

Effets de l'écoconduite sur le risque de collision des conducteurs de véhicules utilitaires

Robyn D. Robertson, Milad Delavary, Craig Lyon, Ward Vanlaar
JUIN 2023

FONDATION DE RECHERCHE SUR LES BLESSURES DE LA ROUTE

FRBR



La source de connaissances pour une conduite sûre

Fondation de recherche sur les blessures de la route

La vision de la Fondation de recherche sur les blessures de la route (FRBR) est de s'assurer que les gens qui utilisent les routes rentrent chez eux en toute sécurité chaque jour en éliminant les décès sur la route, les blessures graves et leurs coûts sociaux. La mission de la FRBR est d'être une source de connaissances pour la sécurité des usagers de la route et un chef de file mondial en matière de recherche, de développement de programmes et de politiques, d'évaluation et de transfert de connaissances. La FRBR est un organisme de bienfaisance canadien enregistré qui dépend de bourses, de contrats et de dons afin d'offrir des services au public. Pour plus d'informations, visitez www.tirf.ca.

Remerciements

La présente étude a été commandée par le [Programme de transport écoénergétique de marchandises](#) de Ressources naturelles Canada.



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

Fondation de recherche sur les blessures de la route

171, rue Nepean, bureau 200

Ottawa (Ontario) K2P 0B4

Tél. : 613-238-5235

Courriel : tirf@tirf.ca

ISBN | 978-1-77874-009-1

© Fondation de recherche sur les blessures de la route 2023

Résumé

Le présent document examine l'effet de l'adoption par les conducteurs de véhicules utilitaires de techniques de conduite écoénergétiques (c'est-à-dire l'écoconduite) sur la probabilité d'être impliqués dans des événements de freinage brusque et de contrôle de la stabilité et des collisions. Les événements de freinage brusque et de contrôle de la stabilité sont enregistrés en réponse, respectivement, à des changements soudains et importants de la vitesse et à une déviation du véhicule par rapport à l'itinéraire prévu. La distance totale parcourue, le nombre total de trajets effectués par un conducteur au cours desquels il a dépassé la limite de vitesse affichée (110 km/h ou 120 km/h) à tout moment, ainsi que le score ISAAC (pour les entreprises ayant utilisé la solution d'ISAAC Instruments) servent de mesures de la conduite écoénergétique et de l'exposition au risque, afin de quantifier les effets d'un style de conduite « écoénergétique » sur les épisodes de freinage brutal observés. Pour rappel, le score ISAAC est établi sur une échelle de 0 à 100 et mesure le degré d'utilisation de la puissance du moteur par le conducteur en fonction des conditions de conduite.

Des modèles statistiques logit ont été élaborés pour estimer le changement de probabilité d'un accident évité de justesse ou d'une collision pour les conducteurs en fonction de leur style de conduite. Les résultats ont révélé qu'une augmentation d'une unité du score ISAAC était associée à une réduction respectivement de 7 %, 8 %, 8 % et 4 % des risques de freinage brusque, de virage serré à gauche, de virage serré à droite et de collision. De plus, la conduite à vitesse supérieure proche de 101 kilomètres par heure (km/h) peut réduire de 34 % le nombre d'événements liés au contrôle de la stabilité. En outre, une augmentation de l'âge du conducteur ainsi qu'une hausse de 1 % du temps passé à conduire en utilisant le régulateur de vitesse ont réduit le nombre de freinages brusques de 9 % et de 3 %, respectivement. En conclusion, l'application de techniques de conduite écoénergétique peut améliorer la sécurité des conducteurs de véhicules utilitaires et entraîner des économies de carburant. Ressources naturelles Canada offre des formations à la conduite écoénergétique de véhicules utilitaires, notamment le cours en ligne Conducteur averti pour le camionnage routier.

Table des matières

Résumé.....	i
Introduction.....	1
Analyse documentaire.....	1
Vitesse du véhicule.....	2
Profil de vitesse.....	4
Choix de l’itinéraire.....	9
Systèmes de conduite automatisée.....	12
Technologies de surveillance.....	13
Méthodologie.....	14
Objectif.....	14
Population de l’étude.....	14
Collecte des données.....	15
Analyse des données.....	16
Résultats.....	17
Conclusion et discussion.....	19
Ouvrages de référence.....	20

Tableaux

Tableau 1 Haworth et Symmons, 2001 : Résumé des facteurs.....	2
Tableau 2 Exemples de conduite écoénergétique (Energy Savings Trust, 2016, p. 3).....	5
Tableau 3 Aspects de l’écoconduite et incidences.....	8
Tableau 4 Résultats de la régression logit pour différents seuils.....	18
Tableau 5 Risque de collisions; résultats de la régression logit.....	18

Figures

Figure 1 Relation entre le FMA et la géométrie des courbes horizontales selon le manuel de sécurité routière HSM.....	11
---	----

Liste des abréviations

(Les entrées en anglais n’ont pas d’équivalent en français.)

AASHTO | American Association of State Highway and Transportation Officials (Association des responsables des autoroutes et des transports des États-Unis)
 Courbe ROC | (Receiver Operating Characteristic) Fonction d’efficacité du récepteur ou caractéristique de performance ou courbe sensibilité/spécificité
 FHWA | Federal Highway Administration (Administration fédérale des autoroutes)
 FIV | Facteur d’inflation de la variance
 FMA | Facteur de modification d’accident

HSM | Highway Safety Manual (Manuel de sécurité routière)
 Km/h | Kilomètres par heure
 KVP | Kilomètres-véhicules parcourus
 Mi/h | Miles par heure
 MPC | Model Predictive Control (commande prédictive)
 Tr/min | Tours par minute
 VU | Véhicule utilitaire

Introduction

L'économie de carburant des parcs de véhicules commerciaux peut être influencée par la modification des styles de conduite, notamment les vitesses sélectionnées, la souplesse de conduite et de choix d'itinéraires. Des vitesses élevées augmentent la consommation de carburant, et la fluidité de la conduite se rapporte au maintien d'une vitesse relativement constante par opposition à des accélérations et décélérations fréquentes. Le choix de l'itinéraire peut influencer sur l'économie de carburant en raison de l'influence des vitesses prédominantes et du terrain. Par exemple, les itinéraires comportant de nombreuses intersections ou de nombreux changements d'altitude augmentent généralement la consommation de carburant. Outre les effets positifs résultant des économies de carburant et de la réduction des émissions, un style de conduite écoénergétique, ou écoconduite, peut également avoir des effets bénéfiques sur la sécurité. Les exploitants de parcs de véhicules en tireraient un avantage particulier du fait d'une réduction des coûts d'assurance et de l'augmentation de la productivité. Ressources naturelles Canada offre des formations à la conduite écoénergétique de véhicules utilitaires, notamment le cours en ligne Conducteur averti pour le camionnage routier.

La présente étude a été commandée par le Programme de transport écoénergétique de marchandises de Ressources naturelles Canada; elle vise à quantifier la relation potentielle entre la conduite écoénergétique et la sécurité. Le degré de conduite écoénergétique est mesuré à l'aide du score ISAAC (du Coach ISAAC d'ISAAC Instruments); les résultats en matière de sécurité sont mesurés à l'aide des collisions et des collisions évitées de justesse. L'analyse évalue la relation entre le score ISAAC et les risques d'être impliqué à la fois dans des collisions évitées de justesse et des collisions à l'aide d'une analyse de régression logit. Les données et l'analyse sont adaptées aux parcs canadiens de camions grands routiers de classe 8.

Le présent rapport résume la littérature concernant les aspects de la conduite écoénergétique et de la sécurité, ainsi que les technologies d'assistance et de contrôle de la conduite. Le reste du rapport présente la méthodologie de l'étude, les résultats de l'analyse et les conclusions.

Analyse documentaire

Une étude précédente (Haworth et Symmons, 2001) a permis d'examiner de nombreux facteurs liés à la conduite écoénergétique et aux effets sur les gaz à effet de serre. La présente analyse documentaire vise à s'appuyer sur cette étude, en cherchant à mieux comprendre les effets potentiels de la conduite écoénergétique sur la sécurité. Le tableau 1 présente la description qualitative des différents facteurs et leur incidence potentielle sur la sécurité et les économies de carburant dans l'étude de 2001.

Tableau 1 | Haworth et Symmons, 2001 : Résumé des facteurs

Facteur	Sécurité	Économie de carburant
Régulateur de vitesse	Amélioration	Amélioration
Formation à l'écoconduite	Amélioration	Amélioration
Dispositifs de limite de vitesse	Amélioration	Amélioration
Dispositifs indiquant la consommation de carburant	Aggravation (si source de distraction)	Amélioration
Remplacement des feux de circulation par des ronds-points	Amélioration	Amélioration
Diminution des limitations de vitesse dans les zones résidentielles	Amélioration	Aggravation possible
Réduction des limitations de vitesse en dehors des agglomérations	Amélioration	Amélioration
Davantage d'autoroutes	Incertitude	Amélioration
Diminution des embouteillages	Peut réduire le nombre total de collisions, mais augmenter leur gravité moyenne	Amélioration
Reconstruire des routes plus directes, plus droites et plus plates	Amélioration	Amélioration

Vitesse du véhicule

Lorsque l'on parle de conduite écoénergétique, la vitesse du véhicule est probablement le premier facteur qui vient à l'esprit. Un véhicule a besoin de plus de carburant pour rouler à des vitesses plus élevées. La section suivante examine les effets de la vitesse du véhicule sur la consommation de carburant, le risque d'accident et la gravité des collisions.

En ce qui concerne la vitesse de déplacement optimale d'un véhicule moyen, la consommation de carburant par distance parcourue à une vitesse plus lente commence par un taux de consommation élevé, puis diminue à mesure que la vitesse moyenne augmente, jusqu'à environ 80 kilomètres par heure (km/h), puis augmente à mesure que la vitesse augmente. En ce qui concerne les véhicules commerciaux, Fender et coll. (2011) indiquent que la consommation de carburant des camions augmente considérablement lorsque la vitesse dépasse 55 miles par heure (mi/h), et que 50 % des kilomètres parcourus par les véhicules (KVP) pour toutes les combinaisons de camions le sont à des vitesses supérieures à 55 mi/h (88,51 km/h).

La vitesse des véhicules influe non seulement sur la consommation de carburant, mais également directement sur la sécurité routière. L'augmentation de la vitesse des véhicules influence la sécurité de plusieurs manières. Elle réduit le temps dont dispose le conducteur pour percevoir une situation dangereuse et y réagir en toute sécurité, elle réduit la stabilité latérale du véhicule, augmente la distance de freinage et peut influencer sur l'adhérence des pneus sur la chaussée. Une fiche

d'information disponible sur le site Web de la Federal Highway Administration (FHWA) (SWOV, 2012) précise que des vitesses de conduite plus élevées réduisent la probabilité d'éviter un accident.

De nombreuses études ont examiné la relation entre la vitesse des véhicules et le risque d'accident. La plupart d'entre elles ont conclu que la relation entre la vitesse et le taux de collisions peut être décrite au mieux comme une fonction puissance : le taux de collisions augmente plus rapidement à mesure que la vitesse augmente et vice versa (SWOV, 2012, p. 22). Plusieurs études scandinaves ont confirmé cette relation, en particulier entre la vitesse et la gravité des blessures, lors de l'examen les effets des augmentations et des diminutions des vitesses moyennes de déplacement sur le nombre de collisions dues aux changements des limitations de vitesse affichées (Elvik, 2009; Elvik et coll., 2004).

Haworth et Symmons (2001), citant des recherches entreprises aux États-Unis après la hausse des limites de vitesse sur les autoroutes inter-États, ont convenu que des preuves irréfutables révèlent que des vitesses plus basses entraînaient des collisions moins nombreuses et moins graves. Finch et coll. (1994) ont montré qu'une augmentation de la vitesse moyenne de 2 à 4 mi/h (environ 3 à 6 km/h) entraînait une augmentation de 19 à 34 % du nombre de décès. Cela se traduit grosso modo par une augmentation de 8 à 9 % du nombre de décès sur les autoroutes inter-États des États-Unis pour chaque variation d'un mi/h de la vitesse moyenne. L'étude citée de Finch et coll. (1994) indique que pour chaque diminution d'un km/h de la vitesse sur l'ensemble du réseau, on s'attend à une baisse de 3 % du nombre de collisions. Toutefois, la réduction du nombre de collisions par km/h de diminution de la vitesse est plus importante sur les routes résidentielles et de centre-ville, et moins importante sur les routes de banlieue et de campagne de meilleure qualité.

Boodlal et Chiang (2014) citent une étude qui porte à croire qu'une diminution de 5 % des vitesses moyennes entraîne une réduction d'environ 10 % des collisions causant des blessures corporelles et de 20 % des collisions mortelles (OCDE, 2006). Farmer (2016) a constaté que les taux de collisions mortelles ont augmenté lorsque les limites de vitesse maximale ont été relevées dans 41 États des États-Unis. Les résultats indiquent qu'une augmentation de 5 mi/h (8 km/h) de la vitesse maximale autorisée dans chaque État est associée à une hausse de 8 % des taux de mortalité sur les autoroutes et les voies rapides et de 4 % sur les autres routes.

Kockelman et coll. (2006) apportent d'autres preuves de l'incidence d'une augmentation de la vitesse sur la probabilité de collisions plus graves; ils ont déterminé qu'une hausse des limites de vitesse de 55 à 65 mi/h (88,5 à 104 km/h) augmentait la probabilité d'un accident mortel de 24 % et qu'un relèvement de la vitesse de 65 à 75 mi/h (104 à 120 km/h) augmentait la probabilité de 12 %. Malyskina et Mannering (2008) ont également constaté que des limitations de vitesse plus élevées étaient associées à des collisions plus graves, notamment sur les routes de campagne, les routes rurales d'État, les rues de municipalités rurales et les routes rurales nationales. Une augmentation de 1 % de la vitesse affichée est associée à une hausse de la probabilité d'accident mortel pouvant aller jusqu'à 11,90 % et jusqu'à 5,40 % pour les collisions causant des blessures corporelles, selon le type de route.

Kockelman et coll. (2006) ont également constaté que le total des taux de collisions (pas seulement mortelles ou causant des blessures graves) augmente avec une hausse des limitations de vitesse,

mais à un rythme plus lent que les collisions mortelles et causant des blessures graves. Une hausse de la vitesse de 55 à 65 mi/h (88,50 à 104 km/h) a augmenté le nombre total de collisions de 3,30 % et une hausse de 65 à 75 mi/h (104 à 120 km/h), de 0,60 %.

Non seulement la vitesse moyenne influe sur les collisions, mais les écarts entre les vitesses des véhicules ont également une incidence. Les études qui ont porté sur les écarts de vitesse concluent pour la plupart que c'est sur les routes où sont observés des écarts considérables de la vitesse¹ que sont enregistrées davantage de collisions (Aarts et Van Schagen, 2006; Garber et Ehrhart, 2000; Forester et coll., 1984; Zlatoper 1991). Dans ce cas, plus la répartition des vitesses est importante, plus le nombre d'interactions entre les véhicules est élevé, ce qui entraîne une augmentation des manœuvres de dépassement et des risques de collision.

En résumé, les taux de consommation de carburant sont associés à la vitesse des véhicules de sorte que, pour un véhicule moyen, le taux de consommation de carburant par distance parcourue est plus élevé à faible vitesse, diminue à mesure que la vitesse moyenne augmente, jusqu'à environ 80 km/h, puis augmente à nouveau avec la hausse de la vitesse. Des vitesses élevées sont également associées à une augmentation de la fréquence et de la gravité des collisions.

Profil de vitesse

Dans le contexte de la conduite écoénergétique, le style de conduite est représenté par le profil de vitesse d'un conducteur. Le profil de vitesse se compose d'unités de temps avec des phases d'accélération, de décélération et de vitesse constante. Un style de conduite écoénergétique est désormais connu sous le nom d'écoconduite. Ce style minimise la fréquence et l'ampleur des phases d'accélération et de décélération et vise à adopter une vitesse constante écoénergétique. En revanche, un style de conduite agressif se caractérise par des périodes d'accélération et de décélération fréquentes et extrêmes, ainsi que par des vitesses trop élevées par rapport aux conditions. Comme l'indiquent Haworth et Symmons (2001), le profil de vitesse au cours d'un trajet est un facteur plus déterminant du taux de consommation de carburant et des émissions que la vitesse moyenne du trajet.

De nombreuses sources sur les principes d'écoconduite ont en commun certains thèmes de base. Haworth et Symmons (2001, p. 25) citent Johannsson (1999) et Preben (1999) pour énumérer les principes de base de l'écoconduite :

- > au moment de prendre la route, il convient de passer la deuxième vitesse dès que possible, puis les vitesses supérieures au tiers ou à la moitié du régime moteur;
- > le régime du moteur ne doit pas dépasser 3 000 tr/min (ou le niveau de couple le plus élevé);

¹ Explication des écarts de vitesse : imaginons un tronçon de route où trois véhicules ont des vitesses de 50, 70 et 90 km/h et un autre tronçon de route où les trois véhicules roulent à 70 km/h. Dans le premier scénario, les écarts de vitesse sont plus importants; il y a de fortes chances que les conducteurs se dépassent ou doublent le véhicule le plus lent, ce qui augmente le risque de collision.

- > les conducteurs doivent être attentifs et anticiper, afin de passer des feux de circulation ou des intersections en relâchant l'accélérateur, afin de réduire les freinages inutiles et arriver au bon moment pour ne pas devoir s'arrêter complètement;
- > conduire au rythme de la circulation;
- > utiliser autant que possible les vitesses supérieures et réduire le régime du moteur;
- > pour les véhicules à puissance et à couple accrus, le moteur travaille plus que lors d'un changement de vitesse;
- > sauter des vitesses lorsque c'est approprié;
- > réduire au minimum la marche au ralenti du moteur;
- > aucun temps de préchauffage n'est nécessaire au démarrage d'une voiture.

Ces principes sont principalement valables pour les véhicules équipés de transmissions non automatiques, bien que les principes relatifs à la réduction des freinages inutiles, à la conduite au rythme du trafic, à la réduction de la marche au ralenti et à l'absence de temps de réchauffement s'appliquent à tous les conducteurs. L'absence de temps de réchauffement peut ne pas être recommandée dans les climats froids.

The Energy Savings Trust (2016) au Royaume-Uni présente plusieurs techniques de conduite permettant de maximiser l'efficacité des moteurs modernes. Celles qui sont directement liées au style de conduite sont présentées au tableau 2. Là encore, l'accent est mis sur la conduite réduisant les périodes d'accélération et de décélération. La vitesse excessive est également mentionnée, car les vitesses élevées entraînent des taux de consommation de carburant élevés. Outre les économies de carburant, un style de conduite souple, avec moins d'accélération et de freinages, réduit les coûts d'entretien des véhicules du fait d'une moindre usure des composants, notamment des freins, des embrayages et des pneus.

Tableau 2 | Exemples de conduite écoénergétique (Energy Savings Trust, 2016, p. 3)

Conduite en douceur	Anticiper les situations et les réactions des autres usagers de la route aussi loin que possible afin d'éviter les freinages et accélérations inutiles. Maintenir une plus grande distance avec le véhicule qui précède pour réguler votre vitesse, au besoin, sans utiliser les freins.
Lever le pied de l'accélérateur	Lors d'un ralentissement ou d'une descente, garder la vitesse enclenchée, mais lever le pied de l'accélérateur le plus tôt possible. Dans la plupart des situations et pour la plupart des véhicules, cela activera l'interrupteur de coupure du carburant, réduisant le débit de carburant à presque zéro.
Passer rapidement à la vitesse supérieure	Lors d'une accélération, passer rapidement à la vitesse supérieure, généralement entre 2 000 et 2 500 tr/min; passer des vitesses, p. ex. en passant de la 3 ^e à la 5 ^e ou de la 4 ^e à la 6 ^e , lorsque cela est approprié.

Éviter une vitesse excessive	Les vitesses élevées augmentent considérablement la consommation de carburant.
Éviter la marche au ralenti	Couper le moteur si vous prévoyez d'être à l'arrêt pendant plus d'une minute ou deux.

Ressources naturelles Canada (2021) fournit des conseils similaires et suggère l'adoption de cinq techniques de conduite écoénergétique :

1. Accélérer doucement
2. Maintenir une vitesse constante
3. Prévoir la circulation
4. Éviter les vitesses élevées
5. Relâcher l'accélérateur pour réduire la vitesse

Il existe de nombreuses estimations de la consommation de carburant associées à l'adoption d'un style d'écoconduite. Haworth et Symmons (2001) citent plusieurs sources : selon le site Web de l'Environmental Protection Agency des États-Unis (www.fueleconomy.gov/feg/drive.shtml), on peut espérer une amélioration de 10 % de la consommation de carburant en adoptant une conduite écoénergétique. Di Genova et Austin (1994; cités dans Holmen et Niemeier, 1998) ont affirmé que le comportement au volant pouvait multiplier par plus de dix la quantité d'émissions moyennes par kilomètre. Un organisme britannique de formation des conducteurs a affirmé que la formation à l'écoconduite pourrait permettre aux entreprises ayant des parcs de véhicules de réaliser des économies de 10 % en carburant et en entretien. Bongard (1995) a déclaré que les écoconducteurs expérimentés pouvaient économiser jusqu'à 30 % de carburant et que les écoconducteurs débutants pouvaient économiser en moyenne un litre aux 100 km par rapport aux conducteurs ayant reçu une formation classique. L'Energy Savings Trust (2016) du Royaume-Uni estime que l'écoconduite permet de réaliser une économie moyenne d'environ 15 % et qu'un objectif réaliste à long terme pour un parc de véhicules pourrait se situer entre 3 % et 6 %. Ressources naturelles Canada (2021) mentionne des économies pouvant atteindre 25 % grâce à l'écoconduite, sans préciser le type de véhicule.

Si les effets du style de conduite sur la consommation de carburant font l'objet d'un examen approfondi dans la documentation, l'incidence sur la sécurité automobile est rarement abordée. Même lorsque la question de la sécurité est mentionnée, peu de données viennent étayer cette discussion le plus souvent non quantitative. Un style de conduite qui n'est pas trop rapide par rapport aux conditions et qui évite les accélérations et décélérations fréquentes et extrêmes devrait réduire le risque d'accident. Des études axées sur les collisions ont montré que conduire trop vite pour les conditions ou plus que la limite de vitesse affichée est un facteur déterminant dans les collisions mortelles (Liu et Chen, 2009, p. 1).

Toutefois, si l'adoption de principes d'écoconduite permet de réduire la consommation de carburant et d'accroître la sécurité, cette dernière n'est pas toujours garantie. Certaines parties du réseau routier nécessitent des changements de vitesse pour réduire les risques au minimum, par exemple, la conception des virages, des carrefours, des signaux, de la fusion des voies, des dépassements et des

ronds-points. Dans ce cas, l'écoconduite peut entraîner une réduction de la consommation de carburant alors que, dans le même temps, les niveaux de risque d'accident augmentent. La littérature relative à ces conflits potentiels est examinée ci-dessous.

Vaezipour et coll. (2015) ont résumé les effets du style de conduite sur la consommation de carburant et la sécurité, ainsi que les technologies embarquées disponibles; voir le tableau 3. Vaezipour et coll. (2015, p. 3194) ont cité Young et coll. (2012) qui ont relevé des conflits potentiels entre la sécurité et les pratiques d'écoconduite. Ils expliquent, par exemple, que la conduite en cinquième rapport à une vitesse comprise entre 60 et 80 km/h, sans s'arrêter, réduit la consommation de carburant et les émissions de dioxyde de carbone, mais peut entraîner une réduction des distances de sécurité et donc un risque accru de chocs par l'arrière. Il a également été avancé que le fait de maintenir sa vitesse aux intersections au lieu de ralentir augmente la probabilité qu'un conducteur ne détecte pas les autres usagers de la route. En outre, les systèmes d'écoconduite embarqués peuvent être à l'origine de la distraction au volant (Haworth et Symmons, 2001). Une étude réalisée en 2004 par l'université de Turku en Finlande, citée par la CIECA (l'association du commerce électronique de l'industrie de la réparation collision) en 2007, a cerné plusieurs situations dans lesquelles les pratiques d'écoconduite pouvaient compromettre la sécurité :

- > relâcher seulement l'accélérateur pour éviter de s'arrêter en traversant des carrefours et des passages piétons;
- > réduire la distance entre des véhicules successifs (distance par rapport au véhicule qui précède) sur une voie de circulation pour maximiser l'homogénéité de la vitesse;
- > relâcher l'accélérateur prématurément, ce qui perturbe la circulation à l'arrière et augmente le risque de collision par l'arrière;
- > Accélérer rapidement jusqu'à la vitesse de croisière, ce qui peut réduire la distance de sécurité avec le véhicule qui précède;
- > essayer de rester dans un rapport de vitesse élevé (écoénergétique), ce qui entraîne des manœuvres à des vitesses élevées inappropriées (p. ex. dans les virages);
- > couper le moteur lors de brefs arrêts, ce qui peut entraîner le blocage du volant de certains véhicules.

Tableau 3 | Aspects de l'écoconduite et incidences

Paramètre de conduite	Influence sur		Exemple de technologies de système embarqué
	Consommation de carburant	Sécurité	
Vitesse de 60 à 80 km/h	Diminution de la consommation de carburant	Peut accroître le risque d'accident en raison d'une vitesse excessive	Recommandation de vitesse Installation de surveillance d'allure
Respect de la limite de vitesse	Peut augmenter la consommation de carburant à faible vitesse	Diminution du risque d'accident	
Vitesse de croisière	Diminution de la consommation de carburant	Diminution des manœuvres à risque	Régulateur de vitesse
Accélération en douceur	Diminution de la consommation de carburant	Diminution d'une conduite agressive	
Décélération en douceur	Diminution de la consommation de carburant	Peut augmenter le risque d'accident en raison de la distance plus courte entre les véhicules successifs	
Freinage brusque	Augmentation de la consommation de carburant	Peut augmenter le risque de collisions par l'arrière	Rétroaction haptique de la pédale d'accélérateur
Rapport de vitesse le plus élevé possible	Diminution de la consommation de carburant	Peut entraîner une perte de contrôle du véhicule	Conseil de changement de vitesse Indicateur de changement de vitesse
Moteur au ralenti	Diminution de la consommation de carburant (pas plus de ~30 sec)		
Distance de sécurité entre les véhicules successifs		Prévention des collisions par l'arrière (temps de collision ~2-4 sec)	Système d'avertissement et de prévention de collision

Paramètre de conduite	Influence sur		Exemple de technologies de système embarqué
	Consommation de carburant	Sécurité	
Position dans la voie		Diminution du risque de collision en raison du maintien de la voiture dans la voie de circulation	Avertisseur de franchissement de ligne
Conduite agressive	Augmentation de la consommation de carburant due à des accélérations/décélérations brutales	Augmentation du risque de collision	

Haworth et Symmons (2001) citent plusieurs études ayant examiné les effets de l'écoconduite sur les risques d'accident. Reinhardt (1999) a analysé les résultats d'un programme de formation mis en place pour les conducteurs d'un parc de véhicules d'entreprise et a constaté une diminution de 35 % des collisions, une augmentation de 22 % des kilomètres-véhicules parcourus (KVP) par accident et une diminution de 28 % des collisions provoquées par les conducteurs du parc. Le programme de formation d'une autre entreprise a permis d'économiser 11 % de carburant entre 1990 et 1994 et d'améliorer de 35 % le taux de collisions (Smith et Cloke, 1999).

Dehkordie et coll. (2019, p. 208) soulignent que le comportement optimal en matière de carburant est souvent difficile à mettre en œuvre en raison des conditions de circulation et peut entraîner un comportement dangereux en l'absence de contraintes appropriées. Les chercheurs ont élaboré une méthodologie afin de trouver un comportement de conduite écologique et sûr (écosécuritaire), afin de réduire au minimum la consommation de carburant tout en respectant les principales contraintes de sécurité, à savoir le temps avant la collision. D'autres ont étudié les styles de conduite obtenus à l'aide du cadre de commande prédictive par modèle (MPC) (Lim et coll., 2017; Luu et coll., 2010; Bertsekas, 2005). La commande prédictive est une méthode avancée qui permet de contrôler un processus tout en respectant des contraintes. Ce domaine de recherche sera important pour le développement des véhicules automatisés.

Choix de l'itinéraire

Lorsque plusieurs itinéraires sont possibles pour atteindre une destination, le choix de l'itinéraire peut avoir une incidence sur la consommation de carburant et la sécurité.

En ce qui concerne la réduction de la consommation de carburant au minimum, un itinéraire permettant de progresser à une vitesse constante et écoénergétique et réduisant au minimum la nécessité d'accélérer et de décélérer est optimal. Cela peut signifier d'éviter les routes encombrées et les itinéraires comportant des intersections et des voies d'accès fréquentes. En outre, les itinéraires comportant des courbes ou des pentes raides ne sont pas à privilégier en raison de la nécessité de décélérer pour conserver sa position sur la voie et de la demande accrue de carburant

pour la montée des courbes verticales et des pentes positives. Tenant compte de certains de ces facteurs, Ressources naturelles Canada (2021) conseille d'éviter les routes où il y a des accidents ou des zones de travaux qui entraînent des retards, d'éviter les itinéraires qui traversent de grandes villes où les feux de circulation, les intersections et les piétons sont nombreux, et d'utiliser des autoroutes à quatre voies lorsque c'est possible.

Sivak (2012) indique que les différents types de routes entraînent des vitesses moyennes et des profils d'accélération et de décélération différents. Par conséquent, l'économie de carburant diffère selon le type de route. Sivak (2012) cite une étude canadienne (Ressources naturelles Canada, 2009) selon laquelle la consommation de carburant peut être réduite de 9 % ou plus sur les autoroutes où la vitesse affichée est de 80 km/h (50 mi/h) ou plus par rapport à d'autres routes. Une autre étude citée, réalisée par Boriboonsomsin et Barth (2009), a montré que dans un scénario particulier où deux itinéraires différents avaient la même origine et la même destination, un itinéraire plat a permis une économie de carburant de 15 à 20 % supérieure à celle d'un itinéraire vallonné. Une étude citée sur la consommation de carburant pour des routes encombrées par rapport à des routes non encombrées (Facanha, 2009) indique qu'en fonction du type de véhicule et du type de route, la réduction de l'économie de carburant entre le niveau de service A (pas d'encombrement et conditions fluides) et le niveau de service F (encombrement important et retards importants) peut atteindre de 20 à 40 %.

En ce qui concerne la sécurité, les déplacements sur des routes encombrées à forte circulation créent des risques d'interactions conflictuelles et de collisions plus fréquentes. De même, chaque voie d'accès et chaque intersection le long d'un itinéraire génère des risques supplémentaires de conflits et de collisions, car les véhicules qui s'engagent sur la voie ou qui la quittent ralentissent souvent le mouvement de la circulation de transit. La différence de vitesse entre la circulation de transit et la circulation convergente peut augmenter le risque de collision. Le manuel de sécurité routière HSM (Highway Safety Manual [en anglais]) indique que, selon les statistiques sur les collisions, même si les intersections constituent une petite partie du réseau routier, environ 50 % de toutes les collisions urbaines et 25 % des collisions rurales se produisent près d'une intersection (AASHTO, 2010). La politique sur la conception géométrique des routes et des rues (c.-à-d. le « Livre vert » [en anglais]) de l'AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) indique que le nombre de collisions est disproportionnellement plus élevé aux voies d'accès qu'aux intersections (AASHTO, 2011).

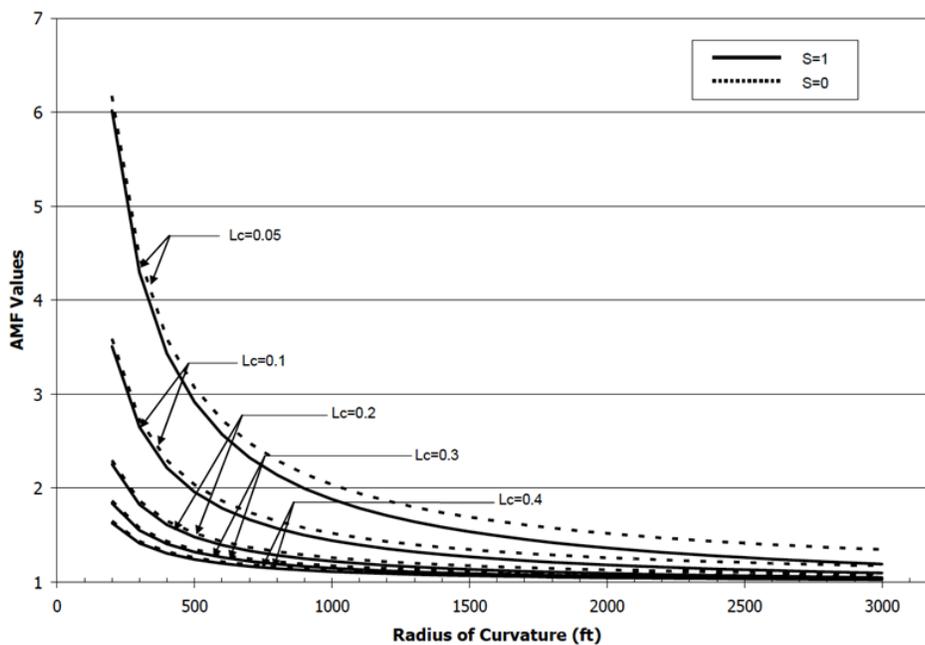
La nature de l'intersection traversée a également une incidence directe sur la sécurité, car la fréquence attendue des collisions dépend des caractéristiques de l'intersection et des niveaux et tendances de circulation. Par rapport aux intersections non signalisées, les avantages de la signalisation en termes de sécurité proviennent de la séparation des manœuvres des différents véhicules qui s'engagent dans l'intersection. Les carrefours giratoires augmentent également la sécurité en réduisant la vitesse des véhicules et en modifiant les points de conflit potentiels, qui passent de conflits de croisement à des conflits de convergence qui sont moins graves. D'après le manuel de sécurité routière HSM (AASHTO, 2010), la conversion d'une intersection sans signalisation en une intersection avec signalisation peut réduire le nombre total de collisions de 5 % en milieu urbain et de 44 % en milieu rural et, plus important encore, réduire les collisions à angle

droit, qui sont généralement graves, de 67 % en milieu urbain et de 77 % en milieu rural. Les estimations des effets sur la sécurité montrent que la conversion des intersections signalisées et non signalisées en carrefours giratoires peut entraîner une réduction de 48 % et de 44 % respectivement du nombre total de collisions et de 78 % et de 82 % respectivement des collisions mortelles et causant des blessures (Rodegerdts et coll., 2010).

La conception géométrique de la route a également une incidence sur le risque d'accident; le nombre de collisions étant plus élevé dans les courbes horizontales et verticales et sur les tronçons de route à forte déclivité. On s'attend à un plus grand nombre de collisions sur les routes à deux voies comportant un moindre rayon de courbe horizontal et une longueur de courbe plus grande, qui peut être estimé en appliquant une équation dérivée de modèles statistiques et en tenant compte de la longueur de courbe, du rayon et de la présence de raccordements spiralés (AASHTO, 2010). La figure 1, tirée du manuel HSM (AASHTO, 2010), illustre la relation entre la géométrie des courbes horizontales et le facteur de modification d'accident (FMA) qui montre la variation du risque d'accident en fonction des caractéristiques de la courbe.

Figure 1 | Relation entre le FMA et la géométrie des courbes horizontales selon le manuel de sécurité routière HSM

Exhibit 13-35: Potential Crash Effect of the Radius, Length, and Presence of Spiral Transition Curves in a Horizontal Curve



Le manuel de sécurité routière HSM fournit également des estimations de l'influence attendue de la pente sur le nombre total de collisions sur des segments de routes rurales à deux voies. Une pente supérieure à 3 à 6 % est associée à une augmentation de 10 % des collisions; une pente supérieure à 6 %, à une augmentation de 16 % des collisions par rapport à une pente inférieure ou égale à 3 %.

Selon Haworth et Symmons (2001), on estime qu'une amélioration de la courbure verticale peut entraîner une réduction des collisions pouvant atteindre 52 %. L'amélioration de la courbure horizontale, par exemple en reconstruisant la courbe pour la rendre moins prononcée ou en élargissant les voies et les accotements dans les courbes, réduit également les collisions (Ogden, 1996, cité dans Meers et Roth, 2001).

En résumé, les itinéraires qui permettent de rouler à une vitesse constante et écoénergétique et qui réduisent au minimum les conflits avec les autres véhicules peuvent améliorer le rendement énergétique et réduire le risque de collision. Pour les emprunter, il convient d'éviter, dans la mesure du possible, les routes encombrées ou qui comportent de fréquentes intersections et des courbes horizontales et verticales.

Systemes de conduite automatisée

Les systèmes de conduite automatisée se développent rapidement. Il existe déjà des technologies qui peuvent aider à adopter un style d'écoconduite, par exemple le régulateur de vitesse. À long terme, les véhicules semi-autonomes et entièrement autonomes promettent d'augmenter les économies de carburant et d'améliorer la sécurité. À court terme, l'utilisation du régulateur de vitesse, du régulateur de vitesse adaptatif et du limiteur de vitesse peut améliorer les styles de conduite en réduisant au minimum la fréquence et l'ampleur des accélérations et des décélérations et en empêchant les déplacements à grande vitesse, diminuant ainsi la probabilité d'une collision et sa gravité lorsqu'elle se produit. Les systèmes de prévention des collisions et de maintien de la trajectoire sont des technologies supplémentaires qui peuvent améliorer la sécurité, mais qui ne sont pas directement liées à l'économie de carburant.

Il existe des recherches sur les effets des systèmes de conduite automatisée influant sur la consommation de carburant, mais il n'y a pas de données quantitatives relatives à ces effets sur les collisions.

Haworth et Symmons (2001) citent une étude selon laquelle en supposant que le régulateur de vitesse n'est pas utilisé pour dépasser la limite de vitesse, son usage permet d'économiser en moyenne 5 % de carburant (Wilbers, 1999). Sivak (2012) cite Edmunds (2005) qui estime que l'utilisation du régulateur de vitesse améliore le kilométrage sur autoroute d'environ 7 %.

Les systèmes de retour d'information embarqués peuvent également favoriser l'écoconduite et la sécurité. Vaezipour et coll. (2015) traitent de la technologie qui comprend l'affichage sur le tableau de bord des taux de consommation de carburant instantanés et moyens à long terme, l'affichage tête haute (collimateur de conduite) et les applications pour téléphones intelligents. Les résultats montrent que certains systèmes embarqués peuvent améliorer le rendement énergétique sans nuire à la sécurité. Plusieurs études ont été citées montrant que ces systèmes embarqués ont des effets positifs sur la consommation de carburant. Barth et Boriboonsomsin (2009) ont constaté que le retour d'information sur la vitesse (basé sur la détection dynamique du trafic en temps réel et les données télématiques) par les écrans du tableau de bord embarqués peut réduire la consommation de carburant de 10 à 20 %, en fonction du contexte de conduite. De même, des réductions de 6,80 % de la consommation de carburant ont été observées lorsque les conducteurs de bus recevaient un retour d'information instantané sur leur conduite grâce à des systèmes d'écoconduite

embarqués (Stromberg et Karlsson, 2013). Toutefois, Haworth et Symmons (2001) ont signalé que les systèmes embarqués ne sont pas toujours sûrs à utiliser s'ils distraient le conducteur.

À long terme, l'automatisation de la conduite peut offrir des avantages sur les plans du rendement énergétique et de la sécurité. Selon une étude citée (Eisenstein, 2016), un camion entièrement automatisé permettrait de réduire la consommation de carburant de 10 % et de ramener les collisions de camions à près de zéro. Le rapport indique que les collisions de camions passeraient d'une moyenne de 222 pour un million de véhicules-miles parcourus en 2000 aux États-Unis à seulement huit d'ici 2040 (Eisenstein, 2016, p. 01).

Schoettle et Sivak (2017, p 16) considèrent la circulation des gros camions en peloton comme un concept d'écoconduite qui aura également des effets positifs sur la sécurité. Selon eux, ce concept de circulation en peloton consiste en deux camions ou plus connectés électroniquement, et peut-être même contrôlés de manière autonome, qui roulent très près les uns des autres (une seconde ou moins séparant les véhicules). Les auteurs estiment que l'on peut s'attendre à des économies de carburant allant jusqu'à 10 % pour chaque véhicule d'un peloton.

La technologie contribuera également à l'optimisation des itinéraires; les données de trafic en temps réel pouvant être utilisées pour modifier les itinéraires, afin de choisir la route la plus écoénergétique et la plus sûre en temps réel.

Technologies de surveillance

La disponibilité des technologies télématiques² présente un grand potentiel pour comprendre l'efficacité énergétique et la sécurité des véhicules. La télématique permet de mesurer les comportements et de fournir un retour d'information aux conducteurs en temps réel. Les systèmes télématiques existants peuvent fournir une série de mesures, notamment la vitesse, le régime du moteur, les taux de décélération et d'accélération et la consommation de carburant. Certains d'entre eux comprennent des algorithmes qui intègrent de nombreux paramètres pour générer des scores de sécurité ou d'écoconduite. Ces données pourraient permettre aux chercheurs d'établir des liens entre les comportements, leurs causes et leurs conséquences.

À titre d'exemple de recherche reposant sur la technologie télématique, Boodlal et Chiang (2014) ont utilisé la télématique pour surveiller divers paramètres de performance du conducteur, y compris les événements dangereux (accélérations soudaines et freinages brusques exprimés comme des événements « jaunes » et « rouges », en fonction de leur gravité), les excès de vitesse, le régime moteur et la consommation de carburant. L'objectif était d'évaluer les effets de plusieurs interventions sur le comportement des conducteurs (information, retour d'information, formation ou incitation à modifier le comportement du conducteur). Les chercheurs ont mené une évaluation sur le terrain pendant 10 mois, en installant des technologies télématiques dans des camions de classe 8 (définis comme des camions de poids nominal brut de 15 tonnes ou plus) incluant une combinaison de différents conducteurs dans divers scénarios, y compris le fait qu'ils soient ou non conscients d'être surveillés. Leurs conclusions indiquent que les conducteurs de cabines couchettes

² Méthode de surveillance des voitures, des camions, des équipements et d'autres biens utilisant la technologie GPS et les diagnostics embarqués (OBD) pour tracer les mouvements du bien sur une carte informatisée.

ont enregistré une réduction de 55 % d'événements dangereux de faible gravité (jaunes) et une réduction de 60 % d'événements dangereux de forte gravité (rouges). En outre, les conducteurs de cabines couchettes (grands routiers) ont enregistré une baisse de 42 % du pourcentage de kilomètres parcourus à plus de 65 mi/h (104 km/h), et les conducteurs de cabines de jour ont enregistré une baisse de 33 % du pourcentage de kilomètres parcourus à plus de 65 mi/h (c.-à-d. en excès de vitesse). Les conducteurs de cabines couchettes ont enregistré une baisse de 48 % du pourcentage de kilomètres parcourus à plus de 1 500 tr/min, tandis que les conducteurs de cabines de jour ont enregistré une hausse de 27 % du pourcentage de kilomètres parcourus à plus de 1 500 tr/min. Cela peut s'expliquer par le retour quotidien des conducteurs de cabines de jour à leur base d'opérations, contrairement aux conducteurs de cabines couchettes qui, associés à leur véhicule, peuvent ne pas retourner à leur base d'opérations avant une semaine.

En ce qui concerne les interventions, fournir des incitatifs aux conducteurs n'a pas permis d'améliorer davantage les mesures de sécurité que la combinaison précédente d'information, de retour d'information sur le conducteur et de formation. Parallèlement à ce qui précède, la consommation de carburant s'est améliorée de 5,40 % pour les conducteurs de cabines couchettes et de 9,30 % pour les conducteurs de cabines de jour. Les auteurs ont conclu que l'on peut dire qu'une conduite prudente permet d'économiser du carburant et de réduire les émissions. Les auteurs appellent également à la réalisation d'une étude de longue durée, afin de recueillir des données sur les collisions qui serviraient de mesure d'évaluation de la sécurité.

Méthodologie

Objectif

L'objectif de l'étude était d'analyser le comportement de conduite enregistré d'un groupe de conducteurs de véhicules utilitaires et des véhicules, notamment des camions grands routiers de classe 8, afin de quantifier les effets de la conduite écoénergétique sur la sécurité. La sécurité est mesurée par l'enregistrement du nombre de freinages brusques, comprenant des changements soudains et importants de la vitesse (Steven Gursten, 2017) ou du nombre d'événements liés au contrôle de la stabilité au cours desquels un véhicule dévie de sa trajectoire droite et le conducteur doit intervenir pour éviter une collision (National Safety Council, 2019). La mesure de la conduite écoénergétique utilise le score ISAAC. Celui-ci est établi sur une échelle de 0 à 100 et mesure le degré d'utilisation de la puissance du moteur par le conducteur en fonction des conditions de conduite.

L'hypothèse posée est que l'adoption d'un style d'écoconduite diminue les risques d'implication des conducteurs de véhicules utilitaires dans des collisions évitées de justesse et des collisions.

Population de l'étude

La population étudiée se compose de 2 531 conducteurs de véhicules grands routiers de classe 8 employés par des entreprises commerciales, l'accent étant mis sur les entreprises dont les déplacements sont au Canada et sur celles qui utilisent l'instrument ISAAC. Des données ont été recueillies auprès de trois entreprises à l'aide de l'instrument ISAAC pour la période allant du

19 janvier 2020 au 12 avril 2022. Les entreprises sélectionnées ont transporté des marchandises entre le Canada et divers endroits dans toute l'Amérique du Nord, ainsi qu'à l'échelle internationale, grâce à une gamme complète de services de transport, de logistique, d'entreposage et de distribution. Au total, 18 024 525 tronçons de conduite ont été analysés pour un total de 336 133 277 km d'exposition à la conduite.

En outre, ce projet a également inclus les données d'une entreprise de transport n'utilisant pas les données d'ISAAC pour la période allant de juin à octobre 2021. Les données recueillies incluaient plutôt d'autres facteurs d'écoconduite, tels que l'âge et l'expérience des conducteurs et les caractéristiques du style de conduite. Au total, 103 conducteurs ont été analysés pour un total de 5 257 761 km d'exposition à la conduite, mais il n'a pas été possible de déterminer le nombre de tronçons de conduite. Pour cette analyse, l'effet de la vitesse du véhicule, en utilisant des variables telles que le rapport le plus élevé et le régime moteur, a été considéré comme une mesure des techniques de conduite écoénergétique, ou écoconduite, et les résultats sont discutés séparément.

Collecte des données

Les événements de collisions évitées de justesse ont été définis dans l'étude comme des événements de freinage brusque. Le freinage brusque n'est qu'un événement de freinage et est défini comme un événement qui déclenche, dans la boîte noire d'un camion utilitaire, l'enregistrement d'un changement soudain de vitesse qui atteint un certain seuil prédéfini par le fabricant (Steven Gursten, 2017 : p. 1). Le nombre d'événements de freinage brusque, de virage serré à gauche et de virage serré à droite de chaque conducteur a été additionné pour la période de l'étude. Les axes latéraux et longitudinaux de l'accéléromètre ont été enregistrés individuellement. Les seuils pour ces événements étaient de 0,35 g (accélération de la pesanteur), soit $3,43 \text{ m/s}^2$ ($1 \text{ g} = 9,81 \text{ m/s}^2$). Un freinage brusque est une force g longitudinale inférieure à -0,35 g (une force g longitudinale négative est une décélération). Un virage serré à gauche est défini comme une force latérale g inférieure à -0,35 g (une force latérale g négative est une accélération vers la gauche). Un virage serré à droite est défini par une force latérale g supérieure à 0,35 g (une force latérale g positive est une accélération vers la droite) (ISAAC Instruments Incorporated, 2021).

Les performances de conduite des conducteurs ayant suivi les lignes directrices d'écoconduite de Coach ISAAC ont également été enregistrées. L'instrument Coach ISAAC fournit un retour d'information en temps réel aux conducteurs au moyen d'une tablette et évalue si la puissance du moteur a été utilisée de manière appropriée en fonction des conditions de conduite. Ces conditions peuvent être influencées par la charge, la pente, la forme et le type de remorque, le vent, la température, la pluie et la neige, ainsi que la résistance mécanique et au roulement (ISAAC Instruments Incorporated, 2021). Les critères ISAAC présentent un score sur 100 fondé sur la performance de conduite à la fin d'un segment de conduite, un style de conduite plus écoénergétique recevant un score ISAAC plus élevé. Le score ISAAC global de chaque conducteur pendant la période d'étude a été calculé en utilisant une moyenne pondérée de tous les trajets, les coefficients de pondération étant fonction de la distance parcourue.

Pour tenir compte de l'exposition au risque, la distance totale parcourue au cours de la période d'étude a également été enregistrée. Cette variable a été divisée par 10 000 pour faciliter l'interprétation du modèle.

Les autres variables recueillies comprennent le nombre total de tronçons sur lesquels un conducteur a dépassé à un moment ou à un autre la limite de vitesse affichée (110 km/h ou 120 km/h). À cet égard, cette mesure est un nombre d'occurrences par tronçon. Des événements sont déclenchés lorsque la vitesse dépasse 110 et 120 km/h. Par exemple, si le véhicule dépasse 120 km/h, ralentit et dépasse à nouveau 120 km/h quelques secondes plus tard, cela compte pour deux événements, alors que si un camion dépasse constamment 120 km/h pendant une heure, cela compte pour un événement.

Avant la collecte des données, toutes les entreprises participantes acceptant de fournir des données ont signé une entente de partage des données et de confidentialité, afin de protéger la vie privée, la confidentialité et la propriété des données de l'entreprise.

Analyse des données

Des modèles logit ont été élaborés avec le logiciel Stata pour étudier l'impact de la conduite écoénergétique sur le rapport de cotes des collisions et des collisions évitées de justesse. Le rapport de cotes peut être interprété comme la probabilité qu'un événement se produise lorsque le facteur d'intérêt est présent, divisée par la probabilité lorsque le facteur n'est pas présent. Par exemple, les entreprises peuvent être intéressées par le rapport de cotes de l'implication dans un accident des conducteurs âgés de plus de 25 ans par rapport aux conducteurs âgés de 24 ans ou moins. Si les conducteurs âgés de 24 ans et moins représentent la base de référence et que le rapport de cotes pour les conducteurs âgés de 25 ans et plus est de 0,70, cela signifie que les conducteurs plus âgés sont 30 % moins susceptibles d'être impliqués dans un accident. La relation linéaire entre les variables explicatives et une variable de réponse binaire, comprenant les collisions évitées de justesse et l'absence de collision évitée de justesse, peut s'écrire selon l'équation suivante, où ℓ est le logarithme du risque, X_i représente des variables indépendantes et β sont les coefficients des paramètres du modèle (Ma et coll., 2009) :

$$\ell = \text{Log} \frac{P}{1-P} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 \quad (1)$$

Cette formule quantifie le pourcentage de variation du rapport de cotes par une augmentation d'une unité d'une variable explicative. Dans cette étude, les modèles logit ont quantifié le rapport de cotes d'une collision évitée de justesse ou d'une collision par une augmentation d'une unité d'une variable explicative. Les variables explicatives comprennent la moyenne pondérée du score ISAAC, la distance totale de conduite pour 10 000 km et le nombre total de tronçons de conduite au cours desquels un conducteur a dépassé la limite de vitesse affichée (110 km/h ou 120 km/h) à un moment donné.

Lors de l'élaboration des modèles logit, différents seuils relatifs au nombre de freinages brusques (de 0 à 4) et de collisions (de 0 à 2) ont été utilisés pour définir une conduite à risque. Par exemple, un seuil de un signifie que si un conducteur enregistre plus d'un freinage brusque au cours de la

période étudiée de janvier 2020 à avril 2022, on peut supposer que le risque d'accident était plus élevé pour ce conducteur.

Cette étude a utilisé un facteur d'inflation de la variance (FIV) pour vérifier la colinéarité entre les variables explicatives, car cette question rejetera l'hypothèse d'indépendance du modèle. En outre, les modèles les mieux ajustés ont été choisis en fonction de plusieurs mesures de la qualité de l'ajustement, notamment la valeur maximale du Pseudo R^2 , l'aire sous la courbe ROC et le pourcentage de classification correcte (%). L'aire sous la courbe ROC décrit la performance globale d'un modèle de classification selon lequel les valeurs proches de 1 représentent un modèle exact et les valeurs inférieures à 0,50 ne sont pas acceptables (Provost and Domingos, 2000; Mujalli, López, and Garach, 2016).

Résultats

Les modèles ont révélé qu'une augmentation d'une unité de la moyenne pondérée du score ISAAC (allant de 0 % à 100 %, 100 % signifiant que le conducteur a suivi les conseils de Coach ISAAC dans toutes les situations) était associée à une réduction de 7 % des risques de freinage brusque, une réduction de 8 % des risques de virage serré à gauche et une réduction de 8 % des risques de virage serré à droite.

En outre, une augmentation de 10 000 km de la distance totale parcourue a entraîné une augmentation de 51 % de la probabilité d'un freinage brusque, de 6 % d'un virage serré à gauche et de 6 % d'un virage serré à droite. Les rapports de cotes pour les variables relatives aux excès de vitesse n'ont pas montré de relation statistiquement significative avec les freinages brusques ou les collisions.

En ce qui concerne les collisions, les résultats ont montré que Coach ISAAC a réduit les risques de collision de 4 % de manière significative. Logiquement, le rapport de cotes pour la variable de distance est positif et statistiquement significatif. À cet égard, le modèle indique qu'une augmentation de la distance parcourue de 10 000 km est associée à une augmentation de 7 % des risques de collision.

Les résultats de la régression logit pour les freinages brusques, les virages serrés à gauche et les virages serrés à droite en utilisant différents seuils commençant par zéro et se terminant par quatre sont présentés au tableau 4. Les résultats concernant les collisions sont présentés au tableau 5 en utilisant des seuils de zéro à deux. Ces tableaux fournissent les rapports de cotes estimés et les valeurs p pour chacune des variables indépendantes incluses dans les modèles, ainsi que les mesures de la qualité de l'ajustement. Les valeurs p inférieures à 0,05 indiquent que l'effet des variables explicatives est statistiquement significatif au seuil de confiance du 95^e centile. Les modèles finaux sélectionnés (sur la base des mesures de qualité d'ajustement) sont représentés par les lignes ombrées. Les modèles ont également été estimés pour un ensemble de données combinées pour les trois entreprises, en appliquant un seuil de zéro freinage brusque, virage serré à gauche et virage serré à droite.

Tableau 4 | Résultats de la régression logit pour différents seuils

Collision s évitées de justesse	Seuil limite *	MP ISAAC**		Somme distance (par tranche de 10 000 km)		Somme excès de vitesse 110		Somme excès de vitesse 120		Pseudo R 2	Surface sous la courbe ROC	Classé correctement (%)
		Cotes	P> z	Cotes	P> z	Cotes	P> z	Cotes	P> z			
Freinage brusque	0	0,93	0,00	1,51	0,00	1,00	0,28	1,01	0,81	0,36	0,92	92,92
	1	0,92	0,00	1,36	0,00	1,00	0,11	1,00	0,79	0,34	0,90	88,81
	2	0,91	0,00	1,29	0,00	1,00	0,03	1,01	0,38	0,34	0,89	87,03
	3	0,91	0,00	1,25	0,00	1,00	0,00	1,01	0,26	0,33	0,88	84,46
	4	0,90	0,00	1,23	0,00	1,00	0,01	1,01	0,12	0,33	0,88	83,95
Virage serré à gauche	0	0,92	0,00	1,06	0,00	1,00	0,86	1,00	0,93	0,10	0,71	67,06
	1	0,92	0,00	1,05	0,00	1,00	0,51	1,00	0,38	0,09	0,70	64,61
	2	0,92	0,00	1,04	0,00	1,00	0,95	1,00	0,37	0,09	0,70	65,48
	3	0,92	0,00	1,04	0,00	1,00	0,85	1,00	0,29	0,09	0,70	68,96
	4	0,91	0,00	1,04	0,00	1,00	0,06	1,00	0,15	0,09	0,70	72,20
Virage serré à droite	0	0,92	0,00	1,06	0,00	1,00	0,34	1,01	0,04	0,10	0,72	71,06
	1	0,91	0,00	1,05	0,00	1,00	0,31	1,00	0,07	0,10	0,71	66,51
	2	0,91	0,00	1,05	0,00	1,00	0,38	1,00	0,17	0,10	0,72	65,16
	3	0,91	0,00	1,05	0,00	1,00	0,32	1,00	0,18	0,10	0,71	65,32
	4	0,91	0,00	1,04	0,00	1,00	0,91	1,00	0,29	0,09	0,70	67,58

* Au-delà de cette valeur, on suppose qu'un conducteur a été exposé à des événements à risque (p. ex., freinage brusque) au cours de la période étudiée.

** Moyenne pondérée des scores ISAAC pour tous les segments parcourus au cours de la période étudiée.

Tableau 5 | Risque de collisions; résultats de la régression logit

Entreprise	Seuil limite*	MP ISAAC**			Somme distance (par tranche de 10 000 km)			Pseudo R2	Surface sous la courbe ROC	Classé correctement (%)
		Cotes	IC à 95 %	P> z	Cotes	IC à 95 %	P> z			
Total	0	0,96	[0,95; 0,98]	0,00	1,07	[1,06; 1,08]	0,00	0,12	0,73	66,76
	1	0,95	[0,93; 0,97]	0,00	1,06	[1,05; 1,08]	0,00	0,10	0,72	76,63
	2	0,95	[0,92; 0,98]	0,00	1,06	[1,04; 1,08]	0,00	0,08	0,72	89,76

* Au-delà de cette valeur, on suppose qu'un conducteur a été exposé à des événements à risque (p. ex. freinage brusque) au cours de la période étudiée.

** Moyenne pondérée des scores ISAAC pour tous les segments parcourus au cours de la période étudiée.

Ce projet a également inclus les données d'une entreprise de transport, pour la période allant de juin à octobre 2021, au cours de laquelle ont été recueillies des données concernant d'autres facteurs d'écoconduite, tels que l'âge et l'expérience des conducteurs et les caractéristiques du style de conduite, sans utilisation des données d'ISAAC. Au total, 103 conducteurs ont été analysés pour un total de 5 257 761 km d'exposition à la conduite. Dans ce cas, l'effet de la vitesse du véhicule, en utilisant des variables telles que le rapport le plus élevé et le nombre de tours par minute (tr/min) du moteur, a été considéré comme une mesure des techniques de conduite écoénergétique ou de l'écoconduite. Les données ont été analysées afin d'estimer les probabilités de freinage brusque et

de contrôle de la stabilité en tant qu'indicateurs de collisions. Les résultats d'un modèle logit ont montré que la conduite à vitesse supérieure à des vitesses constantes proches de 101 kilomètres par heure (km/h), qui est une vitesse écoénergétique, peut réduire de manière significative le nombre d'événements liés au contrôle de stabilité de 34 %. En outre, une augmentation de l'âge du conducteur et de 1 % de l'utilisation du régulateur de vitesse pendant la durée de conduite était associée à une réduction de 9 % et de 3 % respectivement du risque de freinage brusque. L'étude a aussi montré que les excès de vitesse et les distances longues de conduite par les conducteurs (pour 10 000 km) peuvent accroître le risque d'incident de contrôle de stabilité de 4 % et de 55 % respectivement.

Conclusion et discussion

La recherche a montré que l'utilisation de tactiques, telles que le passage au rapport supérieur suffisamment tôt ou le passage au rapport inférieur le plus tard possible, et l'utilisation d'un système d'aide à la conduite (p. ex. régulateur de vitesse) peut permettre aux conducteurs de camions de réduire leur consommation de carburant de 5 % en moyenne (EcoDrive, 2021). La présente étude a cherché à déterminer si les techniques d'écoconduite peuvent avoir une incidence positive sur la sécurité en réduisant la probabilité d'une collision évitée de justesse, mesurée par le système de contrôle de stabilité, un freinage brusque, un virage serré à gauche et un virage serré à droite, ou d'une collision.

Les freinages brusques peuvent augmenter le risque de collision. Freiner brusquement fréquemment peut indiquer qu'un conducteur suit de trop près à une distance dangereuse, ce qui réduit la sécurité de tous les usagers de la route (Kevin Aries, 2021). En outre, des freinages brusques excessifs peuvent entraîner une surchauffe des freins du véhicule, endommageant les composants métalliques ou provoquant le glaçage des plaquettes de frein. Cela les rend moins efficaces et réduit leur durée de vie, mettant finalement le conducteur en danger de ne pas pouvoir s'arrêter en cas de besoin (Kevin Aries, 2021 : p. 1).

Le score ISAAC est enregistré en fonction des performances du conducteur (McDaniel, 2022). Une conduite permettant d'obtenir un score ISAAC élevé peut se traduire par des économies de carburant pouvant atteindre 15 % et améliorer la sécurité (Ashley Coker, 2022). En ce qui concerne l'importance de ce sujet, l'étude actuelle a décrit les avantages de Coach ISAAC en matière de réduction des freinages brusques et des collisions.

Les résultats des modèles de régression logit ont montré que les résultats sont généralement cohérents, quel que soit le seuil utilisé pour définir la conduite dangereuse. L'analyse des données de conduite en conditions réelles a montré qu'un score ISAAC croissant était associé à une conduite écoénergétique. Il était également associé à des réductions significatives des probabilités de tous les types de freinage brusque et de collisions.

Les modèles ont également montré de façon logique que les risques de freinage brusque et de collision augmentaient avec la distance parcourue. Cette constatation illustre le rôle de l'exposition dans l'augmentation du risque de collision. En d'autres termes, plus une personne parcourt de

kilomètres, plus elle risque d'avoir un jour un accident. Ce fait a été confirmé pour les conducteurs hommes et femmes (Rolison and Moutari, 2018).

En ce qui concerne la conduite écoénergétique, ou l'écoconduite conformément à la ligne directrice ISAAC, le fait de passer moins de temps en excès de vitesse, d'utiliser davantage le régulateur de vitesse et de passer plus de temps en vitesse supérieure (limitée à 101 km/h avec le régulateur de vitesse ou à 105 km/h en mode de conduite normale) a été associé à un risque plus faible de collision évitée de justesse. D'autres résultats ont indiqué que l'accroissement de l'âge des conducteurs de véhicules utilitaires était associé à une réduction du risque de collision.

En conclusion, l'adoption d'un style d'écoconduite devrait réduire le risque de collision, donner lieu à des économies en frais d'assurance et accroître la productivité. Ressources naturelles Canada offre des formations à la conduite écoénergétique de véhicules utilitaires, notamment le cours en ligne Conducteur averti pour le camionnage routier.

Ouvrages de référence

Aarts, L. et I.N.L.G. van Schagen (2006). Driving speed and the risk of road crashes; A review. *Accident Analysis and Prevention*, 38 (2), 215-224.

AASHTO. (2010). *The Highway Safety Manual*, American Association of State Highway Transportation Professionals, Washington, D.C., <http://www.highwaysafetymanual.org>.

AASHTO. (2011). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. The American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO Green Book, Washington DC.

Aries, K. 2021. Why Monitor Harsh Braking and Acceleration? Disponible à l'adresse suivante : <https://www.verizonconnect.com/resources/article/harsh-braking-acceleration-why-monitor/>.

Barth, M. et K. Boriboonsomsin. (2009). Energy and emissions impact of a freeway-based dynamic eco-driving system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14, 400-410.

Bertsekas, D.P. (2005). Dynamic programming and suboptimal control: a survey from ADP to MPC. *European Journal of Control*, 11 (4-5), 310-334.

Bongard, A. (1995). The environment and the driving instructor. www.drivers.com/ARTICLES/restricted/bong-952033853.html.

Boodlal, L. et K.H. Chiang. (2014). Study of the Impact of a Telematics System on Safe and Fuel-efficient Driving in Trucks. Federal Motor Carrier Safety Administration. FMCSA-13-020.

Boriboonsomsin, K. et M. Bath. (2009). Impacts of road grade on fuel consumption and carbon dioxide emissions evidenced by use of advanced navigation systems. *Transportation Research Record*, 2139, 21-30.

Chen, C., G. Zhang, R. Tarefder, J. Ma, H. Wei et H. Guan (2015). A multinomial logit model-Bayesian network hybrid approach for driver injury severity analyses in rear-end crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 80, 76-88.

Collision Industry Electronic Commerce Association (CIECA). (2007). Internal project on Eco-driving in category B driver training & the driving test.

Coke, A. (2022). Real-time driver coaching helps carriers save big on fuel costs. <https://www.freightwaves.com/news/real-time-driver-coaching-helps-carriers-save-big-on-fuel-costs>.

Dehkordi, S.G., S.L. Gregoire, M.E. Cholette, A. Rakotonirainy et H. A. Rakha. (2019). Ecological and safe driving: A model predictive control approach considering spatial and temporal constraints.

Eco-Drive (2021). Les règles principales d'EcoDrive pour les véhicules lourds. Disponible à l'adresse : <https://www.ecodrive.ch/fr/conseils/vehicules-lourds/>

Edmunds (2005). We test the tips. What really saves gas? And how much? Disponible à l'adresse : <http://www.edmunds.com/fuel-economy/we-test-the-tips.html>.

Elvik, R. (2009). The Power Model of the relationship between speed and road safety: update and new analyses. TØI Report 1034/2009. Institute of Transport Economics TØI, Oslo.

Elvik, R., P. Christensen et A. Amundsen. (2004). Speed and road accidents; An evaluation of the Power Model. Institute of Transport Economics TØI, Oslo.

Energy Saving Trust. (2016). Advising fuel efficient driving techniques for your fleet. Disponible à l'adresse : https://www.energysavingtrust.org.uk/sites/default/files/reports/5984_EST_A4_ecodriving_guide_v6.pdf

Facanha. (2009). Effects of congestion and road level of service on vehicle fuel economy. Transportation Research Board's 88th Annual Meeting, paper 09-0268. National Academy of Sciences, Washington, D.C.

Farmer, C.M. (2016). Relationship of Traffic Fatality Rates to Maximum State Speed Limits. Traffic Injury Prevention, 18(4), Insurance Institute for Highway Safety, Arlington, VA.

Fender, Katherine J. et David A. Pierce (2011). An Analysis of the Operational Costs of Trucking: A 2011 Update. American Transportation Research Institute, Arlington, VA, juin 2011, [peut être commandé en ligne sur <http://www.atri-online.org/>]

Finch, DJ., P. Kompfner, CR. Lockwood et G. Maycock. (1994). Speed, speed limits and accidents (TRL Project Report 58). Crowthorne: Transport Research Laboratory.

Forester, T.H., R.F. McNown et L.D. Singell (1984). A cost-benefit analysis of the 55-mph speed limit. Southern Economic Journal, 50(3), 631-641.

Garber, N.J. et A.A. Ehrhart. (2000). Effects of speed, flow, and geometric characteristics on crash frequency for two-lane highways. Transportation Research Record, 1717, 76-83.

Giroto, E., S.M. de Andrade, A.D. González et A. E. Mesas (2016). Professional experience and traffic accidents/near-miss accidents among truck drivers. Accident Analysis & Prevention, 95, 299-304.

Haworth, N. et M. Symmons. (2001). The relationship between fuel economy and safety outcomes (N° 188). Monash University Accident Research Centre.

- Holmen, B., et D. Niemeier. (1998). Characterizing the effects of driver variability on real world vehicle emissions. *Transportation Research Part D*, 3, 117-128.
- Johansson, H. (1999). Impact of Ecodriving on emissions and fuel consumption, a pre-study. Swedish National Road Administration report, 1999:165E.
- Kamrani, M., R. Arvin et A. J. Khattak (2019a). The Role of Aggressive Driving and Speeding in Road Safety: Insights from SHRP2 Naturalistic Driving Study Data. Document présenté au Transportation Research Board, États-Unis.
- Kamrani, M., R. Arvin et A. J. Khattak (2019b). The role of aggressive driving and speeding in road safety: Insights from SHRP2 naturalistic driving study data.
- Kockelman, K., J. Bottom, Y. Kweon, J. Ma et X. Wang (2006). NCHRP Web-Only Document 90 (Project 17-23): Safety Impacts and Other Implications of Raised Speed Limits on High-Speed Roads. TRB of the National Academies, Washington, DC. Disponible en ligne : <<http://www.trb.org/Main/Public/Blurbs/157220.aspx>, dernière consultation le 10 novembre 2017>.
- Lim, H., C.C. Mi et W. Su. (2017). A distance-based two-stage ecological driving system using an estimation of distribution algorithm and model predictive control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66 (8), 6663-6675.
- Liu, C., et C.L. Chen. (2009). An Analysis of Speeding-Related Crashes: Definitions and the Effects of Road Environments. Report n° DOT HS 811 090. National Highway Traffic Safety Administration.
- Luu, H.T., L. Nouveliere, S. Mammari. (2010). Ecological and safe driving assistance system: design and strategy. Dans : 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 129-134.
- Malyshkina, N. V., et F. Mannering (2008). Effect of Increases in Speed limits on Severities of Injuries in Accidents. *Transportation Research Record*, 2083(2083), 122-127.
- Maynard, S., A. Filtner, K. Miller et F. Pilkington-Cheney (2021). Bus driver fatigue: A qualitative study of drivers in London. *Applied Ergonomics*, 92, 103309.
- McDaniel, Jason. (2022). « Isaac Instruments' in-cab technology a 'gamechanger' for tank truckers ». Disponible à l'adresse : <https://www.bulktransporter.com/technology/article/21244494/isaacs-incab-technology-a-gamechanger-for-tank-truckers>.
- Meers, G. et M. Roth. (2001). Road safety and ecological sustainability working together. Conference Proceedings, Australian Transport Research Forum: Zero Road Toll – A Dream or a Realistic Vision? Hobart, Australie.
- Mujalli, R. O., G. López et L. Garach (2016). Bayes classifiers for imbalanced traffic accidents datasets. *Accident Analysis & Prevention*, 88, 37-51
- National Safety Council. (2019). Electronic Stability Control. Disponible à l'adresse : <https://mycardoeswhat.org/safety-features/electronic-stability-control/>.

Nilsson, G. (1982). The effects of speed limits on traffic accidents in Sweden. Dans : Proceedings of the international symposium on the effects of speed limits on traffic accidents and transport energy use, 68, octobre 1981, Dublin. OCDE, Paris, 1-8.

Nilsson, G. (2004). Traffic safety dimensions and the power model to describe the effect of speed on safety. Lund Bulletin 221. Lund Institute of Technology, Lund.

Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et Conférence européenne des ministres des Transports, Centre commun de recherche sur les transports. (2006). La gestion de la vitesse, Éditions OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16, France, <http://internationaltransportforum.org/Pub/pdf/06Speed.pdf>.

Paul A. Eisenstein. (2016). Autonomous and self-driving trucks will improve safety, fuel economy. Disponible à l'adresse : <https://www.trucks.com/2016/04/07/autonomous-trucks-improve-safety-fuel-economy/>.

Preben, T. (1999). Positive side effects of an economical driving style: Safety emissions, noise, costs. EcoDrive Conference proceedings, Graz, Austria, 68-71.

Provost, F. et P. Domingos (2000). Well-trained PETs: Improving probability estimation trees. Rapport instytutowy IS-00-04, Stern School of Business, New York University.

Reinhardt, E. (1999). EcoDrive in Switzerland: A success story of Energy 2000. EcoDrive Conference proceedings, Graz, Austria, 56-61.

Rodegerdts, L., J. Bansen, C. Tiesler, J. Knudsen, E. Myers, M. Johnson, M. Moule, B. Persaud, C. Lyon, S. Hallmark, H. Isebrands, R. B. Crown, B. Guichet et A. O'Brien. (2010). NCHRP Report 672: Roundabouts: An Informational Guide, 2nd edition. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.

Rolison, J. J. et S. Moutari (2018). Risk-Exposure density and mileage bias in crash risk for older drivers. American Journal of Epidemiology, 187(1), 53-59.

Ressources naturelles Canada. (2009). L'enquête sur les véhicules au Canada : rapport sommaire 2007. Office de l'efficacité énergétique, publications sur l'énergie, Ottawa, Canada.

Ressources naturelles Canada. (2021). Techniques de conduite écoénergétique, Ottawa, Canada. <https://ressources-naturelles.canada.ca/efficacite-energetique/efficacite-energetique-transport-carburants-remplacement/vehicules-personnels/techniques-de-conduite-ecoenergetique/21039>.

Schoettle, B. et M. Sivak. (2017). Potential Improvements in Safety and Efficiency with Autonomous Trucking. SWT-2017-19. Université du Michigan, Sustainable Worldwide Transportation. Accessible à l'adresse : <http://umich.edu/~umtriswt/PDF/SWT-2017-19.pdf>.

Sivak, M. et B. Schoettle. (2012). Eco-Driving: Strategic, tactical, and operational decisions of the driver that influence vehicle fuel economy. Transport Policy, 22, 96-99.

Smith, L. et J. Cloke (1999). Reducing the environmental impact of driving: Effectiveness of driver training. EcoDrive Conference proceedings, Graz, Austria, 48-55.

Steven Gursten. (2017). Hard Braking Event Explained. Disponible à l'adresse : <https://www.michiganautolaw.com/blog/2017/11/05/hard-braking/#:~:text=be%20out%20there.-,What%20is%20a%20hard%20braking%20event%3F,the%20accompanying%20myriad%20of%20information.>

Strömberg, H.K. et I.M. Karlsson. (2013). Comparative effects of eco-driving initiatives aimed at urban bus drivers—Results from a field trial, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 22, 28-33, 2013.

Institute for Road Safety Research (SWOV). (2012). The relation between speed and crashes. Accessible à l'adresse : https://safety.fhwa.dot.gov/speedmgt/ref_mats/fhwasa1304/Resources3/08%20-%20The%20Relation%20Between%20Speed%20and%20Crashes.pdf.

Wilbers, P. (1999). The new driving force: A new approach to promote energy-efficient purchasing and driving behaviour. *EcoDrive Conference proceedings, Graz, Austria*, 44-47.

Young, M.S. et S.A. Birrell. (2012). Ecological IVIS design: Using EID to develop a novel in-vehicle information system. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 13, 225-239.

Yuan, Y., M. Yang, Y. Guo, S. Rasouli, Z. Gan et Y. Ren (2021). Risk factors associated with truck-involved fatal crash severity: Analyzing their impact for different groups of truck drivers. *Journal of safety research*, 76, 154-165.

Vaezipour, A., A. Rakotonirainy et N. Haworth. (2015). Reviewing in-vehicle systems to improve fuel efficiency and road safety. 6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2015) and the Affiliated Conferences, AHFE 2015.

Zlatoper, T.J. (1991). Determinants of motor vehicle deaths in the United States: A cross sectional analysis. *Accident Analysis and Prevention*, 23(5), 43

Fondation de recherche sur les blessures de la route (FRBR)

Pour plus d'information, visitez **TIRF.CA**

Courriel | **tirf@tirf.ca**

Numéro d'organisme de bienfaisance enregistré 10813 5641 RR0001

© Fondation de recherche sur les blessures de la route 2023

WWW.CANADAHELPS.ORG/EN/CHARITIES/TIRFCANADA

FRBR



La source de connaissances pour une conduite sûre