vehicle Safety Standard régissant le fonctionnement des coussins gonflables dicte, entre autres, des critères de performances s'appliquant à des mannequins non attachés lors d'essais de collisions frontaux. En premier lieu, les accélérations subies par le thorax d'un mannequin instrumenté ont été enregistrées lors des essais de collisions effectuées dans un centre d'essai.

Les figures 2.24a, 2.24b et 2.24c montrent les courbes de delta V en fonction de la probabilité de blessures au thorax pour des cotes AIS de 3, 4 et 5. La probabilité de subir une blessure a été exprimée en fonction de l'accélération mesurée sur les mannequins. Cette probabilité est exprimée par :

$$P(a) = 1/(1 + \exp(-c_0 - c_1 a)) \quad (2.6)$$

dans laquelle c_0 et c_1 sont des coefficients de régression et a est l'accélération.

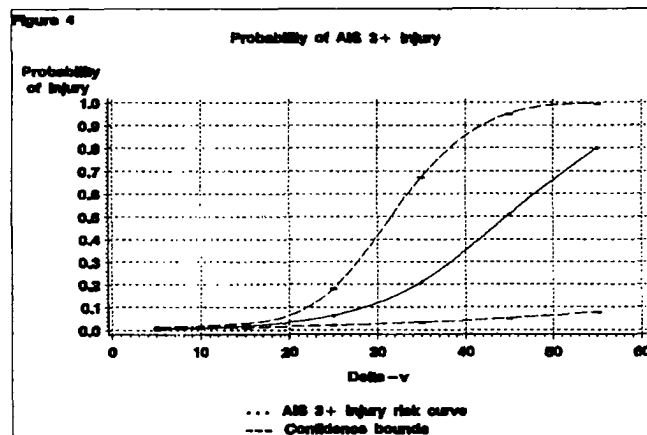


Figure 2.24 - Probabilité pour une cote AIS 3+ de blessure en fonction du delta V pour un occupant non attaché (Winnicki et al., 1998)

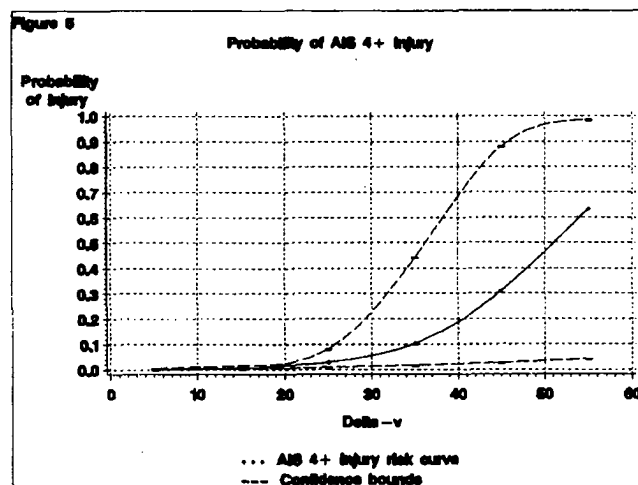


Figure 2.24a - Probabilité pour une cote AIS 4+ de blessure en fonction du delta V pour un occupant non attaché (Winnicki et al., 1998)

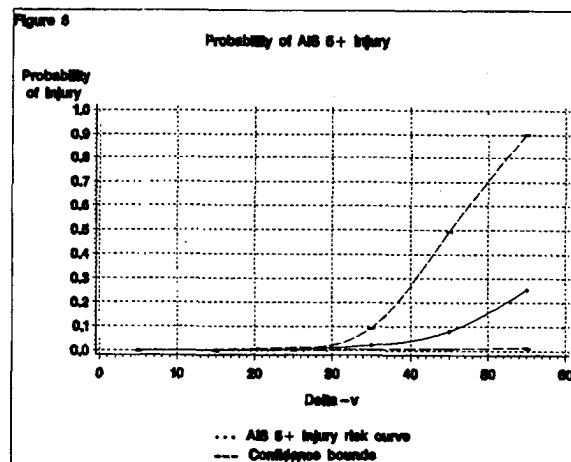


Figure 2.24b - Probabilité pour une cote AIS 5+ de blessure en fonction du delta V pour un occupant non attaché (Winnicki et al., 1998)

Une comparaison de cette fonction de probabilité a été effectuée avec les probabilités de blessures mesurées à partir de la banque de données du NASS-CDS entre 1991 et 1996. À partir de cette base de données, la fonction qui exprime la probabilité de blessures correspondantes à des cotes AIS de 3, 4 et 5 est donnée en fonction du delta V. Cette probabilité est exprimée par :

$$P(\Delta V) = 1 / (1 + \exp(-b_0 - b_1 \Delta V)) \quad (2.7)$$

dans laquelle b_0 et b_1 sont les coefficients de régression estimés à partir d'une méthode de probabilité.

Afin d'établir la comparaison entre les blessures avant et après le changement de design, la relation entre le delta V et l'accélération sur le thorax a été introduite. La relation entre l'accélération et le ΔV a été obtenue en donnant une valeur équivalente aux multiplicateurs internes fonctions (1) et (2) où :

$$b_0 + b_1 \Delta V = c_0 + c_1 a \quad (2.8)$$

En utilisant cette dernière équation, un nouveau delta V est obtenu. Cette nouvelle valeur correspond à l'hypothèse voulant que les blessures augmentent de 33 % avec le changement de design des coussins gonflables. Le nouveau delta V est exprimé par :

$$\Delta V' = (c_0 - b_0 + c_1 a')/b_1 = 1.333 \Delta V + 0.333(c_0 - b_0)/b_1 \quad (2.9)$$

2.3.2 Collisions latérales

Selon le même principe présenté dans les études précédentes portant sur les collisions frontales, l'étude de A.W. Rouhana et M.E. Forester [23] a pour objectif d'étudier les blessures liées aux impacts latéraux à partir d'une étude statistique provenant de la base de données du NCSS. Cette étude porte sur 22 000 cas de collisions qui représentent 40 % des cas de collisions inscrits dans la base de données du NCSS pour des occupants attachés et non attachés.

À partir des données statistiques qui relient la gravité de la collision et l'emplacement de l'impact sur le véhicule à la vitesse d'impact et à la sévérité des blessures, une courbe caractérisant le delta V lors de la collision en fonction de la cote AIS a été établie. La figure 2.25 illustre cette relation pour différentes cotes AIS et divers types de collisions latérales. Ces dernières sont des collisions du côté droit du véhicule (toutes blessures confondues), des collisions du côté gauche du véhicule (toutes blessures confondues), pour des blessures dont la cote AIS est supérieure à 3 de même que pour des blessures mortelles.

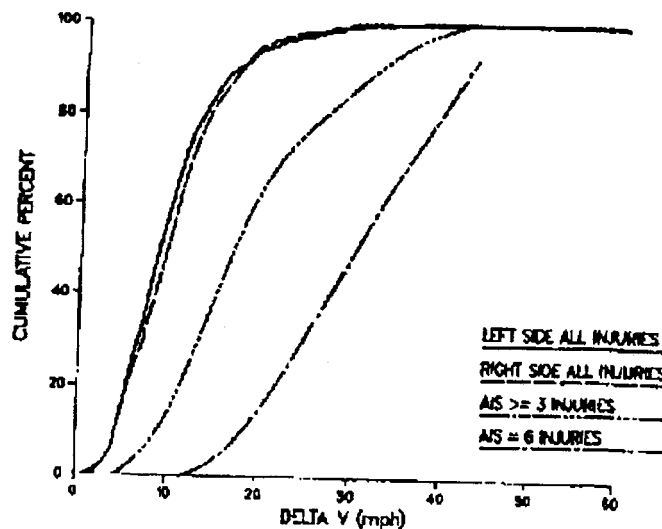


Figure 2.25 - Collision latérale : delta V vs AIS (Rouhana et al., 1985)

E. Miltner et al. (1991) [24] ont analysé des collisions obtenues entre 1987-1990 de la police de Heidelberg en Allemagne. Sur 282 occupants impliqués dans des collisions avec impacts latéraux, 41 d'entre eux étaient attachés et assis à l'avant du véhicule. L'analyse de ces collisions est faite sur la base d'une corrélation entre les paramètres techniques tels que le delta V et les déformations du véhicule. Les blessures sont alors exprimées selon la cote MAIS (Mean Abbreviated Injury Scale). Cette étude a pour objet la comparaison entre ces cas de collisions et 57 essais de collisions réalisés avec des cadavres. L'objectif est de déterminer quels sont les paramètres qui influent sur la sévérité de la blessure lors d'impacts latéraux. Cette étude a permis de déterminer que pour un impact latéral :

1. les déformations au niveau des portières ainsi que la position de l'occupant impliqué dans la collision sont les éléments qui déterminent la gravité des blessures;
2. la valeur du delta V est le facteur permettant le mieux d'évaluer ou de prédire la gravité des blessures. La figure 2.26 illustre bien cette relation et présente la relation entre la sévérité des blessures (cote MAIS) et le delta V.

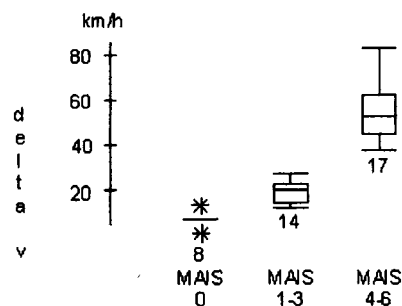
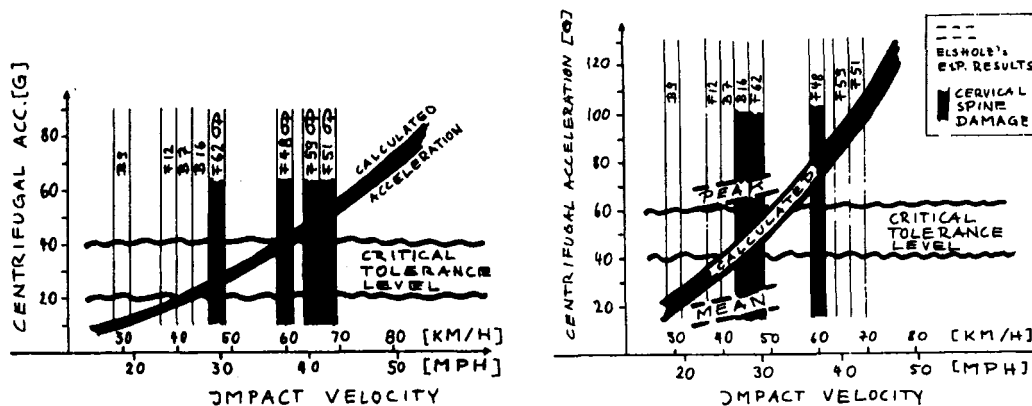


Figure 2.26 - Cote MAIS en fonction du delta V (Miltner et al., 1991)

2.3.3 Collisions avec piétons

Il existe peu d'études qui traitent de la gravité des blessures des piétons en fonction de la vitesse d'impact. En 1974, Helgo Schneider et Gundolf Beier [25] ont réalisé une comparaison entre des collisions réelles avec piétons et les résultats d'essais avec un mannequin. Une banque de données qui permet de déterminer la relation entre les blessures aux piétons et la vitesse d'impact a ainsi été établie. Les figures 2.27 et 2.28 présentent l'accélération subie par le piéton et donnent le niveau de tolérance critique correspondant en fonction de la vitesse de l'impact.



Figures 2.27 et 2.28 - Collision véhicule/piéton : niveau de tolérance critique des blessures en fonction de la vitesse d'impact (Schneider et al., 1973)

Pour étudier la fiabilité des résultats issus d'essais anthropométriques conduits sur des cadavres ainsi que des modèles mathématiques simulant les collisions avec piéton, Neiderer et al. (1983)

[26] ont utilisé pour des fins de comparaison des courbes donnant la sévérité de la blessure en fonction de la vitesse d'impact. Cinq courbes sont illustrées à la figure 2.29 et montrent la relation entre la vitesse d'impact et la sévérité de la blessure.

Selon cette étude, les blessures des piétons commencent à devenir graves dès que la vitesse d'impact dépasse 25 km/h. L'auteur indique aussi que les blessures à haute vitesse les plus graves sont celles produites au niveau de la tête. Ceci s'explique par le fait qu'à partir de 30 km/h, la probabilité de blessures à la tête dépasse 80 % sur l'ensemble des blessures subies par le piéton.

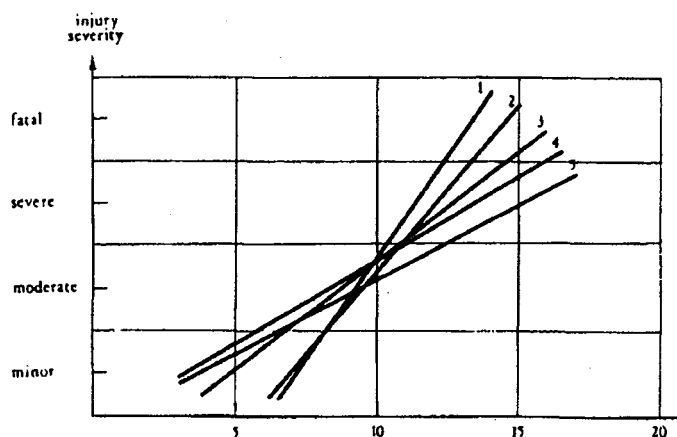


Fig. 3: Dependence of injury severity on impact speed.

vehicles and pedestrians, the lower leg and the pelvis are frequently injured. E.g., Gotzen et al. (15) reported the following injury frequencies:

<55 years >55 years

Figure 2.29 - Collision véhicule/piéton : gravité de la blessure en fonction de la vitesse d'impact (Niederer et al., 1983)

L'étude H. B. Pritz (1983) [27] est une étude expérimentale sur les blessures à la tête des piétons impliqués dans des collisions avec des véhicules. Pour fins de comparaison et de reconstitutions de collisions, 110 cas de collisions véhicule/piéton ont été utilisés dans cette étude. À partir des données sur les collisions, il est possible d'exprimer la gravité de la blessure mesurée selon la cote AIS en fonction de la vitesse d'impact. Ainsi, une courbe (voir figure 2.30) illustrant le

pourcentage cumulatif des blessures à la tête en fonction de la vitesse d'impact a été élaborée sur des bases statistiques.

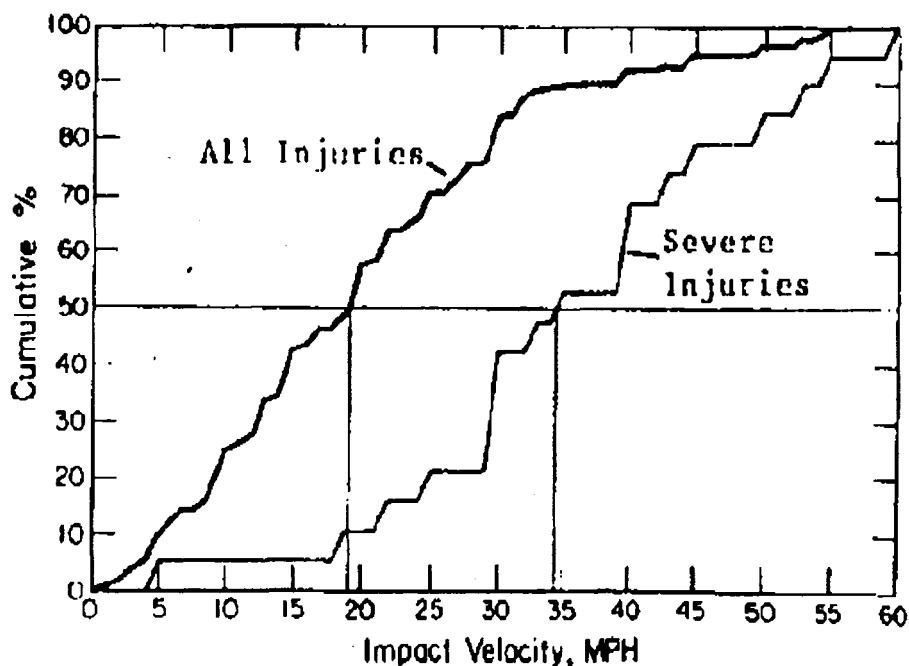


Figure 2.30 - Collision véhicule/piéton : probabilité de blessures à la tête en fonction de la vitesse d'impact (Pritz, 1983)

2.3.4 Sélection des courbes delta V vs cote AIS des blessures

La revue des études scientifiques que nous avons effectuées indique que la variable permettant le mieux de déterminer la sévérité des blessures dans le cas d'un impact entre véhicules est le delta V subit à l'impact. En effet, les études présentées permettent d'établir une relation entre le delta V et la sévérité des blessures pour une collision entre deux véhicules. Pour déterminer cette relation, les auteurs se sont appuyés sur des cas de collisions issues de banques de données du NHTSA ou d'autres banques de données telles que celles du NASS, du NCSS ou du CDS. Ces études s'appuient sur des analyses statistiques pour déterminer la relation entre le delta V et les blessures. Ainsi, Evans et Joksh ont déterminé une relation mathématique entre le delta V et les blessures où la probabilité de blessures est, à la 4^e puissance, fonction du delta V.

Nous proposons donc d'utiliser, dans notre analyse de l'effet de la réduction de la vitesse sur les blessures, les résultats de certaines de ces études pour caractériser la sévérité des blessures en fonction du delta V. Les courbes AIS vs delta V doivent toutefois être choisies en fonction du type de collisions, frontal, latéral ou avec piétons, et de l'utilisation des ceintures de sécurité.

Evans a présenté cette relation pour les cas avec occupants attachés et non attachés. L'étude de Evans traite donc tous les cas de collisions sans spécifier le type de collisions (frontale ou latérale). Les résultats révèlent que le risque de subir une blessure grave ou mortelle augmente rapidement en fonction du delta V pour atteindre 100 % pour un $\Delta V > 70$ km/h. Cette étude nous permet d'obtenir une bonne évaluation de la probabilité d'être impliqué dans une collision mortelle selon le delta V. Toutefois, la sévérité des blessures n'est malheureusement pas donnée en fonction de la cote AIS.

Les autres études examinées distinguent les collisions selon le type d'impact, soit des collisions frontales ou encore latérales. Les mêmes procédures ou des procédures similaires à celle utilisée par Evans y sont utilisées. Par exemple, l'étude de Roberts établit la relation entre les blessures et le delta V pour des occupants ne portant pas la ceinture de sécurité lors d'une collision frontale. Cette étude nous permet d'obtenir la relation entre le delta V et la probabilité de subir une blessure exprimée selon une cote AIS pour différentes parties du corps humain. Cependant, cette relation n'est exprimée que pour des blessures graves (une cote AIS de 3 et plus). Ainsi, ces résultats ont l'inconvénient de donner la même probabilité de blessures pour les cotes AIS de 3, 4, 5 et 6, malgré qu'il s'agisse de blessures de sévérité bien différentes.

Cet inconvénient n'est pas présent dans l'étude de Winnicki et *al.*, dans laquelle la relation entre delta V et les blessures pour des occupants non attachés est déterminée. Une relation statistique entre les blessures et le delta V pour des cotes AIS de 3, 4 et 5 y est présentée. Cette étude a permis, à travers des calculs de probabilité, de vérifier le postulat présenté au début du rapport quant à l'existence d'une relation positive entre la sévérité des blessures et le delta V lors de l'impact.

De son côté, l'étude de Klauss Langdwier illustre la relation directe entre le delta V et la cote de blessure AIS. Cependant, un inconvénient semble être l'âge de l'étude qui date de 1979. En effet, la conception des véhicules plus récents a permis d'obtenir des véhicules qui absorbent mieux les chocs et qui sont donc plus sécuritaires. Par ailleurs, les coussins gonflables, qui ont été introduits de façon généralisée dans les véhicules à partir de 1995, permettent également d'améliorer la sécurité des occupants, particulièrement de ceux qui ne sont pas attachés. Toutefois, ces améliorations aux véhicules de conception récente ne devraient pas nous empêcher d'utiliser les résultats de cette étude qui peuvent de toute façon être combinés avec les résultats d'autres études plus récentes telles que celle d'Evans.

En ce qui concerne l'étude de M. Krafft et *al.*, la méthodologie adoptée est intéressante étant donné que l'auteur considère la non-compatibilité entre les véhicules comme cause de blessures lors de collisions. Ceci l'amène à mesurer le risque de blessures en fonction du delta V relatif d'un véhicule à l'autre

$$V_1/V_2 = M_2/M_1 \quad (2.10)$$

où M_1 et M_2 sont les masses des véhicules 1 et 2.

Toutefois, cette méthode est moins facilement applicable à notre recherche du fait qu'elle ne présente pas de données sur la gravité des blessures en fonction du delta V, qui constitue notre facteur de référence pour les collisions entre véhicules.

À la lumière de ces constatations, la méthodologie de détermination de la sévérité des blessures que nous retenons pour les cas de **collisions frontales** est la suivante :

- utilisation des courbes de Evans pour la détermination du risque de subir une blessure grave ou mortelle;
- combinaison des courbes de Evans avec celles de Roberts, Winnickie pour des occupants non attachés et avec celle de Langdwier pour des occupants attachés. La comparaison des

résultats obtenus en utilisant chacune de ces études permet d'évaluer la gravité de la blessure.

La technologie des véhicules a beaucoup évolué depuis les 20 dernières années. Ces derniers sont devenus beaucoup moins rigides et ils absorbent ainsi mieux les chocs, ce qui diminue par conséquent l'énergie transférée aux occupants lors de collisions. Cependant, dans le cas des collisions latérales, les blessures se produisent principalement à cause de l'intrusion au niveau des portières et de leurs piliers. On retrouve d'ailleurs la majorité des blessures au niveau du thorax. Malgré l'installation de renforts latéraux au niveau des portières, et malgré l'ajout de coussins gonflables latéraux, il est très difficile de réduire l'intrusion et la sévérité des blessures lors d'impacts latéraux. Les résultats de l'étude de Rouhana et *al.*, réalisée en 1985, sont donc toujours applicables aux véhicules d'aujourd'hui. L'étude de Rouhana permet d'obtenir la probabilité de la blessure en fonction du delta V pour des cotes AIS de 3 et plus (3, 4 et 5) ainsi que pour une cote AIS de 6. Dans l'étude des **collisions latérales**, nous adopterons la même procédure que celle définie pour les collisions frontales. Les résultats découlant de cette étude seront confrontés avec ceux de l'étude de Miltner qui nous permet d'obtenir la sévérité des blessures selon une cote AIS en fonction du delta V, où à partir d'intervalles de delta V, l'étude de Miltner nous permet aussi d'obtenir la cote de blessure MAIS. Il nous est également possible de comparer les résultats ainsi obtenus avec les résultats de l'étude de Evans.

Pour les collisions avec piétons, nous avons vu que les blessures graves commencent à des vitesses aussi basses que 25 km/h. Les courbes disponibles datent des années 80 et, même si le design des véhicules a quelque peu changé depuis, il reste que les blessures liées à l'impact du piéton sur le véhicule ne semblent pas avoir diminué de sévérité depuis. Ceci semble dû au fait que le design de la section avant des véhicules n'a pas suffisamment changé pour avoir une influence notable sur la gravité des blessures lors d'impacts avec un piéton.

Par ailleurs, comme il est difficile de prévoir le comportement d'un piéton à l'approche d'un véhicule, nous considérerons qu'il est immobile pour le besoin de nos analyses de réduction de vitesse.

Contrairement à l'étude de Klauss Langdwieder et *al.*, l'étude de Helgo Schneider et Gundolf Beier est trop ancienne pour être utilisée. En effet, la forme des pare-chocs avant et des calandres des véhicules a beaucoup changé depuis cette étude. Notons entre autres que dans les années soixante, les pare-chocs avant avaient un profil beaucoup plus agressif que celui des voitures d'aujourd'hui. Ce profil ayant un impact certain sur le type et la sévérité des blessures enregistrées par les piétons, nous n'utiliserons donc pas les résultats de cette étude.

Pour l'évaluation de l'impact de la vitesse de collision sur la sévérité des **blessures des piétons**, nous utiliserons les courbes tirées de l'étude de Niederer et al. Les courbes illustrées dans cette étude sont le fruit de plusieurs études menées à partir de 1974. Nous utiliserons la courbe la plus récente, courbe #4 provenant des travaux de l'Université de Zurich et qui date de 1981 pour évaluer la gravité des blessures. En suivant la même procédure que précédemment, nous comparerons les résultats de cette courbe avec ceux de la relation obtenue dans H.B. Pritz (1983).

Ainsi, à partir du delta V calculé par la reconstitution de la collision et du delta V calculé à partir du scénario de réduction de vitesse initiale du véhicule à 50 km/h, nous avons évalué l'effet de la réduction de vitesse sur les blessures. Pour ce faire, nous avons utilisé les courbes suivantes de probabilité de subir des blessures graves ou mortelles en fonction du delta V qui dépendent de l'utilisation des ceintures de sécurité et du type de collisions et sont donc choisies en conséquence :

- collisions frontales :
 - occupant attaché : résultats de Evans et de Langdwieder (figure 1.2);
 - occupant non attaché : résultats de Evans, Roberts et *al.* (1993) et Winnicki (figure 1.3);
- collisions latérales : résultats de Rouhana (figure 1.4), Miltner (figure 1.5) et Evans;
- collisions avec piétons : résultats de Niederer (figure 1.6) et Pritz (figure 1.7).

CHAPITRE III - RECONSTITUTION DES COLLISIONS

La reconstitution de la collision sert à calculer les vitesses d'impact, les changements de vitesse ΔV , les énergies et les forces d'impact. Pour arriver à reconstituer le plus fidèlement la scène et obtenir les résultats de cette reconstitution, un ensemble de données doit être recueilli sur la scène de la collision.

De façon générale, à l'aide des informations recueillies sur la scène de la collision et sur les véhicules endommagés, il est possible de reconstituer la scène de la collision et de déterminer ainsi la vitesse du véhicule avant l'impact, soit à l'aide d'un logiciel de modélisation spécialisé (logiciel SLAM ou PC Crash) ou plus laborieusement par calculs en utilisant les lois de la cinématique, de la conservation de l'énergie et de la conservation de la quantité de mouvement sur lesquelles ces logiciels sont fondés. À cela s'ajoute parfois l'analyse des données enregistrées par le module SDM (Sensing Diagnostic Module) des systèmes de coussins gonflables des véhicules qui sont de plus en plus accessibles. Comme chaque cas de collisions possède des caractéristiques particulières et laisse des traces physiques différentes, la combinaison de plusieurs méthodes est souvent utilisée de manière à vérifier la validité des résultats obtenus.

3.1 Données physiques

La reconstitution d'une collision requière un ensemble de données physiques qui sont recueillies sur le site de la collision ainsi que sur les véhicules. Ces données physiques sont :

- ◆ les traces de freinage ou de dérapage;
- ◆ la géométrie des lieux de la collision ;
- ◆ les positions initiales et finales des véhicules;
- ◆ les déformations des véhicules;
- ◆ les positions initiale et finale du piéton (distances de projection et de glissement);
- ◆ les dimensions des véhicules, le nombre, l'emplacement ainsi que le poids des occupants.

3.1.1 Traces de freinage et de dérapage

Les traces de freinage ou de dérapage recueillies sur la scène sont les marques laissées par le frottement des pneus sur la chaussée. Il arrive que ces traces ne soient pas visibles (chaussée mouillée, véhicule équipé de freins ABS, etc.). L'absence de traces de freinage avant l'impact indique généralement que le conducteur n'a pas actionné ses freins avant la collision. Dans certains cas, malgré l'absence de traces après l'impact, nous avons supposé que le conducteur a actionné ses freins après l'impact. Cependant, ceci ne s'applique pas si la trajectoire du véhicule indique que le conducteur a effectué des manœuvres qui nécessitent que les roues ne soient pas bloquées.

L'exploitation des marques de pneus sur la chaussée est l'un des éléments qui permettent de calculer les vitesses initiales et post-impact. Les deux paramètres importants lors des calculs liés au freinage sont le temps de réaction au freinage et le coefficient de friction des pneus avec la chaussée. Le premier paramètre sert à déterminer la distance parcourue par le véhicule entre le moment où la décision de freiner est prise et le moment de freinage effectif, alors que le second est utilisé dans le calcul de la décélération du véhicule.

3.1.2 Positions initiales et finales

Le relevé de la scène de la collision inclut la zone d'impact ainsi que les positions initiales (avant freinage) et finales des véhicules ou des piétons. Ce relevé nous permet de retracer la trajectoire de chaque véhicule ainsi que celle des piétons. La détermination de la trajectoire du véhicule aide à identifier les manœuvres que le conducteur a pu effectuer avant et après la collision. Les distances parcourues après la collision ainsi que la direction des véhicules pré et post-impact sont également des éléments permettant le calcul des vitesses initiales et d'impact.

Pour les cas de collisions avec piéton, la vitesse d'impact est mesurée sur la base de la distance de projection et/ou de glissement du piéton suite à l'impact avec le véhicule. Dans le cas où le piéton a été entraîné par le véhicule, le calcul est basé sur la distance entre la zone d'impact et la position finale du véhicule.

3.1.3 Déformations des véhicules

Les déformations des véhicules sont obtenues par le protocole de la norme J224 MAR80 de la SAE. Cette norme recommande de séparer la zone d'impact en intervalles égaux sur lesquels sera mesurée la déformation. La mesure de déformation s'effectue par rapport à un repère fixe qui est en général l'essieu arrière pour les déformations frontales et l'axe longitudinal central du véhicule pour les déformations latérales. Ensuite, toujours aux mêmes intervalles, et à partir du même point de référence, on mesure les mêmes distances sur un véhicule intact. Les déformations réelles sur les véhicules sont donc la différence entre les mesures sur le véhicule endommagé et celles provenant du véhicule intact (voir figure 3.1). Ces déformations sont ensuite utilisées pour calculer la valeur du changement de vitesse ΔV des véhicules lors de la collision.

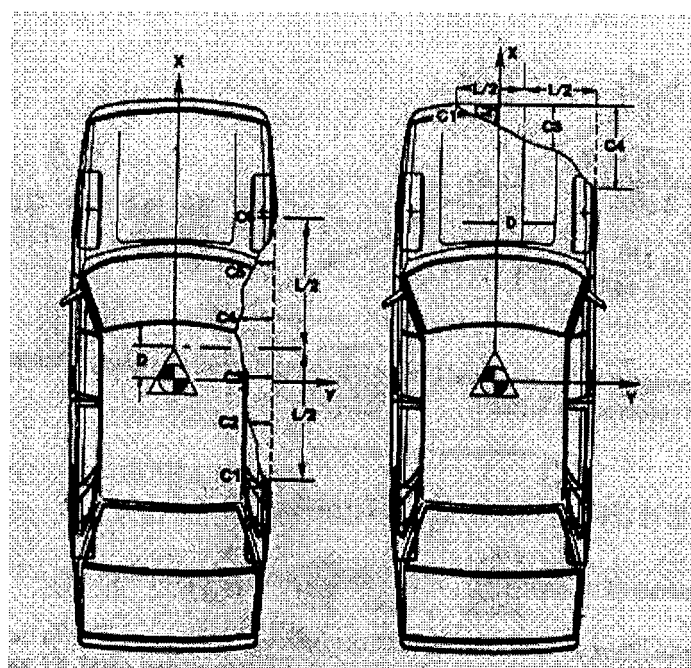


Figure 3.1 - Relevé des déformations sur les véhicules (impact latéral et frontal)

3.1.4 Caractéristiques des véhicules, emplacement et poids des occupants

Les caractéristiques des véhicules sont en général obtenues de la banque de données informatisées SPECS (Canadian Vehicle Specification). Cette banque de données présentent les

caractéristiques physiques de tous les modèles de véhicules qui circulent au Canada. Les données utilisées pour la reconstitution sont généralement: la distance entre les essieux, la distance entre l'essieu avant et l'avant du véhicule, la distance entre l'essieu arrière et l'arrière du véhicule, la largeur du véhicule, le rapport des poids de l'essieu avant sur celui de l'essieu arrière ainsi que le poids total du véhicule. Ces informations sont nécessaires, entre autres, pour déterminer la position du centre de gravité du véhicule.

Lors de ces calculs, le poids des occupants est toujours pris en considération. Dans le cas où l'information sur le poids des occupants n'est pas disponible, on estime ce poids à 73 kg pour un homme, à 48 kg pour une femme, tel que l'exige Transports Canada dans l'application des normes de la Loi sur la Sécurité des Véhicules Automobiles.

De plus, il est important de déterminer la position des occupants car l'analyse des blessures exige de connaître leur emplacement à l'intérieur du véhicule au moment de la collision.

3.2 Temps de réaction au freinage

Le temps de réaction au freinage est l'intervalle de temps séparant le moment de l'apparition d'un obstacle dans le champ de vision du conducteur et le début effectif du freinage. Plusieurs paramètres influencent le temps de réaction au freinage et le rendent ainsi difficile à évaluer. Ces paramètres sont : la nature de l'obstacle qui exige le freinage, le temps de perception de l'obstacle, le sexe, l'âge, l'état général du conducteur ainsi que l'environnement routier.

Plusieurs méthodologies d'études ont été adoptées pour déterminer le temps de réaction au freinage. En général, on oblige le conducteur à réagir rapidement en prévoyant un obstacle qui surgit soudainement sur sa route. Dans d'autres cas, il s'agit de mesurer le temps de réaction à l'approche d'un obstacle régulier, comme par exemple le passage d'un feu vert à un feu jaune à une intersection. Dans d'autres études, un simulateur de conduite a été utilisé pour obtenir cette information. Quoique le simulateur de conduite ne reflète pas exactement la réalité, il est généralement accepté qu'après un certain temps de simulation, le comportement d'un utilisateur de simulateur devient semblable à celui d'un conducteur en conditions réelles.

La méthode de Johansson et Rumar (1971) [30] consiste à demander à des conducteurs d'actionner leurs freins quand ils entendent un klaxon dans la rue. Les résultats ont montré que 85 % des temps de réponse tournent autour de 1,0 seconde. Ce temps augmenterait de 35 % lorsque le niveau de surprise est augmenté et ainsi le temps de réaction au freinage devient alors 1,35 seconde.

Wortman et Matthias (1983) [31] ont basé leur étude sur le comportement des conducteurs au changement du signal d'un feu de circulation du vert vers le jaune. Les observations ont indiqué que les temps de réaction au freinage variaient de 1,5 à 2,1 secondes (voir tableau 3.1). Cette méthode a toutefois l'inconvénient de ne pas tenir compte de l'effet de surprise.

Tableau 3.1 - Temps de réaction au freinage (Wortman et Matthias, 1983)

Intersection Approach	Average Time (sec)	Standard Deviation (sec)	85% Time (sec)
University Drive	1.28	0.82	2.0
Southern Ave. (Day)	1.49	0.82	1.9
Southern Ave. (Night)	1.43	0.73	2.0
U.S. 60	1.38	0.60	2.1
First Ave.	1.24	0.51	1.8
Sixth Street	1.55	0.70	2.0
Broadway Blvd. (Day)	1.16	0.48	1.5
Broadway Blvd. (Night)	1.09	0.44	1.5
All Approaches	1.30	0.60	1.8

From: Wortman and Matthias (1983)

L'effet de surprise a été introduit par Trigers et Harris (1982) [33]. Leur méthode consiste à introduire un obstacle qui se dresse soudainement sur le chemin du véhicule. Le temps de perception est celui entre l'apparition de l'obstacle et l'apparition des feux d'arrêt du véhicule. Leurs résultats produits au tableau 3.2 montrent que le temps de réaction au freinage, qui englobe le temps de perception de l'obstacle, le temps de prise de décision ainsi que le temps d'actionnement des freins, varie de 1,8 à 4,1 secondes.

Tableau 3.2 - Temps de réaction au freinage (Trigers et Harris, 1982)

Element	Percentile of Drivers					
	50	75	85	90	95	99
1. Perception						
a. Latency	0.24	0.27	0.31	0.33	0.35	0.45
b. Eye Movement	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
c. Fixation	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
d. Recognition	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
2. Decision	0.50	0.75	0.85	0.90	0.95	1.00
3. Brake Reaction	0.85	1.11	1.24	1.42	1.63	2.16
Total A (1a-d+2+3)	2.3	2.9	3.2	3.5	3.8	4.6
Total B (1c-d+2+3)	2.0	2.5	2.8	3.1	3.4	4.1
Total C (1a-d+3)	1.8	2.1	2.3	2.6	2.9	3.6

From: McGee et al. (1983)

En utilisant la même méthodologie, Olson et *al.* (1984) [34] ont conclu d'après leurs résultats montrés à la figure 3.2, que le temps de réaction est de 1,3 seconde pour 85 % des conducteurs et de 1,5 seconde pour 95 % des conducteurs.

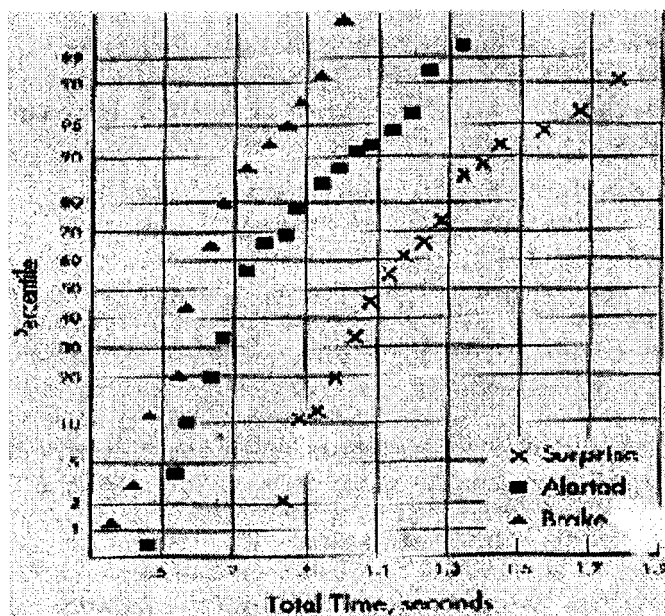


Figure 3.2 - Temps de réaction au freinage (Olson et al., 1984)

Une étude conduite par le NHTSA (2000) [35], portant sur le comportement des conducteurs de véhicules munis d'un système de freinage de type ABS, conclut que le temps de réaction est de 2,11 secondes. En utilisant un simulateur de conduite, il a été évalué que le temps pour lâcher l'accélérateur en réponse à l'apparition de l'obstacle est de 0,97 seconde et que l'intervalle de temps entre l'actionnement des freins et le freinage est de 1,14 seconde.

Ces études relèvent une grande disparité de résultats. Cependant, d'après Paul L. Olson, il ressort des résultats de ces études que 85 % des conducteurs ont un temps de réaction de 1,5 seconde. Ce résultat a par la suite été utilisé dans plusieurs études dont celle de McLean et *al.* (1994) [36] sur l'effet de la vitesse sur les collisions avec piétons. Cette valeur de temps de réaction de 1,5 seconde a été retenue pour la présente étude.

3.3 Coefficient de frottement

Le frottement est par définition la force de résistance au mouvement entre deux objets au niveau de leur surface de contact. La force de résistance au mouvement est une force horizontale (H), définie comme un pourcentage de la force verticale (V). Le rapport entre la force horizontale et verticale est appelé coefficient de frottement $f = H/V$. Pour les véhicules, il s'agit du frottement entre les pneus et la chaussée, la force verticale étant le poids du véhicule et ses occupants. Quand le freinage ou le dérapage se produit, la décélération sera égale à :

$$a = f * g, \text{ avec } g = 9.81 \text{ m/s}^2 \quad (3.1)$$

dans laquelle a = décélération du véhicule.

Le coefficient de frottement est fortement lié à l'état et la nature de la chaussée. On définit par la nature de la chaussée sa configuration physique (une piste en gravier ou en terre, un sentier en gazon, une route revêtue en asphalte ou en béton). L'état de la chaussée indique l'état de la surface de roulement de la chaussée (rugueuse ou lisse, poussiéreuse ou propre, présentant des fissures et des nids de poules, mouillée ou sèche, recouverte ou non de gel ou de neige, etc.). Le tableau 3.3 présente les valeurs des coefficients de frottement en fonction de la nature de la chaussée et son état ainsi que de la vitesse du véhicule. Dans l'absence de tests donnant la valeur

du coefficient de frottement de la chaussée dans la zone de la collision, le choix de la valeur du coefficient de frottement est fait à partir d'une estimation de l'état de la surface de roulement.

Tableau 3.3 - Coefficients de frottement des chaussées (Trafic Accident Reconstruction)

COEFFICIENTS OF FRICTION OF VARIOUS ROADWAY SURFACES

DESCRIPTION OF ROAD SURFACE	DRY				WET			
	Less than 30 mph		More than 30 mph		Less than 30 mph		More than 30 mph	
	From	To	From	To	From	To	From	To
PORTLAND CEMENT								
New, Sharp	.80	1.20	.70	1.00	.50	.80	.40	.75
Travelled	.60	.80	.60	.75	.45	.70	.45	.65
Traffic Polished	.55	.75	.50	.65	.45	.65	.45	.60
ASPHALT or TAR								
New, Sharp	.80	1.20	.65	1.00	.50	.80	.45	.75
Travelled	.60	.80	.55	.70	.45	.70	.40	.65
Traffic Polished	.55	.75	.45	.65	.45	.65	.40	.60
Excess Tar	.50	.60	.35	.60	.30	.60	.25	.55
GRAVEL								
Packed, Oiled	.55	.85	.50	.80	.40	.80	.40	.60
Loose	.40	.70	.40	.70	.45	.75	.45	.75
CINDERS								
Packed	.50	.70	.50	.70	.65	.75	.65	.75
ROCK								
Crushed	.55	.75	.55	.75	.55	.75	.55	.75
ICE								
Smooth	.10	.25	.07	.20	.05	.10	.05	.10
SNOW								
Packed	.30	.55	.35	.55	.30	.60	.30	.60
Loose	.10	.25	.10	.20	.30	.60	.30	.60

Exhibit 15. This table lists coefficients of friction of various roadway surfaces. This table is not intended for large, heavy trucks.

3.4 Méthodes de calcul des vitesses

Le calcul des vitesses s'appuie sur les lois de la cinématique, la loi de la conservation des quantités de mouvement ainsi que sur le principe de conservation de l'énergie. En général, les trois méthodes doivent être conjuguées pour déterminer la vitesse initiale, la vitesse d'impact ainsi que le changement de vitesse au cours de l'impact. Les lignes qui suivent présentent la théorie liée aux trois méthodes ainsi que leurs applications.

3.4.1 Lois de la cinématique

L'utilisation des lois de la cinématique permet dans plusieurs cas de calculer la vitesse après impact, la vitesse d'impact suite à un freinage ou la vitesse de projection d'un piéton. Le calcul de la vitesse après impact se fait en tenant compte d'un mouvement à accélération constante. L'équation qui régit le mouvement est la suivante :

$$V_f^2 - V_0^2 = 2 * \gamma * S \quad (3.2)$$

V_f : vitesse finale;

V_0 : vitesse initiale;

α : décélération du véhicule ($\alpha = f * g$ où f est le coefficient de frottement);

S : distance d'arrêt.

L'équation (3.2) est utilisée pour déterminer la vitesse initiale si le véhicule a freiné avant impact. Pour déterminer la distance parcourue lors de l'intervalle de temps de réaction de freinage, le mouvement est considéré comme uniforme et obéissant à la loi suivante :

$$V = S * t \quad (3.3)$$

dans laquelle V est la vitesse, S est la distance parcourue et t est le temps de réaction au freinage.

Pour les collisions avec piéton, si la distance d'arrêt du véhicule après freinage est connue, on utilise l'équation (3.2) pour déterminer la vitesse initiale du véhicule. Il est également possible d'utiliser la distance de projection ou de glissement du piéton et, dans plusieurs cas, une combinaison de ces dernières. On utilise alors l'équation suivante :

$$V = -\mu \sqrt{2h_0 g} + \sqrt{2\mu g(\mu h_0 + R + S)} \quad (3.4)$$

dans laquelle :

μ : coefficient de frottement;

h_0 : hauteur du centre de gravité du piéton

g : accélération gravitationnelle;
 R : distance de projection du piéton;
 S : distance de glissement du piéton.

3.4.2 Conservation de la quantité de mouvement

Selon la seconde loi de Newton, quand une force est appliquée sur un corps libre, la proportion de changement de la quantité de mouvement est proportionnelle à la force appliquée. L'équation fondamentale de la mécanique appliquée pour un corps A est :

$$F_A = m_A a_A \quad (3.5)$$

où F_A est la force appliquée, m_A est la masse et a_A est l'accélération. Comme l'accélération est égale à la dérivée de la vitesse par rapport au temps, l'équation (3.5) devient:

$$F_A = m_A (d/dt) V_A \quad (3.5.1)$$

dans laquelle V est la vitesse du corps A.

Ainsi :

$$F_A dt = m_A dV_A \quad (3.5.2)$$

La force appliquée sur le corps de masse m_A dans le temps de durée t produit donc l'impulsion I_A :

$$I_A = \int F_A dt = m_A (V_{A2} - V_{A1}) \quad (3.6)$$

Selon la troisième loi de Newton, si la force F_A du corps A est appliquée sur le corps B, alors il y aura une force de réaction F_B appliquée sur le corps A, tel que :

$$-F_A = F_B \quad (3.6.1)$$

Durant la même période, les deux impulsions seront égales bien que de signes opposés :

$$-I_A = I_B \quad (3.6.2)$$

ce qui permet d'écrire:

$$m_A (V_{A2} - V_{A1}) = m_B (V_{B2} - V_{B1}) \quad (3.7)$$

et finalement :

$$m_A V_{A1} + m_B V_{B1} = m_A V_{A2} + m_B V_{B2} \quad (3.8)$$

Le premier terme de l'équation (3.8) est la quantité de mouvement avant impact, le second terme est la quantité de mouvement après impact. L'équation (3.8) est l'équation fondamentale utilisée dans l'analyse par la quantité de mouvement des collisions de véhicules. Connaissant la trajectoire des véhicules avant et après la collision, il est possible de faire la reconstitution par la quantité de mouvement. Le calcul selon la quantité de mouvement est donc un calcul vectoriel qui permet d'obtenir :

- ♦ les vitesses à l'impact;
- ♦ le changement de vitesse delta V, nécessaire pour l'analyse des blessures. Le changement de vitesse est la résultante vectorielle des vitesses avant et après la collision. On peut aussi calculer le changement de vitesse en utilisant la restitution caractérisée par le coefficient de restitution. Ce coefficient représente le rapport entre les vitesses d'impact des véhicules sur les vitesses de séparation.

3.4.3 Coefficient de restitution

La dynamique de la collision ainsi que la sévérité des dommages des véhicules impliqués permettent parfois l'utilisation du coefficient de restitution dans le calcul de la reconstitution. La restitution est la phase entre le moment où les véhicules atteignent leurs déformations maximales suite à leur contact et l'instant où les deux véhicules se séparent. Durant la collision, les deux véhicules atteignent un point où leurs déformations sont maximales. À ce moment, les deux véhicules auront la même vitesse U et l'équation (3.8) peut alors s'écrire sous la forme :

$$(m_A + m_B)U = m_A V_{A2} + m_B V_{B2} \quad (3.9)$$

Durant la partie de déformation, l'impulsion est égale à :

$$I_{def} = m_A (V_{A1} - U) = m_B (U - V_{B1}) \quad (3.10)$$

Alors que durant la restitution, l'impulsion est égale à :

$$I_{res} = m_A (U - V_{A2}) = m_B (V_{B1} - U) \quad (3.11)$$

Le coefficient de restitution est le ratio entre l'impulsion de restitution et l'impulsion de déformation peut s'écrire :

$$e = I_{res} / I_{def} = (V_{B2} - V_{B1}) / (V_{A1} - V_{B1}) \quad (3.12)$$

Dans le cas d'une collision élastique, en d'autres termes quand les deux objets retrouvent leur état initial après la collision, le coefficient de restitution est égal à 1 (par exemple c'est le cas des boules de billard quand elles se cognent). Si la déformation est plastique, le coefficient de restitution tend vers 0. Pour une collision mi-plastique et mi-élastique, le coefficient de restitution est en général de 0.707 (R.K.NOON) [37]. Le cas mi-plastique/mi-élastique correspond au cas où les deux véhicules n'ont pas subi de grandes déformations et se séparent rapidement après le contact initial.

3.4.4 Conservation de l'énergie

La première loi de la thermodynamique stipule que l'énergie totale d'un système est conservée après transformation. Dans ce cas, le système est un système conservatif. Cette loi est utilisée dans le traitement des collisions des véhicules. Ainsi, l'énergie totale du système avant collision est égale à la somme de l'énergie totale du système après collision et du travail fourni durant l'intervalle de temps de la collision, selon l'équation suivante :

$$E_1 = E_2 + U \quad (3.13)$$

dans laquelle :

- E_1 est l'énergie totale du système avant la collision;
- E_2 est l'énergie totale du système après la collision; l'énergie totale du système inclut l'énergie cinétique et potentielle des véhicules;
- U est le travail irréversible dissipé durant la collision. Ce travail se traduit par du freinage ou du dérapage, de la déformation de la structure du véhicule ou d'autres objets tels que poteaux électriques, arbres, etc.

Cette méthode permet de déterminer comment l'énergie cinétique se dissipe dans une collision. La quantité d'énergie dissipée, l'énergie cinétique initiale ainsi que les vitesses initiales peuvent être déterminées lorsque la quantité du travail irréversible est quantifiable.

Selon le principe des travaux virtuels, l'énergie de déformation est égale à la dissipation de l'énergie cinétique. Si E_f est l'énergie de déformation et E_{cd} l'énergie cinétique dissipée, on peut écrire :

$$E_f = \int_0^L \int_0^C F dc dl = \int_0^L \int_0^C (A + Bc) dc dl = \left[AC + \frac{BC^2}{2} + \frac{A^2}{2B} \right] L \quad (3.14)$$

$E_{cd} = \frac{1}{2}M(V)^2$, et comme

$E_f = E_{cd}$, on tire finalement :

$$\Delta V = \left(C + \frac{A}{B} \right) \sqrt{\frac{BL}{M}} \quad (3.15)$$

dans laquelle :

F = force de résistance à la déformation;

A = rigidité élastique du véhicule (N/m);

B = rigidité du véhicule (N/m²);

C = déformations du véhicule (mm).

Le calcul précédent s'appuie sur l'hypothèse que la relation entre la force d'impact et les déformations est linéaire. À première vue, cette hypothèse simplificatrice va à l'encontre des lois de la mécanique des solides puisqu'en effet, la relation linéaire entre la déformation et la force n'est vérifiée que dans la phase élastique des déformations alors que, dans la phase plastique qui correspond aux déformations permanentes, la relation est non linéaire. Notons que pour les collisions de véhicules, la phase élastique des déformations correspond à des vitesses d'impact de l'ordre de $V_{imp} \sim 5$ km/h alors qu'au-delà de cette vitesse, les déformations sont plastiques. Cependant, l'hypothèse présentée précédemment a été vérifiée lors d'essais d'impact à 35 mph (56 km/h) effectués par le NHTSA sur divers modèles de véhicules contre une barrière rigide (voir tableau 3.4). Les résultats de ces essais ont été comparés avec des calculs à l'aide des logiciels CRASH3 et EDCRASH, ce qui a permis de démontrer que la relation entre le changement de vitesse et la déformation est linéaire et que la déformation résiduelle n'apparaît qu'à partir d'une vitesse de 2.5 mph (figure 3.3) (McHenry, accident reconstruction) [38].

Tableau 3.4 - Résultats des tests d'impact des véhicules à 35 mph sur une barrière rigide (McHenry, Accident Reconstitution)

VEHICLE	TEST NUMBER	WIDTH (inches)	TEST MASS (lbs)	1st TEST POINT*		2nd TEST POINT		b0 INTERCEPT (mph)	b1 SLOPE (mph/in)
				TEST SPEED (mph)	TEST RESIDUAL CRUSH (inches)	TEST SPEED (mph)	TEST RESIDUAL CRUSH (inches)		
1. 85 AUDI 5000 4DR	813	70.50	3357.00	2.50	0.00	32.00	28.60	2.50	1.14
2. 85 BMY 3181 2DR	819	64.80	3526.00	2.50	0.00	32.00	19.50	2.50	1.17
3. 85 BUICK SOMERSET 2DR	886	67.70	4210.00	2.50	0.00	34.50	26.80	2.50	1.19
4. 86 BUICK CENTURY 4DR	890	67.70	3750.00	2.50	0.00	35.20	27.80	2.50	1.17
5. 80 CADILLAC SEVILLE 4DR	425	71.40	4615.00	2.50	0.00	34.70	28.00	2.50	1.15
6. 80 CHEVROLET CHEVETTE 3DR	429	61.80	2941.80	2.50	0.00	32.20	24.30	2.50	1.23
7. 80 CHEVROLET IMPALA 4DR	466	72.20	4110.00	2.50	0.00	35.30	20.00	2.50	1.23
8. 84 CHEVROLET CORVETTE	613	71.00	3880.00	2.50	0.00	34.70	25.80	2.50	1.09
9. 84 CHEVROLET PICKUP	696	80.00	4830.00	2.50	0.00	35.20	28.00	2.50	1.23
10. 85 CHEVROLET ASTRO VAN	800	77.00	4090.00	2.50	0.00	34.80	22.00	2.50	1.27
11. 85 CHEVROLET SPECTRUM 3DR	802	63.00	2346.00	2.50	0.00	34.80	24.30	2.50	1.31
12. 85 CHEVROLET STRAIT 3DR	841	69.30	2042.00	2.50	0.00	35.10	20.40	2.50	1.40
13. 85 CHRYSLER IMPERIAL 2DR	133	69.20	4562.00	2.50	0.00	35.00	23.60	2.50	1.37
14. 79 DODGE SPORTSMAN VAN	191	71.50	4654.00	2.50	0.00	30.20	16.60	2.50	1.20
15. 85 DODGE LANCER 5DR	792	69.30	3250.00	2.50	0.00	34.70	25.10	2.50	1.28
16. 85 FORD LTD 4DR	468	74.00	4130.00	2.50	0.00	35.40	31.30	2.50	1.05
17. 85 FORD EXP 2DR	469	63.00	2500.00	2.50	0.00	35.20	20.80	2.50	1.23
18. 84 FORD PICKUP	297	77.00	4078.00	2.50	0.00	35.20	26.00	2.50	1.28
19. 85 FORD TEMPO 2DR	842	68.40	2998.00	2.50	0.00	34.10	24.80	2.50	1.31
20. 86 FORD TAURUS 4DR	944	70.40	3460.00	2.50	0.00	35.00	31.80	2.50	1.13
21. 73 HONDA CIVIC 3DR	18	59.30	2205.00	2.50	0.00	40.80	25.20	2.50	1.32
22. 84 HONDA CIVIC 4DR	659	62.20	2110.00	2.50	0.00	35.10	27.90	2.50	1.21
23. 85 HONDA ACCORD 4DR	435	62.00	2632.00	2.50	0.00	34.80	28.70	2.50	1.21
24. 85 HONDA ACCORD 4DR	857	66.40	2632.00	2.50	0.00	35.00	24.20	2.50	1.46
25. 84 ISUZU IMPULSE 3DR	843	69.00	3730.00	2.50	0.00	34.60	24.20	2.50	1.46
26. 86 ISUZU -MARK 4DR	828	61.80	2850.00	2.50	0.00	34.80	23.70	2.50	1.32
27. 83 MAZDA 626 4DR	829	69.20	2900.00	2.50	0.00	35.30	25.10	2.50	1.30
28. 86 MAZDA B2000	817	69.80	3080.00	2.50	0.00	35.00	27.00	2.50	1.20
29. 86 JEEP CJ	819	59.80	1190.00	2.50	0.00	33.10	21.10	2.50	1.23
30. 83 NISSAN PULSAR 5DR	898	63.70	2460.00	2.50	0.00	33.10	22.70	2.50	1.23
31. 84 NISSAN STANZA 4DR	693	62.20	2814.00	2.50	0.00	35.20	31.00	2.50	1.22
32. 83 PLYMOUTH RELIANT MADON	567	66.00	2930.00	2.50	0.00	34.80	26.10	2.50	1.26
33. 84 RENAULT FUSCO 2DR	463	69.60	2902.00	2.50	0.00	35.00	25.40	2.50	1.28
34. 83 TOYOTA CAMRY 4DR	596	66.00	2980.00	2.50	0.00	34.90	28.60	2.50	1.30
35. 86 TOYOTA COROLLA 2DR	282	62.50	2850.00	2.50	0.00	34.90	27.50	2.50	1.44
36. 86 VW GOLF	945	62.50	2620.00	2.50	0.00	34.90	31.80	2.50	1.18
37. 82 VOLVO DL	467	69.20	3417.00	2.50	0.00	34.90	37.30	2.50	1.11
38. 84 NISSAN 300ZX	686	66.50	3370.00	2.50	0.00	35.00	26.00	2.50	1.15

* 2.5 MPH NO CRUSH INTERCEPT ASSUMED.

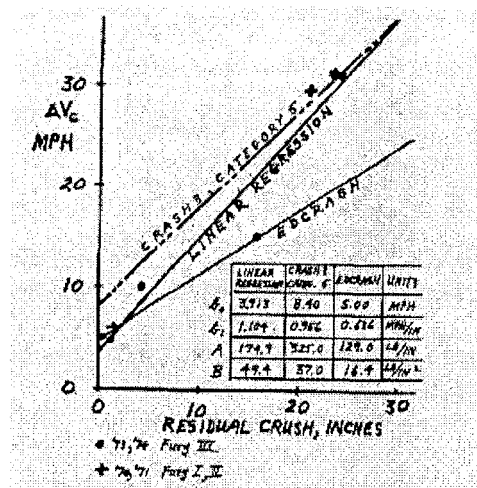


Figure 3.3 - Déformation résiduelle en fonction du delta V (McHenry, Accident Reconstitution)

À partir de ces essais d'impact, la courbe des déformations en fonction de la force d'impact a été tracée (figure 3.4) et montre que la force d'impact est linéaire en fonction des déformations résiduelles. En premier lieu, on observe une phase élastique dans laquelle les déformations ne sont pas permanentes. Durant cette phase, la force d'impact est :

$$F = AX \quad (3.16)$$

dans laquelle A est le coefficient de rigidité élastique défini précédemment.

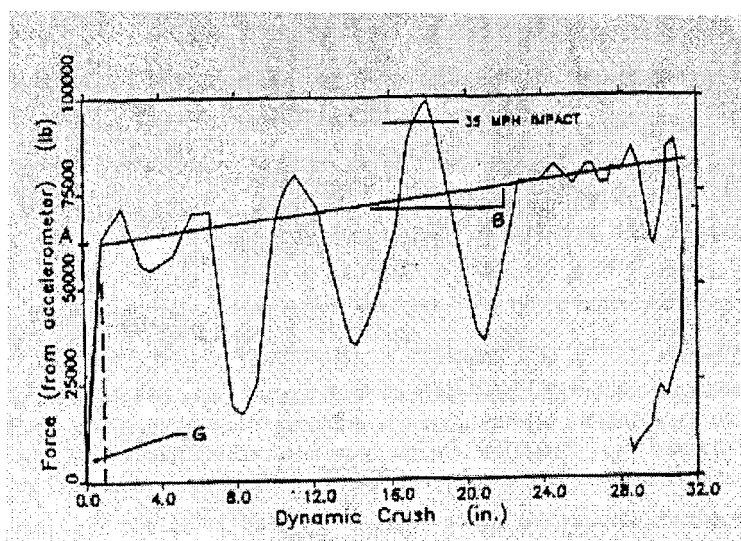


Figure 3.4 - Déformation des véhicules en fonction de la force d'impact (McHenry, Accident Reconstitution)

Puis, lorsque les déformations élastiques atteignent leurs valeurs maximales, la phase de déformation plastique débute. Durant cette phase, on relève que les déformations oscillent autour d'une droite dont la pente est le coefficient de rigidité B . La relation force vs déformation est donc essentiellement comme linéaire (voir figure 3.5).

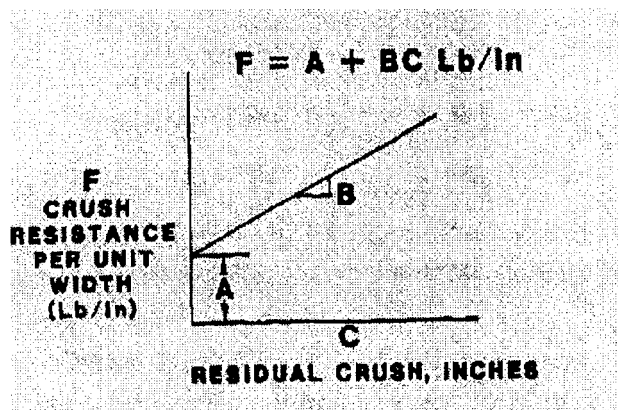


Figure 3.5 - Courbe des déformations résiduelles en fonction de la force d'impact (McHenry, Accident Reconstitution)

D'ailleurs, cette hypothèse peut être vérifiée par la mécanique des solides et les transformations mathématiques. En effet, la déformation d'un véhicule sous l'effet d'une force d'impact correspond à un flambage de la structure du véhicule. Du point de vue général, un véhicule automobile se comporte comme une canette en aluminium, qui peut être assimilée à son tour à une poutre courte. Le flambage élastique de la poutre est atteint à la force critique, appelée force d'Euler de flambage, telle que :

$$F_{cr} = KB^2 EI/L^2 \quad (3.17)$$

L'énergie de déformation fournie durant la déformation due au flambage est égale à :

$$U = KC \quad (3.18)$$

dans laquelle :

U = énergie de déformation

C = déformation de la pièce (poteau, canette, etc.)

K = force nécessaire pour le flambement des pièces, communément appelé le coefficient de rigidité.

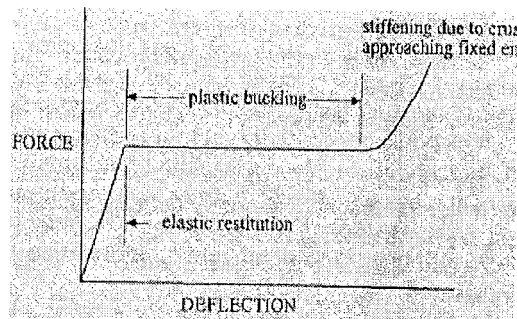


Figure 3.6 - Flambement d'une poutre, courbe force vs déformation (R.K. NOON)

Dans une collision, la dissipation de l'énergie cinétique se fait par la déformation de la structure du véhicule. Supposons un impact frontal d'un véhicule sur une barrière rigide (le même calcul présenté ci-dessous s'applique pour n'importe quel type d'impact : frontal, latérale, à angle, etc.), l'énergie cinétique dissipée durant l'impact est égale à l'énergie de déformation :

$$U = KC = \frac{1}{2} m V_{eq}^2 \quad (3.19)$$

dans laquelle :

m = masse du véhicule;

V_{eq} = vitesse d'impact du véhicule avec la barrière qui est donnée par :

$$V_{eq} = (2kc/m)^{1/2} = (2K/m)^{1/2} (C)^{1/2} \quad (3.20)$$

Comme il a été démontré que la déformation ne commence qu'à partir d'une certaine vitesse d'impact V_0 , l'équation (3.20) peut s'écrire :

$$V_{eq} = V_0 + (2K/m)^{1/2} (C)^{1/2} \quad (3.21)$$

La déformation est donc une fonction quadratique de la vitesse. Cependant, puisque les déformations mesurées en millimètres sont toujours nettement supérieures à la valeur unitaire ($C \gg 1$), on peut donc utiliser la propriété du développement limité d'une équation de type :

$(1+X)^{1/2} \sim 1+ X/2$. Et ainsi, en remplaçant le terme de déformation $(C)^{1/2}$ par $C/2$, la relation entre la vitesse et la déformation devient un relation linéaire, soit

$$V_{eq} = V_0 + (2K/m)^{1/2} C/2 , \text{ avec } (2K/m)^{1/2} = \text{constante} \quad (3.22)$$

3.4.5 Détermination des coefficients de rigidité

Pour déterminer les coefficients de rigidité, on peut assimiler un véhicule à un solide muni d'un ressort, l'ensemble monté en série. Le coefficient de rigidité du ressort est alors A et celui du solide est B. Ainsi, à partir des déformations mesurées sur un véhicule suite à un essai de collision. En effet, dans 75 % des collisions frontales avec blessures graves ou mortelles qui n'ont pu être complètement évitées par une réduction de vitesse, la sévérité des blessures a été fortement diminuée. Ce chiffre n'est toutefois que de 20 % pour les collisions latérales, mais n'atteint que 6% pour les collisions avec piétons. Ceci indique que les véhicules automobiles offrent, en général, une sécurité moins élevée pour ces deux derniers types de collisions. Notons d'ailleurs que les victimes ne portaient pas de ceintures de sécurité dans la majorité des cas de collisions frontales où les blessures n'ont pas été diminuées par le scénario de réduction de la vitesse.

Sur une barrière rigide, on peut calculer les coefficients de rigidité qui s'appliquent à ce véhicule. Les résultats de ces essais sont répertoriés sur le site de la NHTSA. L'équation (3.20) peut être écrite sous forme :

$$V = b_0 + b_1(C)^{1/2} \quad (3.23)$$

dans laquelle b_0 (m/s) et b_1 ((m/s)/s) sont les coefficients de déformation (b_0 correspond à la vitesse à laquelle il n'y a pas de déformation et b_1 correspond au ratio de déformation (vitesse d'impact divisée par la moyenne des déformations).

En remplaçant l'équation (3.23) par l'équation (3.15), on peut écrire :

$$V = \left(C + \frac{A}{B}\right) \sqrt{\frac{BL}{M}} = b_0 + b_1 \sqrt{C} \quad (3.24)$$

$$b_0 = A \sqrt{\frac{L}{BM}} \quad (3.24.1)$$

$$b_1 = \sqrt{\frac{BL}{M}} \quad (3.24.2)$$

À partir des équations (3.24.1) et (3.24.2), les coefficients A et B sont calculés à partir des coefficients de déformation à l'aide des deux formules suivantes :

$$A = \frac{b_0 b_1 M}{L} N / m \quad (3.25)$$

$$B = \frac{b_1^2 M}{L} N / m^2 \quad (3.26)$$

3.4.6 Analyse des enregistreurs embarqués

Un système SDM (Sensing Diagnostic Module) doté d'un enregistreur de données est installé depuis 1998 sur tous les véhicules de marque GM et depuis l'année 2000 sur certains véhicules de marque Ford. Il s'agit de dispositifs électroniques contrôlant le déploiement des coussins gonflables. Les impulsions mesurées par des accéléromètres durant la collision sont enregistrées par le dispositif. Le système utilise un algorithme pour lire les informations sur une période allant de 5 à 1 seconde avant la collision et décide du moment de déploiement des coussins. Le dernier temps correspond aux moments de déploiement du coussin. Les informations enregistrées par le SDM sont généralement les suivantes:

- ◆ la vitesse du véhicule préimpact (5 secondes avant l'impact);
- ◆ la vitesse du moteur (5 secondes avant l'impact, jusqu'à l'impact);
- ◆ la décélération du véhicule;

- ♦ si les freins ont été actionnés ou non;
- ♦ le changement de vitesse V sur une période de 100 millisecondes.

Il y a deux types d'enregistrement par le SDM. Le premier est l'enregistrement juste avant le déploiement des coussins, quand la collision est suffisamment sévère pour que l'algorithme de sensibilité soit enclenché, mais insuffisante pour le déploiement du coussin gonflable. L'enregistrement dans ce cas contient les données de pré-impact et d'impact. Le deuxième type d'événement est enregistré lors du déploiement des coussins gonflables. Dans ce cas, la collision est assez sévère pour que les coussins se déploient et l'enregistrement comprend les informations pré-impact et durant l'impact. Dans ce dernier cas, les données ne peuvent être effacées de la boîte et le SDM doit être remplacé lors de la réparation du véhicule.

3.4.7 Calcul de la vitesse initiale

La reconstitution de la collision a pour but de déterminer la vitesse initiale du véhicule cas. Le calcul de la vitesse se fait en général en combinant la méthode des lois de la cinématique avec celles de l'énergie ou de la quantité de mouvement, ou encore les informations recueillies au moyen du SDM avec les lois de la cinématique. Supposons par exemple que pour une collision donnée, on a obtenu le relevé des déformations du véhicule, cela nous permet de calculer par la méthode de l'énergie le changement de vitesse ΔV . Considérant le mouvement du véhicule après l'impact comme uniformément décéléré et la distance séparant le point d'impact de la position finale du véhicule étant connue, il est possible de calculer la vitesse après l'impact en utilisant les lois de la cinématique. Cette vitesse est ensuite additionnée vectoriellement avec le changement de vitesse ΔV mesuré précédemment pour déterminer la vitesse d'impact.

Dans le cas où il n'y a pas de freinage avant impact, la vitesse initiale est égale à la vitesse d'impact, sinon il faut la calculer à partir de l'équation (3.2). Dans la même logique pour chaque cas de collisions, la combinaison de deux ou trois méthodes se fait selon la disponibilité des données physiques obtenues sur les lieux de la collision. Dans certains cas, un recoupement de plusieurs méthodes permet aussi de confirmer la validité des vitesses obtenues. Par exemple, on

peut reconstituer la collision avec la méthode de l'énergie et ensuite comparer les résultats obtenus avec le relevé du SDM.

Le changement de vitesse du véhicule peut également être obtenu à partir de la reconstitution de la collision à l'aide du logiciel SLAM (ou PCCrash). Ce logiciel utilise les équations développées dans les sections précédentes pour faire les différents calculs liés à la reconstitution d'une collision. Le logiciel requiert les données suivantes pour faire le calcul selon la méthode de l'énergie ou la quantité de mouvement : dimensions et poids du véhicule (en général obtenus à partir d'une banque de données informatisées des véhicules SPECS), le nombre d'occupants, les déformations des véhicules, les coefficients de rigidité A et B des véhicules, la direction principale de la force d'impact, ainsi que les positions initiales et finales des centres de gravité des véhicules nécessaires pour le calcul de la quantité de mouvement. Le logiciel SLAM permet alors d'obtenir les forces d'impact, l'énergie dissipée ainsi que le changement de vitesse ΔV .

Cependant, il peut exister des cas particuliers où il est nécessaire de remplacer les deux coefficients de rigidité d'un véhicule par un coefficient de rigidité qui reflète mieux le mécanisme de déformation du véhicule. C'est le cas par exemple d'un impact dans lequel toute la déformation est absorbée par un seul élément structural. À ce moment, le coefficient de rigidité à considérer sera celui de l'élément structural. Pour une collision impliquant un poids lourd et un véhicule de tourisme, on considère, étant donné la grande rigidité du poids lourd par rapport à celle de l'autre véhicule, que les déformations du véhicule sont négligeables et il est alors considéré comme une barrière rigide. D'autre part, dans le cas où on ne peut pas obtenir les déformations de l'un des deux véhicules, on considère ce véhicule comme étant une barrière rigide mobile, cela constituant une approximation sécuritaire (estimé de basse vitesse) puisque l'énergie dissipée par la collision n'est en réalité pas uniquement dissipée par le véhicule dont on a obtenu les déformations, mais aussi par la barrière mobile qui subira quant à elle un changement de vitesse lors de la collision.

Pour une collision contre des arbres ou des poteaux, et dans l'impossibilité d'obtenir les déformations sur le véhicule, on considérera que l'énergie cinétique dissipée suite à la collision est égale à l'énergie nécessaire à la rupture de l'arbre par exemple s'il a été fauché. Il s'agit

encore d'une hypothèse sécuritaire qui donnera une vitesse plus basse que la vitesse réelle de la collision.

Finalement, la vitesse d'impact des véhicules avec piéton est calculée en tenant compte, soit de la distance de projection et de glissement du piéton après l'impact en utilisant les équations 4 et 4.1, ou à partir de la distance parcourue par le véhicule après l'impact en utilisant l'équation (3.2). Si le conducteur a freiné avant la collision, la distance de freinage servira à déterminer la vitesse initiale. En effet, l'énergie dissipée par la collision avec le piéton est alors considérée comme négligeable.

3.5 Scénarios de réduction de la vitesse

Les techniques de reconstitution des collisions permettent donc, à partir des données physiques mesurées sur les véhicules accidentés et la scène de la collision, de déterminer la vitesse initiale du véhicule cas ainsi que les ΔV des véhicules impliqués. Une simulation de la réduction de la vitesse à la vitesse limite légale est ensuite effectuée dans les cas où la vitesse initiale du véhicule cas est supérieure à 50 km/h. En utilisant les mêmes méthodes que celles décrites dans le calcul de la vitesse initiale, la simulation de l'effet de réduction de vitesse a pour objectif de déterminer les nouveaux changements de vitesses des véhicules. Le changement de vitesse sert alors à estimer le degré de sévérité des blessures par les cotes AIS ou à obtenir une probabilité de blessure grave ou mortelle. La comparaison des sévérités et des probabilités des blessures graves ou mortelles avant réduction et après réduction de vitesse permet alors de quantifier la diminution de la probabilité de blessures.

Ainsi, afin d'évaluer l'effet de la réduction de vitesse sur les blessures, nous avons établi la démarche d'investigation suivante :

- ♦ Dans le cas où le conducteur du véhicule cas a freiné avant l'impact et que la vitesse initiale était supérieure à 50 km/h, nous avons réétudié la collision après avoir fixé la vitesse initiale du véhicule cas à 50 km/h. En considérant les mêmes conditions d'environnement de la collision et en maintenant la même vitesse et la même trajectoire du deuxième véhicule ou la même position du piéton, nous avons reconstitué la collision de manière à déterminer si elle

aurait pu être évitée par cette réduction de la vitesse. Dans le cas contraire, nous avons déterminé, par calculs, la nouvelle vitesse d'impact et nous avons évalué son incidence sur la gravité des blessures.

- ♦ Dans le cas où il n'y a pas eu de freinage avant la collision et que la vitesse initiale était supérieure à 50 km/h, la collision a été considérée comme ayant eu lieu, mais à la vitesse de 50 km/h. Ceci a ensuite permis d'évaluer l'incidence du delta V correspondant à cette vitesse sur la gravité des blessures.

Bien entendu, dans le cas où il y a eu freinage avant l'impact, nous avons tenu compte de la distance supplémentaire de freinage permise par la distance moindre parcourue durant le temps de perception/réaction du conducteur à cause de sa vitesse plus basse. Dans le cas où la collision aurait quand même eu lieu, nous avons alors déterminé la nouvelle vitesse d'impact en évaluant la distance parcourue durant le temps de réaction au freinage de 1,5 seconde à la vitesse initiale, et nous avons ensuite évalué cette même distance avec la vitesse réduite à 50 km/h. La différence entre les deux distances a ensuite été ajoutée à la distance de freinage initiale (avant réduction de vitesse) pour obtenir la distance totale de freinage pour une vitesse de 50 km/h. Prenons l'exemple illustré à la figure 3.1 qui est calculé pour une chaussée sèche avec un coefficient de frottement de 0,75.

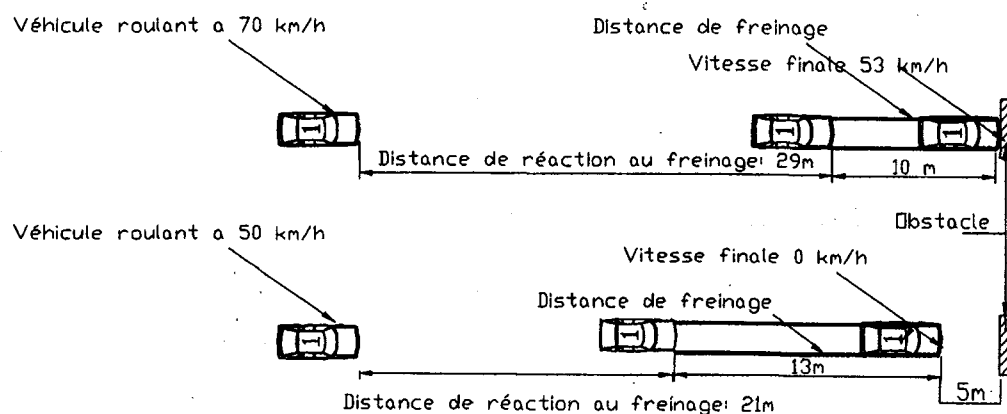


Figure 3.7 - Comparaison des longueurs de distance de freinage entre un véhicule roulant à 70 km/h et un véhicule roulant à 50 km/h (au moment de la décision de freinage, l'obstacle se situe à 39 m du véhicule)

Dans cet exemple, le véhicule qui circulait initialement à une vitesse de 70 km/h était à une distance de 39 m de l'obstacle au moment où le conducteur l'a aperçu et a décidé de freiner. Le véhicule a donc parcouru 29 m avant que le freinage n'ait effectivement débuté, cette distance étant le résultat du temps de réaction au freinage. Il ne restait alors au véhicule qu'une distance de 10 m pour éviter la collision avec l'obstacle et comme cette distance était insuffisante, l'impact se produisit à une vitesse de 53 km/h. Si, dans les mêmes circonstances, le véhicule avait circulé à 50 km/h, il n'aurait parcouru, durant la période de perception et de réaction, qu'une distance de 21 m. Comme à sa vitesse initiale de 50 km/h, il ne faut que 13 m pour immobiliser complètement son véhicule, le conducteur aurait pu immobiliser son véhicule 5 m avant l'obstacle et l'impact aurait été évité.

Pour une collision entre deux véhicules ou un véhicule et un obstacle rigide (fixe ou mobile), nous avons utilisé, par hypothèse, une relation linéaire entre la vitesse et les déformations. Ainsi, connaissant la vitesse d'impact du véhicule correspondant au premier calcul issu de la reconstitution de la collision, et connaissant la nouvelle vitesse d'impact liée à la vitesse initiale de 50 km/h, nous avons pu estimer les nouvelles déformations. Nous avons alors introduit ces nouvelles déformations dans la modélisation par logiciel SLAM pour obtenir le delta V correspondant qui est ensuite utilisé pour déterminer le degré de gravité des blessures. Notons que lors de la reconstitution de la collision, nous avons uniquement réduit la vitesse du véhicule cas mais pas celle du véhicule heurté.

D'autre part, pour un calcul effectué par la quantité de mouvement, on peut utiliser le coefficient de restitution. On estime alors le coefficient de restitution lors de la première reconstitution de la collision, puis on conserve cette valeur pour déterminer le nouveau changement de vitesse. Cela est possible en utilisant l'hypothèse suivant laquelle le coefficient de restitution est essentiellement constant à partir de 50 km/h. Cette hypothèse a été démontrée lors de divers essais expérimentaux de collisions frontales avec des barrières fixes et rigides (voir figure 3.8).

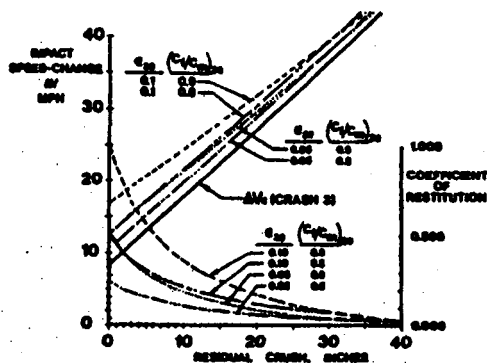


Figure 1. Restitution and Impact Speed-Change vs Crush

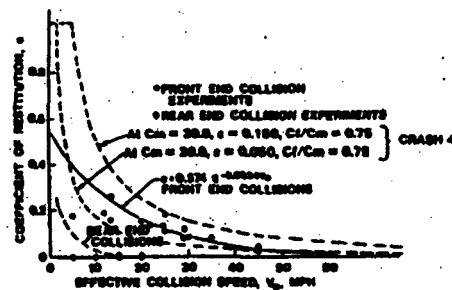


Figure 2. Restitution vs Effective Collision Speed
(From Ref. 10 (1968), with CRASH4 frontal boundary curves superimposed)

Figure 3.8 - Coefficient de restitution en fonction de la vitesse d'impact (McHenry, Accident Reconstitution)

Pour les collisions avec piéton, on détermine la nouvelle vitesse d'impact si le conducteur a freiné avant la collision en utilisant l'équation (3.2). Dans ce calcul, on tiendra compte de la distance supplémentaire de freinage disponible due à la distance parcourue, à vitesse moindre, durant le temps de réaction au freinage. Dans le cas où le conducteur n'a pas freiné avant l'impact, la nouvelle vitesse d'impact est de 50 km/h. La gravité des blessures est alors en fonction de la vitesse d'impact.

CHAPITRE IV - ANALYSE DES RÉSULTATS

L'analyse des résultats est présentée en trois étapes. Premièrement, la détermination du risque d'être impliqué dans une collision grave ou mortelle pour des vitesses spécifiques relativement au risque d'être impliqué à une vitesse de 50 km/h est présentée. En second lieu, les résultats issus des simulations de réduction des vitesses sur la gravité des blessures sont présentés suivies, en dernier lieu, des recommandations visant à améliorer la sécurité routière en milieu urbain.

La méthode d'analyse des collisions de la route en utilisant le risque relatif permet d'évaluer l'évolution du risque d'être impliqué dans une collision grave ou mortelle pour diverses tranches de vitesse. Le calcul du risque relatif s'appuie sur les vitesses des véhicules cas et des véhicules témoins. La taille et la qualité de l'échantillon sont donc des données essentielles permettant le calcul du risque relatif.

4.2 Taille et qualité de l'échantillonnage

Dans le cadre de notre étude, nous avons examiné en profondeur 39 cas de collisions et relevé 156 cas témoins à Montréal (voir tableau 4.1). L'échantillon recueilli ne rencontre toutefois pas notre objectif initial d'étudier 70 cas de collisions par année. Cette estimation était basée sur les statistiques des collisions des années précédentes ainsi que sur une évaluation sommaire du pourcentage de cas répondant à nos exigences. Dans les deux cas, notre évaluation s'est avérée erronée. Par exemple, pour 1999, les statistiques montrent que dans la région de Montréal, toutes zones de limite de vitesse confondues, il y a eu 673 blessés graves et 70 décès. Ces chiffres, en principe, nous auraient permis de recueillir le nombre de cas escomptés. Cependant, après une année d'exercice (année 2001), nous n'avons recueilli que 22 cas de collisions répondant à nos exigences, la plupart étant des collisions mortelles. De même, les cas répondant à nos exigences se sont avérés plus rares que nous ne l'avions initialement estimé. En effet, les exigences sur le type et les conditions de la collision sont très limitatives et de très nombreux cas n'ont pu être traités. Citons par exemple les cas où la consommation d'alcool, le malaise du conducteur, une poursuite policière, ou encore une manœuvre illégale étaient des facteurs accidentogènes présents. De plus, de nombreux cas de collisions avec piétons (qui sont très fréquents dans la

région de Montréal) n'ont pu être traités, les informations permettant de déterminer la vitesse initiale du véhicule cas n'ayant pas pu être relevées sur la scène.

D'autre part, et c'est bien heureux,, le nombre de collisions graves ou mortelles sur le territoire de l'île de Montréal s'est avéré anormalement faible durant l'année 2001. En effet, durant presque six mois, c'est-à-dire du mois de janvier 2001 au mois de juin 2001, nous n'avons recueilli que 5 cas de collisions. Cette situation s'est répétée en 2002 et constitue une nouvelle tendance. En 1999 et 2000, le nombre de cas de collisions était plus important et la baisse a été soudaine. En effet, selon les chiffres obtenus du Service de Police de la Ville de Montréal, seulement sept enquêtes de collisions graves ont été conduites entre janvier et mai 2001 alors que pour la même période en 2000, 32 enquêtes avaient été menées. D'ailleurs, 41 cas de collisions mortelles étaient enregistrés en 2001 dans l'île de Montréal versus 62 cas enregistrés en 2000 (source : statistiques SAAQ). Les raisons de cette diminution débordent du cadre de cette étude et nous ne nous y sommes pas attardés.

Par ailleurs, lors de notre collecte de cas en collaboration avec le SPVM, nous n'avons pas eu accès aux dossiers de collisions avec blessures graves qui ne sont pas une priorité pour les enquêteurs. En effet, les collisions couvertes par le SPVM sont pour la plupart des collisions mortelles ou impliquant des blessures très critiques. Pour remédier à cette situation, nous avons établi une collaboration avec Urgences-Santé. Malheureusement, cette collaboration ne nous a pas permis d'obtenir les cas escomptés avec blessés graves. Cela est essentiellement dû à l'absence de données physiques sur les scènes des collisions qui n'étaient plus disponibles au moment de notre intervention sur les lieux.

Ainsi, la taille de l'échantillon n'a pas été telle que prévue initialement, toutefois même si l'échantillon est petit, il n'en demeure pas moins qu'il est très représentatif pour les collisions mortelles. En effet, en 2001, sur un total de 41 cas de collisions mortelles sur l'ensemble des routes et autoroutes à Montréal, nous avons étudié 13 collisions mortelles répondant à nos critères. C'est donc un pourcentage élevé de collisions mortelles qui ont été étudiées, puisqu'il constitue 36% du total à Montréal en 2001. En 2002, la tendance est la même puisqu'en effet, nous avons étudié 14 collisions mortelles, ce qui constitue aussi un pourcentage élevé (plus de

30 %) du total de collision de ce type. Il faut noter qu'environ 10 collisions mortelles par année qui correspondent à nos critères n'ont pu être étudiées à cause du manque de traces physiques.

La distribution des collisions étudiées est donc de 21 collisions avec piéton, 12 collisions frontales et 6 collisions latérales. Ainsi, plus de la moitié des collisions analysées sont des collisions avec piéton, ce qui reflète bien l'état de la situation en milieu urbain à Montréal où ce type d'accident de la route est un fléau. Le tableau 4.1 présente un résumé de cas de collisions traités.

Tableau 4.1 - Collisions étudiées

No cas	Endroit de la collision	Date	Blessures	Type
Vit001	Jean -Talon/Canora	22/02/2001	Mortelles	Frontale
Vit002	Rue Molson	17/03/2001	Mortelles	Piéton
Vit003	Pie-IX/Monselet	01/04/2001	État critique	Piéton
Vit004	Masson/Delorimier	05/04/2001	Mortelles	Latérale
Vit005	Ste-Catherine/Alphonse D Roy	19/04/2001	Mortelles	Latérale
Vit006	St-Laurent/Dante	18/05/2001	Mortelles	Frontale
Vit007	Sherbrooke/Sheppard	16/06/2001	Mortelles	Latérale
Vit008	Av. du Parc et des Pins	13/07/2001	Mortelles	Frontale
Vit009	Sherbrooke/Assomption	18/07/2001	État critique	Frontale
Vit010	Christophe-Colomb/St-Zotique	21/07/2001	État critique	Piéton
Vit011	Cas supprimé			
Vit012	Newman/Thierry	11/08/2001	État critique	Frontale
Vit013	Ch. Bord du lac	16/08/2001	État critique	Frontale
Vit014	Rue du Parc	28/08/2001	Mortelles	Piéton
Vit015	C. Bord du Lac à l'Ile Bizard	18/09/2001	Mortelles	Frontale
Vit016	Hymus/Dorval	05/10/2001	Mortelles	Frontale
Vit017	Gouin 4 Av (Roxboro)	09/10/2001	Mortelles	Piéton
Vit018	Notre-Dame/Honoré-Beaugrand	08/11/2001	État critique	Piéton
Vit019	Berri/Roy	09/11/2001	État critique	Frontale
Vit020	Berri/Ontario	12/11/2001	État critique	Piéton

Vit021	Pie-IX/De Coubertin	25/11/2001	État critique	Piéton
Vit022	90 ^e Avenue Ville Lasalle	07/12/2001	Mortelles	Piéton
Vit023	560 Ste-Croix	08/12/2001	Mortelles	Frontale
Vit024	Brunswick/Sauternes	04/01/2002	Graves	Frontale
Vit025	Delorimier /Ste-Catherine	04/01/2002	Mortelles	Piéton
Vit026	Ontario/Du Havre	10/01/2002	Graves	Latérale
Vit027	Marien/Sherbrooke	11/01/2002	État critique	Piéton
Vit028	Sherbrooke/De La Rousselière	09/03/2002	Mortelles	Latérale
Vit029	Rachel/Jean d'Arc	13/04/2002	Mortelles	Piéton
Vit030	Grenet/De Serre	11/05/2002	Mortelles	Piéton
Vit031	Frontenac/Ontario	12/05/2002	Mortelles	Piéton
Vit032	Laverendrye/Schevchenko	06/05/2002	Mortelles	Frontale
Vit033	Sauvé/Meilleur	30/06/2002	Mortelles	Piéton
Vit034	Lacordaire/Renoir	14/06/2002	Mortelles	Piéton
Vit035	Laverendrye/De Leglise	02/07/2002	Mortelles	Piéton
Vit036	16233 Blv. Pierrefond	14/07/2002	Mortelles	Piéton
Vit037	Lachapelle/Ranger	16/07/2002	Mortelles	Piéton
Vit038	Papineau/Des Carrière	18/07/2002	État critique	Piéton
Vit039	H.Bourassa/B-Boulogne	25/10/2002	Mortelles	Latérale
Vit040	Beaubien/Languedoc	04/11/2002	État critique	Piéton

4.2 Calcul du risque relatif

Nous avons donc étudié 39 cas de collisions et observé 156 cas témoins. Étant donné que notre échantillon est de petite taille, nous avons utilisé des intervalles de vitesse de 10 km/h pour classer les cas de collisions et les cas témoins (voir figure 4.1) en fonction de la vitesse. Notons que la vitesse moyenne des cas témoins se confond avec la vitesse limite légale alors que la vitesse des collisions est distribuée sur une plus large gamme de vitesses.

L'analyse de l'échantillonnage montre qu'à partir de 80 km/h, il n'y a pratiquement pas de cas témoins. Ainsi, pour calculer le risque relatif pour les vitesses supérieures à 80 km/h, nous avons été obligés de regrouper tous les cas de collisions dont la vitesse est supérieure à 80 km/h sous un même intervalle.

On observe également que la majorité des véhicules témoins circulent à une vitesse se situant autour de la limite de vitesse légale de 50 km/h. On peut donc conclure que la vitesse moyenne en milieu urbain à Montréal se confond avec la vitesse limite.

La répartition des cas de collisions selon les intervalles de vitesse indique deux régions dans lesquelles les collisions sont concentrées. Premièrement, 25 % des collisions se situent à des vitesses inférieures à 45 km/h et la majorité d'entre elles impliquent un piéton. Deuxièmement, 60 % des collisions se situent à des vitesses supérieures à 56 km/h et la majorité d'entre elles se sont déroulées à des vitesses dépassant 80 km/h et atteignant même dans certains cas 150 km/h. Remarquons aussi que dans la zone de la vitesse limite, le taux de collisions est faible (3 collisions entre 45 et 55 km/h), ce qui est fort probablement dû au fait que les véhicules circulent alors presque tous à la même vitesse.

Tableau 4.2 - Nombre de cas de collisions et cas témoins par intervalle de vitesse

Vitesse km/h	Cas de collision	Cas témoin
<35	6	12
35-45	7	38
46-55	3	52
56-65	4	39
66-75	5	12
76-85	2	3
86-95	4	0
96-105	3	0
>105	5	0

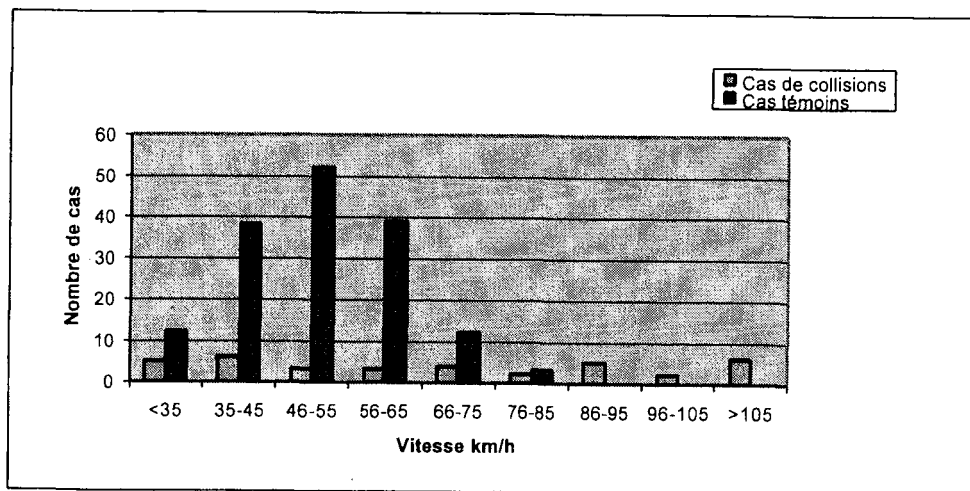


Figure 4.1 - Comparaison par tranche de vitesse du nombre de cas de collisions et du nombre de cas témoins

Le risque relatif est établi (Gart, 1964) comme étant égal au ratio du nombre de cas de collisions sur le nombre de cas témoins correspondant à une vitesse donnée divisé par le même ratio correspondant à la vitesse de 50 km/h. Ainsi, pour calculer le risque relatif d'être impliqué dans une collision à une vitesse de 60 km/h par rapport à la vitesse de 50 km/h, nous avons effectué le calcul suivant :

Vitesse	Nb. de cas de collisions	Nb. de cas témoins
60 km/h	4	39
50 km/h	3	52

$$\text{Risque relatif à 60 km/h} = (4/39)/(3/52) = 1.78$$

Le calcul du risque relatif est donné au tableau 4.3.

Tableau 4.3 - Risque relatif en fonction de la vitesse

Vitesse km/h	Nombre de cas de collisions	Nombre de cas témoins	Risque relatif	Limite inf.*	Limite sup.*
30	6	12	8,67	1,89	39,68
40	7	38	3,19	0,77	13,15
50	3	52	1	0,19	5,18
60	4	39	1,78	0,38	8,40
70	5	12	7,22	1,51	34,47
> 80	14	3	80,89	14,69	445,30

* intervalle de confiance à 95 %

Le calcul des limites de confiance à 95 % de l'estimation du risque relatif est basé sur la méthode de Gart (1964) [37]. On observe que l'intervalle des limites de confiance augmente considérablement avec l'augmentation de la vitesse. Pour les vitesses supérieures à 80 km/h, on retrouve la limite supérieure de 445 et la limite inférieure de 15, ce qui constitue une grande disparité entre les limites de l'intervalle de confiance. La taille de l'échantillon (cas témoins et cas de collisions) est probablement la cause de cette grande plage de limites de confiance qui apparaît nettement pour les cas de vitesse supérieure à 80 km/h. Toutefois, cette grande variation se justifie également par le fait qu'en principe le risque relatif pour ces vitesses tend alors vers l'infini.

L'analyse des risques relatifs permet d'observer trois zones distinctes. La première est la zone dans laquelle la vitesse de collision est inférieure à 40 km/h et où les collisions impliquent principalement des piétons. Ainsi, à 40 km/h, le risque relatif est 3 fois plus grand que le risque à 50 km/h, et à 30 km/h il est environ 9 fois plus grand que celui à 50 km/h.

La deuxième zone est celle située autour de la vitesse légale de 50 km/h. Le risque relatif est de 1 pour la zone de 50 km/h et il augmente par un facteur égal à 1,78 pour les vitesses comprises entre 56 et 65 km/h. Le faible nombre de collisions dans cette zone s'explique probablement par le fait que les automobilistes roulent en grande majorité à la même vitesse ce qui rend la circulation plus fluide. Néanmoins, la distance de freinage étant plus grande à 60 km/h qu'à 50 km/h, cette situation a des retombées négatives sur les collisions avec piétons.

La troisième zone est celle dans laquelle les vitesses sont supérieures à 70 km/h. Pour les véhicules se déplaçant à ces vitesses, le risque relatif est augmenté par un facteur de 7, alors qu'il est augmenté par un facteur d'environ 81 pour des vitesses supérieures à 80 km/h. En réalité, pour les vitesses supérieures à 80 km/h, le risque relatif tend vers l'infini puisque à partir de cette vitesse, il n'y a pratiquement pas de cas témoins relevés. C'est seulement pour des considérations de calcul que nous avons regroupé les vitesses supérieures à 80 km/h dans la même tranche de vitesse. Ceci nous permet d'obtenir une évaluation de l'augmentation du risque relatif en fonction de la vitesse (voir figure 4.2). Le risque relatif qui tend vers l'infini s'explique par le fait qu'à partir de 70 km/h, le conducteur roule beaucoup plus vite que l'ensemble des autres conducteurs, ce qui l'empêche de maîtriser son véhicule, par exemple, à l'approche d'un obstacle soudain.

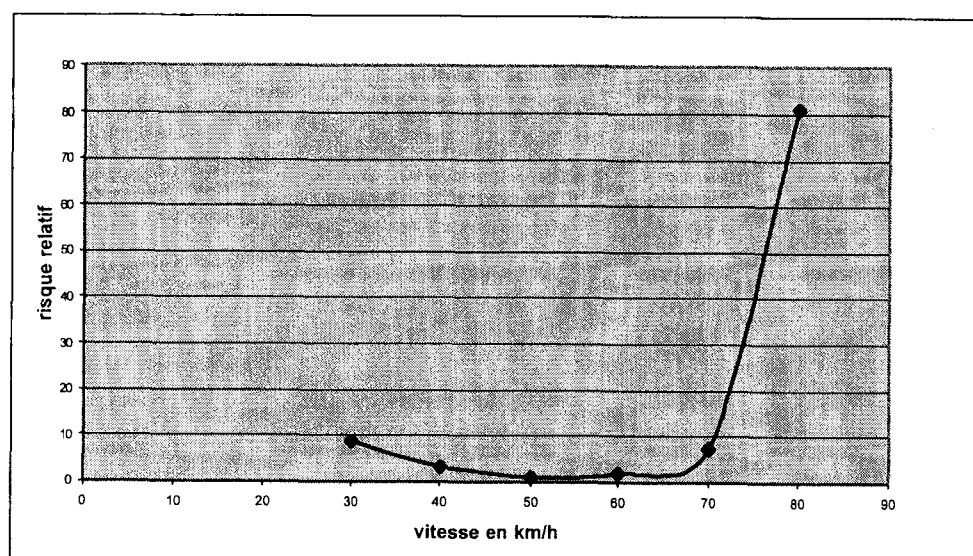


Figure 4.2 - Vitesse des véhicules en fonction du risque relatif d'être impliqué dans une collision grave ou mortelle

4.3 Effets de la réduction de la vitesse

L'étude de la réduction de la vitesse pour les collisions survenues à une vitesse supérieure à 50 km/h a permis de quantifier l'effet de cette réduction sur les blessures des victimes. Le tableau 4.4 donne un aperçu des collisions qui ont été évitées ou dont les blessures ont été

fortement diminuées en réduisant la vitesse à 50 km/h. Lorsque l'effet de réduction de vitesse n'était que marginal ou faible sur la sévérité des blessures, notre analyse concluait qu'aucun effet substantiel ne pouvait être accordé au fait de circuler à la limite de vitesse permise. Le terme (blessures fortement diminuées) est utilisé quand on constate qu'après réduction de vitesse il y a eu une diminution de la cote AIS de la valeur 3 à 6 à une cote AIS de 2 ou moins.

L'analyse des résultats avant/après réduction de la vitesse montre une diminution de **44 %** (17 cas sur 39) des collisions avec des blessures graves ou mortelles sur l'ensemble des collisions étudiées. Ce chiffre inclut les collisions évitées par une réduction de vitesse (9 cas) et celles pour lesquelles les blessures ont été fortement diminuées (8 cas). Ces résultats sont présentés dans le tableau 4.5.

Évidemment, les scénarios de réduction de vitesse ne concernent que les collisions pour lesquelles les vitesses initiales des véhicules cas dépassaient 50 km/h. Ces collisions totalisent 23 cas sur l'ensemble des collisions étudiées, soit un pourcentage de 59 %. L'analyse des résultats indique que sur ces 23 cas, il y a 8 cas où les blessures ont été fortement diminuées et 9 autres cas où les collisions ont été évitées. Pour les situations où la vitesse initiale excède 50 km/h, on peut conclure qu'on obtiendrait une réduction de **74 %** (17 cas sur 23) des collisions avec blessures graves ou mortelles si les automobilistes avaient circulé à une vitesse de 50 km/h. Les collisions graves ou mortelles qui n'ont pas été évitées par une réduction de vitesse et où les blessures non pas été fortement diminuées sont principalement des collisions avec piéton et des cas d'impacts latéraux. Une classification par type de collisions des 18 cas où les collisions ont été évitées, ou encore les blessures ont été fortement diminuées indique une réduction de **83 %** des collisions frontale (10 cas sur 12), de **33 %** des collisions latérale (2 cas sur 6) et de **23 %** des collisions avec piéton (5 cas sur 21). L'ensemble de ces résultats est présenté au tableau 4.6.

Tableau 4.4 - Effet de la réduction de la vitesse à 50 km/h

Cas	Blessures	V _i (km/h)	Réduction	Effet de la réduction
Vit001	Mortelles	62	Oui	Aucun
Vit002	Mortelles	108	Oui	Collision évitée
Vit003	État critique	47	Non	Aucun
Vit004	Mortelles	34	Non	Aucun
Vit005	Mortelles	158	Oui	Blessures fortement diminuées
Vit006	Mortelles	115	Oui	Blessures fortement diminuées
Vit007	Mortelles	55	Oui	Aucun
Vit008	Mortelles	72	Oui	Blessures fortement diminuées
Vit009	État critique	77	Oui	Blessures fortement diminuées
Vit010	État critique	67	Oui	Collision évitée
Vit011	Cas supprimé			
Vit012	État critique	101	Oui	Collision évitée
Vit013	État critique	93	Oui	Blessures fortement diminuées
Vit014	Mortelles	38	Non	Aucun
Vit015	Mortelles	118	Oui	Collision évitée
Vit016	Mortelles	95	Oui	Blessures fortement diminuées
Vit017	Mortelles	37	Non	Aucun
Vit018	État critique	41	Non	Aucun
Vit019	État critique	64	Oui	Blessures fortement diminuées
Vit020	État critique	62	Oui	Blessures fortement diminuées
Vit021	État critique	39	Non	Aucun
Vit022	Mortelles	105	Oui	Aucun
Vit023	Mortelles	27	Non	Aucun
Vit024	Graves	96	Oui	Collision évitée
Vit025	Mortelles	25	Non	Aucun
Vit026	Graves	22	Non	Aucun
Vit027	État critique	46	Non	Aucun
Vit028	Mortelles	94	Oui	Collision évitée
Vit029	Mortelles	21	Non	Aucun
Vit030	Mortelles	70	Oui	Aucun
Vit031	Mortelles	43	Non	Aucun
Vit032	Mortelles	102	Oui	Collision évitée
Vit033	Mortelles	57	Oui	Aucun
Vit034	Mortelles	70	Oui	Collision évitée
Vit035	Mortelles	66	Oui	Aucun
Vit036	Mortelles	45	Non	Aucun
Vit037	Mortelles	79	Oui	Collision évitée
Vit038	État critique	95	Oui	Aucun
Vit039	Mortelles	40	Non	Aucun
Vit040	État critique	27	Non	Aucun

Tableau 4.5 - Comparaison avant et après réduction de vitesse

Vitesses (km/h)	Cas de collisions avant réduction de vitesse	Cas de collisions évitées après réduction de vitesse	Cas de collisions avec des blessures fortement diminuées après réduction de vitesse
<35	6	0	0
35-45	7	0	0
46-55	3	0	0
56-65	3	0	2
66-75	5	2	1
76-85	2	1	1
86-95	4	1	2
96-105	3	2	0
>105	6	3	2
Total	39	9	8

Tableau 4.6 - Taux de réduction des collisions après réduction de vitesse par type de collisions

Type de collisions	Cas avant réduction	Cas évitées après réduction	Cas avec blessures fortement diminuées après réduction	Taux de réduction des collisions*
Toutes les collisions	39	9	8	44%
Collisions à des vitesses > 50km/h	23	9	8	74%
Collisions frontales	12	4	6	83%
Collisions latérales	6	1	1	33%
Collisions avec piétons	21	4	1	23%

* le taux de réduction des collisions est la somme des collisions évitées après réduction de vitesse et celles où les blessures ont été fortement diminuées divisée par le nombre de collisions avant l'application de la réduction de vitesse [44 % = (9+8)/39].

Par ailleurs, les résultats montrent que la sécurité générale des véhicules circulant à la vitesse légale en milieu urbain est particulièrement élevée en cas de collision frontale. En effet, dans 75 % des collisions frontales avec blessures graves ou mortelles qui n'ont pu être complètement évitées par une réduction de vitesse, la sévérité des blessures a été fortement diminuée. Ce chiffre n'est toutefois que de 20 % pour les collisions latérales, mais n'atteint que 6 % pour les

collisions avec piétons (voir tableau 4.7). Ceci indique que les véhicules automobiles offrent, en général, une sécurité moins élevée pour ces deux derniers types de collisions. Pour les collisions latérales, l'incompatibilité entre les véhicules de tailles différentes est souvent à blâmer pour la sévérité des blessures. De même, pour les collisions avec piétons, il faut noter que des vitesses d'impact de seulement 25 km/h peuvent être suffisantes pour potentiellement causer des blessures graves, voire mortelles.

Tableau 4.7 - Pourcentage de collisions où les blessures ont été fortement diminuées, par type de collisions

Type de collisions	Collisions frontales	Collisions latérales	Collisions avec piétons
Collisions qui se sont produites même avec une réduction de vitesse	8	5	17
Collisions avec blessures fortement diminuées	6	1	1
Taux de réduction	75 %	20 %	6 %

4.4 Analyse et recommandations

Le calcul du risque relatif a montré qu'à partir de 80 km/h, celui-ci tend vers l'infini. Ceci signifie que le risque d'être impliqué dans une collision grave ou mortelle est très élevé pour des vitesses supérieures de 30 km/h à la limite de la vitesse en milieu urbain. En dessous de 70 km/h, la courbe du risque relatif devient une courbe en U. Cette observation rejoint les résultats de l'étude de Solomon [8] qui indique une augmentation du nombre de collisions à basse vitesse. D'après Solomon, les véhicules circulant très en dessous de la vitesse moyenne sont des obstacles pour la fluidité du trafic et sont cause de collisions. Cela pourrait être le cas pour nos résultats; cependant, les collisions survenues à Montréal à basse vitesse sont généralement avec piétons et cette situation montre que ce n'est pas essentiellement la basse vitesse de circulation des véhicules qui est la principale cause de ces collisions.

Tel que vu précédemment, une réduction à 50 km/h de la vitesse en circulation libre des véhicules impliqués dans les collisions étudiées aurait permis d'éviter un important pourcentage des collisions mortelles ou graves. Ces dernières auraient alors été complètement évitées ou encore la sévérité des blessures subie par les victimes aurait alors été fortement diminuée.

L'analyse des collisions complètement évitées avec réduction de vitesse (4 cas de collisions frontales et 4 cas de collisions avec piétons et 1 cas de collision latérale) permet de faire ressortir qu'il y avait toujours présence de freinage avant l'impact. Puisque la distance nécessaire pour immobiliser le véhicule dépend de sa vitesse, l'étude de réduction de vitesse a montré, pour ces cas où le conducteur a initialement tenté de freiner, qu'une conduite à la vitesse légale aurait permis d'éviter la collision. En effet, la distance parcourue durant le temps de réaction au freinage est grandement réduite si le conducteur circule à une vitesse moindre et la distance supplémentaire alors disponible permet au conducteur d'arrêter son véhicule avant l'obstacle. On note par exemple que la distance de freinage d'un véhicule roulant à une vitesse de 80 km/h est supérieure d'un facteur d'environ de 2.5 à celle d'un véhicule roulant à 50 km/h, ce qui est considérable. Il est également utile de souligner que la géométrie de la route et l'environnement routier en milieu urbain ne favorisent pas la conduite à haute vitesse. Ceci est particulièrement bien illustré par les collisions VIT015, VIT024 et VIT032 qui se sont produites à des vitesses élevées. La perte de contrôle par les conducteurs est due à l'apparition d'une géométrie de la route qui ne garantit pas la sécurité pour des vitesses élevées. Les scénarios de réduction de vitesse ont démontré que si ces conducteurs avaient utilisé une vitesse maximale de 50 km/h, les collisions auraient été évitées.

Les collisions non évitées, même avec réduction de vitesse, mais dont les blessures ont été fortement diminuées, sont généralement celles où le conducteur n'a pas freiné avant la collision. En général, il s'agit de collisions frontales (6 cas de collisions frontales et 1 cas de collisions latérales et 1 cas pour les collisions avec piétons).

Au cours des dernières décennies, la sécurité des véhicules automobiles a été grandement améliorée, particulièrement pour les collisions frontales. En effet, les décélérations subies par les occupants en cas d'impact ont été grandement diminuées par l'amélioration de la capacité

d'absorption de l'énergie par les véhicules ainsi que l'addition ou l'amélioration des dispositifs de retenues tels que les coussins gonflables et les ceintures de sécurité. Ces derniers dispositifs diminuent considérablement les risques que les occupants entrent en contact avec une composante de l'habitacle lors de la collision. Cependant, ces améliorations ont été conçues pour des vitesses d'impact de l'ordre de 48 km/h (vitesse d'impact normalisée utilisée par les manufacturiers lors d'essais contre une barrière rigide), ce qui explique sans doute en partie pourquoi les occupants peuvent encore subir des blessures graves, voire mortelles à plus haute vitesse. D'ailleurs, on constate que dans 75 % des collisions frontales qui n'ont pu être évitées par une réduction de vitesse, les blessures ont été fortement diminuées. Les cas où les blessures n'ont pas pu être diminuées sont principalement des cas où les victimes ne portaient pas de ceintures de sécurité.

Par contre, pour les impacts latéraux, la sécurité offerte aux occupants est moindre. En effet, dans seulement 20 % des collisions latérales non évitées par la réduction de vitesse, les blessures auraient été fortement diminuées, comparativement à 75 % pour les collisions frontales. Dans le cas des collisions latérales, l'impact se produit au niveau des portières dont la structure légère les rend moins résistantes à une forte force d'impact. La proximité de la position de l'occupant par rapport aux portières implique également que le corps de ce dernier entrera souvent en contact direct avec l'intérieur du véhicule (portières enfoncées) lors d'une intrusion suite à un impact latéral. En plus du contact avec les portières déformées, la probabilité que l'occupant entre en collision avec une composante de l'habitacle augmente sensiblement, car le déplacement de ce dernier à l'intérieur du véhicule n'est pas limité par la ceinture de sécurité. D'autre part, la présence de renforts latéraux ne limite pas suffisamment l'intrusion lors des impacts latéraux, surtout lorsque les véhicules sont de tailles différentes. Par conséquent, la sévérité des blessures dues à des collisions latérales a moins tendance à être diminué lorsque l'on réduit la vitesse. Ainsi, sur les 6 cas de collisions latérales étudiées, les blessures auraient pu être diminuées par une réduction de vitesse dans seulement 2 cas. Dans ces deux cas de collisions, les véhicules étaient de même gabarit. Dans les cas VIT007 et VIT039, les victimes étaient d'un âge avancé et une réduction de vitesse n'aurait pas permis de diminuer la sévérité des blessures, et ce même si les véhicules impliqués étaient de même gabarit. En fait, les victimes étaient alors particulièrement vulnérables vu leur âge. Les autres cas de collisions latérales où les blessures

n'ont pas été diminuées par le scénario de réduction de vitesse sont ceux qui se sont produits entre deux véhicules de tailles différentes. En effet, la différence énorme de rigidité entre un véhicule plus lourd (camion, autobus, véhicules sport utilitaires, etc.) et un véhicule de tourisme explique la forte intrusion, même à basse vitesse, du plus petit véhicule heurté. La non-compatibilité entre ces deux véhicules augmente alors l'intrusion ainsi que la décélération subit par les occupants du plus petit véhicule, ce qui augmente généralement la sévérité des blessures (cas VIT004 et VIT026 par exemple).

Le nombre de collisions avec piétons est important dans l'échantillon puisqu'il représente 21 cas sur les 39 étudiés. La plupart des collisions avec piétons étudiées se sont produites à basse vitesse. Souvent le piéton avait mal évalué la vitesse du véhicule s'approchant et tenté quand même de traverser la voie de circulation, c'est donc une mauvaise perception du piéton qui est à l'origine de la collision, ce qui représente un danger car même à des vitesses de l'ordre de 25 km/h, les blessures du piéton sont graves, voire mortelles. On note que pour tous les cas étudiés de collisions avec piétons, ces derniers n'ont pas respecté les règles de la sécurité routière (traverser au feu rouge, traverser la route dans un endroit non prévu pour le passage de piéton). La gravité des collisions avec piétons n'a pas non plus été beaucoup diminuée par l'application du scénario de réduction de vitesse. En effet, nos résultats indiquent que dans seulement 6 % des collisions avec piétons non évitées par la réduction de vitesse, les blessures ont été fortement diminuées (dans un seul cas, VIT020, la nouvelle vitesse d'impact n'aurait été que de 23 km/h et les blessures auraient été fortement réduites). On note de plus que la conception des véhicules est à la base des blessures graves aux piétons. Même si les véhicules d'aujourd'hui sont plus sécuritaires pour les occupants, il n'en demeure pas moins qu'ils n'offrent aucune protection particulière en cas d'impact avec un piéton.

Les manufacturiers automobiles travaillent toutefois actuellement à améliorer ces problématiques. En effet, la tendance actuelle est au développement de dispositifs de coussins gonflables latéraux de plus en plus sophistiqués et des fabricants européens développent présentement des structures avant de véhicule (capot moteur, pare-brise et pare-chocs) moins agressifs et absorbant mieux l'impact de la tête lors de collisions avec un piéton ou un cycliste.

Étant donné la faible diminution des blessures aux piétons par l'application d'un scénario de réduction de la vitesse, il apparaît clairement que la sécurité des piétons en milieu urbain est une problématique qui ne peut être solutionnée uniquement par une sensibilisation accrue des conducteurs au respect de la limite de vitesse. Sur le territoire de l'île de Montréal, il faudrait sans doute également s'attaquer à la témérité et l'imprudence caractéristiques des piétons ainsi qu'aux problèmes souvent observés de mauvaise entente entre piétons et automobilistes.

Ainsi, l'ensemble des résultats tend à confirmer la validité de la limite de vitesse de 50 km/h en milieu urbain, cette vitesse correspondant à la vitesse moyenne choisie par les conducteurs. En effet, suite aux scénarios de réduction de vitesse, on note une diminution de 83 % pour les collisions frontales, de 33 % pour les collisions latérales ainsi que de 23 % pour les collisions avec piétons. La réduction avec piéton est la plus modeste, mais elle est quand même substantielle. La réduction la plus spectaculaire se retrouve dans les cas de collisions frontales où les caractéristiques de sécurité des véhicules sont plus à même de limiter les blessures.

Suite à ces constatations, les recommandations suivantes peuvent être émises :

1. La limite de vitesse de 50 km/h en milieu urbain semble valide et devrait être renforcée par un contrôle policier plus sévère.
2. Des campagnes de sensibilisation visant l'amélioration du comportement téméraire et imprudent des piétons montréalais devraient être conduites.
3. Les initiatives des manufacturiers visant l'amélioration de la protection des occupants en cas d'impacts latéraux ainsi que l'amélioration du design des structures avant des véhicules en cas d'impact avec un piéton ou un cycliste doivent être encouragées.

CONCLUSION

La méthodologie adoptée dans cette étude a permis de quantifier la possibilité de réduction des collisions avec blessures graves ou mortelles en milieu urbain, dans le cas où les conducteurs respecteraient la vitesse limite légale de 50 km/h. Les résultats obtenus indiquent que le risque d'être impliqué dans une collision grave ou mortelle est multiplié par un facteur de 81 lorsque les conducteurs circulent à une vitesse dépassant de 30 km/h et plus la vitesse limite, alors que le risque est multiplié par 8 pour des vitesses dépassant de 20 km/h la vitesse limite. La courbe du risque relatif confirme la relation en U entre la vitesse et le risque, suggérant que ce dernier est élevé à des vitesses plus basses ainsi qu'à des vitesses plus élevées que la moyenne. En ce qui concerne les collisions avec piétons qui surviennent souvent à plus basse vitesse que la limite légale, on note que c'est généralement l'imprudence ou la témérité du piéton qui est à blâmer.

Cette étude de l'effet de réduction de la vitesse en milieu urbain indique qu'on obtiendrait une réduction de 44 % des collisions avec blessures graves et mortelles si l'ensemble des conducteurs respectait la vitesse maximale de 50 km/h. De plus, on obtiendrait une réduction encore plus importante de 74 % dans le cas des collisions graves et mortelles impliquant le groupe des automobilistes circulant plus rapidement que la vitesse limite.

Cette étude confirme la validité de la vitesse légale de 50 km/h en milieu urbain au Québec. Plus spécifiquement, les résultats obtenus indiquent que grâce à une réduction de vitesse à 50 km/h, on obtiendrait une réduction de 83 % des collisions frontales avec des blessures graves ou mortelles, de 33 % des collisions latérales et de 23 % des collisions avec piétons.

D'autre part, l'étude confirme que la sécurité des véhicules automobiles est excellente pour les collisions frontales pour des véhicules roulant à une vitesse de 50 km/h et dont les occupants portent la ceinture de sécurité. On relève d'ailleurs que dans 75 % des collisions frontales avec blessures graves ou mortelles qui n'ont pas pu être évitées par une réduction de vitesse, les blessures ont été fortement diminuées. Ce chiffre n'est toutefois que de 20 % pour les collisions latérales et il est encore plus faible pour les collisions avec piétons (6%). La sécurité des

véhicules automobiles pour les impacts latéraux et avec piétons doit donc être considérée avec attention.

En fin de compte, il est clair que les collisions avec piétons constituent un problème de sécurité routière en milieu urbain, particulièrement à Montréal. Le renforcement du contrôle policier pour l'application de la limitation de vitesse devrait donc impérativement être accompagné de mesures visant la sensibilisation des piétons aux dangers d'un comportement délinquant.

RÉFÉRENCES

- [1] Bowie, N., Walz, M., Data Analysis of the Speed-Related Crash Issue. Paper presented to 13th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Paris, 47 Nov. 1991.
- [2] Harworth, N., Rechnitzer, G., Description of Fatal Crashes Involving Various Causal Variables. Department of Transport, Federal Office of Road Safety, CR 119, Canberra, Australia, 1993.
- [3] Joksh, H.C., An Empirical Relation Between Fatal Accident Involvement per Accident Involvement and Speed. Accident Analysis and Prevention, 7(2), 1975.
- [4] Kloeden, C.N., Mclean, A.J., Moore, V.M., Ponte, G., Traveling Speed and the Risk of Crash Involvement. NHMRC Road Accident Research Unit, The University of Adelaide, Australia, 1997.
- [5] Walz, F.H., Hoelfiger, M., Fehlmann, W., Speed Limit Reduction from 60 km/h to 50 km/h and Pedestrian Injuries. Twenty-Seventh Stapp Car Crash Conference, SAE, 1983.
- [6] Moore, V.M., Dolinis, J., Woodward, A.J., 1995. Vehicle Speed and Risk of a Sever Crash. Epidemiology; 6(3): 258-62
- [7] Anderson, R.W.G, Mclean, A.J., Farmer, M.J.B, Lee, B.H, Brooks, C.G., Vehicle Travel Speeds and the Incidence of Fatal Pedestrian Crashes. National Health and Medical Research Council Road Accident Research Unit, University of Adelaide, Australia, 1997.
- [8] Solomon, D., Accidents on Main Rural Highways Related to Speed, Driver and Vehicle. Washington, DC: US Department of Commerce and Bureau of Public Roads, 1964.

- [9] Cirillo, J.A., Interstate System Accident Research: Study II, Interim Report II. Public Roads, 1968.
- [10] West, L.B. et Dunn, J.W., Accidents Speed Deviation and Speed Limits. Traffic Engineering, 1971.
- [11] Garber, N.J., Gadirau, R., Speed Variance and its Influence on Accidents. Washington, DC: AAA Foundation for Traffic Safety, 1988.
- [12] Quimby, A., Maycok, G., Palmer, C. et Butterss, S., The Factors that Influence a Drivers Choice of Speed - A Questionnaire Study. Transport Research Laboratory, UK, 1999.
- [13] Baruya, A., Finch, D.J., Wells, P.A., A Speed-Accident Relationship for European Single-Carriageway Roads. Transport Research Laboratory, UK, 1999.
- [14] Brault Maxime, Enquête pilote : Relevés de vitesse sur les routes du Québec. Société de l'assurance automobile du Québec (1995).
- [15] Nordhoff, S. Lawrence Jr., and Emori Richard. Collision Dynamics of Vehicles and Occupants, ASPEN Publication, 1996.
- [16] Evans Leonard. Double Pair Comparison- A New Method to Determine How Occupant Characteristics Affect Fatality Risk in Traffic Crashes, Accident Analysis and Prevention, 18, No. 3, pp. 217-227, 1986.
- [17] Joksh, C. Hans. Velocity Change and Fatality Risk in a Crash - a Rule of Thumb, Accident Analysis and Prevention, 25, No. 1, pp. 103-104, 1992.
- [18] Evans Leonard. Safety Belt Effectiveness: The Influence of Crash Severity and Selective Recruitment, Leonard Evans, Accident Analysis and Prevention, 28, No. 4, pp 423-433, 1996.

- [19] Krafft M., et al. Injury as a Function of Change of Velocity- An Alternative Method to Derive Risk Functions, Imech 2000, C567/039/2000, Folksam Research, Stockholm, Sweden, 2000.
- [20] Roberts, L., and Compton, P. Charles, The Relationship Between delta V and Injury, Stapp-Car Crash, 933111, 1993.
- [21] Langdwieder, K, et al., Comparison of Passenger Injuries in Frontal Car Collisions with Dummy Loadings in Equivalent Simulations, Stapp Car Crash, 791009, 1979.
- [22] Winnicki, John et Eppinger, Rolf. A Method for Estimating the Effect of Vehicle Crashworthiness Design Changes on Injuries and Fatalities, NHTSA 1998.
- [23] Rouhana, Stephen W. and Foster, Mary E. Lateral Impact- An Analysis of the Statistics in the NCSS, Stapp Car Crash, 851727, 1985.
- [24] Miltner, E., et al., About the Threshold for Fatal or Potentially Fatal Injuries in Car-to-Car Side Collisions, Stapp Car Crash, 912897, 1991.
- [25] Schneider, Helgo, Beier, Gundolf. Experiment and Accident: Comparison of Dummy Test Results and Real Pedestrian Accidents, 18th Stapp Car Crash Conference, 741177, 1974.
- [26] Niederer, Peter F., and al. The Reliability of Anthropometrics Test Devices for Cadavers, and Mathematical Models as Pedestrian Surrogates, International Congress and Exposition, Detroit, 830184, 1983.
- [27] Pritz, Howard B. Experimental Investigation of Pedestrian Head and Fenders of Production Vehicles, International Congress and Exposition, Detroit, 830055, 1983.
- [28] SAE HANDBOOK Volume 3, 1995.

- [29] Johansson, G., Rumar, K., Drivers' Brake Reaction Times. Human Factors, 13(1), p. 23-27, 1971.
- [30] Wortman, R.H. and Matthias, J.S., An Evaluation of Driver Behavior at Signalized Intersections. Transportation and Traffic Institute, Final report, 1983.
- [31] Triggs, T.J. and Harris, E.G., Reaction Time of Drivers to Road Stimuli. Clayton, Australia, Monash University Human Factors Group, HFR-12, 1982.
- [32] Olson, P.L., Cleveland, D.E., Fancher, P.S., Kostyniuk, L.P. and Schneider, L.W., Parameters Affecting Stopping Sight Distance. National Cooperative Highway Research Program, 270, 1984.
- [33] McGehee, V.D., Mazzae, E., Baldwin, S., Examination of Drivers' Collision Avoidance Behavior on Iowa Driving Simulator. NHTSA, 2000.
- [34] McLean, A.J, Anderson, R.W.G., Farmer, M.J.B., Lee, B.H., Brooks, C.G., Vehicle travel speeds and the incidence of fatal pedestrian collisions. Volume 1. Canberra: Federal Office of Road Safety, Australian Department of Transport; Report No: CR146, 1994.
- [35] Noon, R.K., Engineering Analysis of Vehicular Accidents. CRC Press
- [36] McHenry, R.R., McHenry, B.G., Accident Reconstruction. McHenry Software.
- [37] Gart, J., Approximate Confidence Limits for the Relative Risk. J.R. Statistical Society, B. 24; 454-63, 1962.