

Université de Montréal

**Étude de l'importance de répondre aux besoins visuels en conduite automobile
lorsque la demande visuelle et cognitive est fortement sollicitée**

Par
Amigale Patoine

École d'optométrie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Maîtrise en sciences de la vision,
option sciences fondamentales, appliquées et cliniques

Mémoire déposé le 31 août 2020 aux membres du jury

© Amigale Patoine, 2020

Université de Montréal

École d'optométrie

Ce mémoire intitulé

**Étude de l'importance de répondre aux besoins visuels en conduite automobile
lorsque la demande visuelle et cognitive est fortement sollicitée**

Présenté par

Amigale Patoine

A été évalué par un jury composé des personnes suivantes

Judith Renaud (OD, Ph.D.)

Professeure agrégée, École d'optométrie, Université de Montréal,
Présidente du jury

François Bellavance (Ph.D.)

Professeur titulaire, Département des sciences de la décision de HEC Montréal,
Membre du Jury

Jocelyn Faubert (Ph.D.)

Professeur titulaire
Directeur de recherche

Delphine Tranvouez-Bernardin (Ph.D.)

Professeure associée
Codirectrice

Résumé

La sécurité routière est un enjeu de santé publique et de développement à travers le monde. En 2010, déjà plus d'un milliard de véhicules à travers le monde étaient en circulation (1). En 2016, près de 1,35 million de personnes ont été rapportées comme décédées suite à des accidents de la route (2). Avec des intérieurs de véhicules et des environnements routiers en constante évolution au cours du dernier siècle, les capacités visuelles sont de plus en plus sollicitées entraînant également une contribution accrue des capacités cognitives. Du point de vue scientifique et clinique, l'interaction entre les mécanismes visuels, tels que l'acuité visuelle et les mécanismes cognitifs impliqués pendant la conduite sont encore peu étudiés et à peine promus comme éléments clés du comportement de conduite sécuritaire. L'étude de cette problématique, dont l'impact est sous-estimé au niveau sociétal, est au cœur de ce travail de maîtrise. Si l'acuité visuelle est difficile à relier aux taux d'accidentologie (3, 4), il est cependant reconnu que les capacités visuo cognitives prédisent le taux d'accidentologie sur route à cinq ans (3) et en simulateur de conduite (5). C'est pourquoi dans cette étude, nous avons émis l'hypothèse que, dans un contexte de forte charge cognitive en conduite, une diminution de l'acuité visuelle aurait un impact négatif sur le comportement de conduite. Nous avons examiné si un seuil d'acuité visuelle artificiellement réduit au seuil légal d'obtention du permis de conduire au Canada, et une réduction plus importante induirait un effet sur les performances de conduite. Le comportement de 21 conducteurs âgés de 21 à 34 ans a été mesuré à l'aide du simulateur VS500M dans divers contextes de conduite et de charge cognitive. Un scénario rural de conduite à faible charge cognitive en comparaison à un scénario autoroute de conduite impliquant des tâches de navigation sur GPS ont été utilisés. Deux scénarios de chaque ont été réalisés avec une vision optimale -acuité visuelle de 6/6- et une qualité de vision réduite -acuité visuelle réduite artificiellement à un niveau plus faible pour 11 des conducteurs et une réduction plus importante pour 10 des conducteurs. Les résultats, faisant l'objet d'une publication scientifique à comité de lecture en préparation, démontrent une diminution des capacités à manœuvrer le véhicule efficacement, notamment une augmentation de la variabilité de la vitesse et de la position latérale du véhicule (SDLP) en contexte de charge mentale élevée, une augmentation de la variabilité de la vitesse en condition de qualité de vision réduite lors de présence de charge mentale élevée ainsi qu'une diminution de la vitesse moyenne et une augmentation de sa variabilité selon les groupes de réduction de qualité visuelle, toujours dans un contexte de charge mentale élevée. Même si le taux de succès reste stable malgré la manipulation expérimentale, les résultats confirment l'importance d'évaluer les enjeux visuels dans des contextes certes quotidiens, mais pour

lesquels les interactions avec la cognition sont encore peu considérées. La sollicitation de la vision à des distances intermédiaires par la tâche de GPS, en plus des distances de loin telles que considérées par les aspects normatifs de la législation du permis de conduire, l'augmentation de la charge cognitive associée à cette double tâche de mobilité et de navigation, mais aussi à la réduction de la qualité de vision nous amènent à proposer de nouvelles pistes de recherche dans la discussion de ce mémoire pour mieux comprendre les enjeux des amétropies visuelles, de la presbytie ou bien encore du vieillissement.

Mots clés : Simulateur de conduite, Dégradation visuelle, Charge cognitive, Comportement de conduite, Acuité visuelle, Interaction vision et cognition, Sécurité routière.

Abstract

Road safety is a public health and development issue across the world. In 2010, more than a billion vehicles were already in circulation worldwide (1). In 2016, nearly 1.35 million people were reported as dead after road crashes (2). With ever-changing vehicle interiors and road environments over the past century, visual abilities are increasingly strained resulting in an increased contribution of cognitive abilities as well. From a scientific and clinical point of view, the interaction between visual mechanisms, such as visual acuity and the cognitive mechanisms involved during driving are still little studied and hardly promoted as key elements of safe driving behavior. The study of this problem, the impact of which is underestimated at the societal level, is at the heart of my master's work. While visual acuity is difficult to relate to accident rates (3, 4), it is however recognized that visuo-cognitive abilities predict the road accident rate at five years (3) and in a driving simulator (5). This is why in this study, we hypothesized that, in a context of high cognitive load while driving, a decrease in visual acuity would have a negative impact on driving behavior. We examined whether a visual acuity threshold artificially reduced to the legal threshold for obtaining a driver's license in Canada, and a greater reduction, would have an effect on driving performance. The behaviors of 21 drivers aged between 21 and 34 were measured using the VS500M simulator in various driving and cognitive load contexts. A rural driving scenario with low cognitive load compared to a highway driving scenario involving GPS navigation tasks were used. Two scenarios were carried out by all the participants with optimal vision - visual acuity of 6/6 - and reduced quality of vision - a lower artificially reduced visual acuity 11 of the drivers and a higher one for 10 of the drivers. The results, which are the subject of a peer-reviewed scientific publication in preparation, demonstrate a decrease in the ability to maneuver the vehicle effectively, in particular an increase in the variability of speed and of the standard deviation of lateral position of the vehicle (SDLP) in a context of high mental load, an increase in the variability of speed under reduced vision quality conditions in the presence of a high mental load as well as a decrease in the average speed and an increase in its variability according to the visual quality reduction groups, also in a context of high mental load. Even if the success rate remains stable despite the experimental manipulation, the results confirm the importance of evaluating visual issues in contexts that are admittedly everyday but for which interactions with cognition are still little considered. The solicitation of vision at intermediate distances by the GPS task, in addition to far distances as considered by the normative aspects of driving license legislation, the increased cognitive load associated with this dual mobility task and navigation, but also to the reduction of the quality of vision lead us to propose new avenues of research in discussion of this thesis to better understand the stakes of visual ametropia, presbyopia or even aging.

Key words: Driving simulator, Visual degradation, Cognitive load, Driving behavior, Visual acuity, Vision and cognition interaction, Road safety.

Table des matières

Résumé	1
Abstract.....	3
Table des matières	5
Table des figures	7
Table des tableaux.....	8
Table des annexes.....	9
Liste des sigles et des abréviations.....	10
Remerciements.....	12
1. Introduction.....	13
1.1 La conduite automobile.....	13
1.1.1 Quelques chiffres.....	13
1.1.2 Considérations gouvernementales en termes de sécurité routière	13
1.2 Le rôle de la vision en conduite automobile	14
1.2.1 Critères visuels pour l'obtention d'un permis de conduire	14
1.2.2 Acuité visuelle : un indicateur imparfait du comportement de conduite.....	16
1.2.3 Vision et conduite automobile moderne	17
1.3 Le rôle des capacités perceptivo-cognitives en conduite automobile	18
1.3.1 L'attention visuelle en contexte de comportement à risque	18
1.3.2 Capacités visuo cognitives en mobilité.....	19
1.4 Évaluation des capacités visuo cognitives	20
1.4.1 Objectifs.....	20
1.4.2 Hypothèses.....	21
2. Article.....	22
2.1 Abstract	23
2.2 Introduction.....	24
2.3 Materials and methods.....	27
2.3.1 Participants.....	27
2.3.2 Materials	28
2.3.3 Protocol	31
2.3.4 Visual degradation	32
2.3.5 Driving measures and data analysis	32
2.3.6 Statistical analysis	36
2.4 Results.....	38
2.4.1 Discomfort in the driving simulator according to acuity conditions	38

2.4.2	Influence of reduced acuity according to visual and cognitive workload	39
2.5	Discussion	47
2.5.1	Perceptual incoherence provided by the experimental visual inputs disturbance as an enhancer to evaluate motion sickness symptoms suggesting greater discomfort	48
2.5.2	Impact of degraded visual quality in the presence of a double task.....	50
2.5.3	Impact of the simulated visual acuity higher degradation	53
2.6	Conclusion	54
2.7	Acknowledgments.....	55
3.	Résultats supplémentaires	56
3.1	Introduction nouveau jeu de données ainsi que d'une adaptation du DSI	56
3.2	Analyse descriptive de l'impact des amétropies sur les comportements de conduite	58
3.3	Capacités perceptivo-cognitives.....	60
4.	Discussion générale.....	62
4.1	Enjeux liés à la considération unique de la vision de loin pour la conduite automobile.....	62
4.2	Alternatives potentielles au défocus myopique.....	64
5.	Futurs travaux.....	65
6.	Conclusion	66
	Références	67

Table des figures

Figure 1 : Seuil d'acuité visuelle légale pour la conduite automobile au Québec ainsi que seuils recommandés par l'ICO	15
Figure 2 : Schéma représentant un optotype classiquement utilisé pour la mesure de l'acuité visuelle.....	16
Figure 3 : Schéma des fixations et réallocations entre la route, le tableau de bord ainsi que l'outil de navigation lors de la conduite automobile.....	18
Fig 4 : Example of a visual stimulus displayed on the navigation device during the secondary task.....	30
Fig 5 : Protocol. Example of an experimental sequence performed by participants.	31
Fig 6 : Driving speed and car lateral position of a typical participant during the highway scenario.	35
Fig 7 : Mean SSQ scores (\pm standard error) for the visual quality conditions and degradation groups (n = 19 participants).	39
Fig 8 : Success rate on the navigation device visual search task according to visual quality condition and degradation group. Boxes represent the mean success rate \pm standard error to the mean and circles correspond to individual data.....	42
Fig 9 : Mean speed as a function of visual quality conditions and degradation groups.	44
Fig 10 : Speed variability as a function of visual quality conditions and degradation groups.	45
Fig 11 : SDLP as a function of visual quality conditions and degradation groups.	46
Figure 12 : Représentation graphique radar et l'indice global de sécurité des conducteurs (DSI) des participants naturellement myopes (bleu) en comparaison aux participants naturellement emmétropes (rose) au scénario rural (A) ainsi qu'au scénario autoroute (B).	59
Figure 13 : Carte de chaleur des participants selon leur amétropie naturelle au scénario rural (A) ainsi qu'au scénario autoroute (B).	60
Figure 14 : Représentation graphique radar et l'indice global de sécurité des conducteurs (DSI) des participants ayant eu les scores les plus faibles au 3D-MOT (bleu) ainsi que les scores les plus forts (rose) au scénario rural (A) ainsi qu'au scénario autoroute (B).	61

Table des tableaux

Table 1 : Short version of Michaels et al., (2017) studied measures definitions and units in which they were recorded (5).	33
Table 2 : Driving behavior, secondary task and simulator sickness variables normality.....	37
Table 3 : Mean (\pm standard deviation) driving behavior calculated for crash, near crash, mean speed, speed variability, SDLP, maximum brake and distance at maximum brake in optimal and degraded vision conditions for both degradation groups.	40
Table 4 : Frequencies of crashes and near crashes in optimal and degraded vision conditions for both degradation groups.	41
Table 5 : Driving behavior variable means (\pm standard deviations) for each visual condition and degradation group according to the level of cognitive load.	43
Tableau 6 : Variables présentes dans chaque catégorie du DSI pour le scénario rural ainsi que le scénario autoroute.....	57

Table des annexes

Annexe 1 : Certificat d'approbation éthique	73
Annexe 2 : Formulaire de consentement et d'informations	75
Annexe 3 : Questionnaire sur l'inconfort dans le simulateur de conduite automobile (SSQ)	82

Liste des sigles et des abréviations

UFOV: Useful Field of View

3D-MOT: 3-Dimensional Multiple Object Tracker

If you can believe it, the mind can achieve it.

-Ronnie Lott

Remerciements

Dans un premier temps, je souhaite remercier mon directeur de maîtrise, Jocelyn Faubert, ainsi que ma codirectrice de maîtrise et directrice du projet motivant la publication présente dans ce mémoire, Delphine Bernardin. Tous deux ont été de très bons superviseurs à travers toutes les étapes de ce projet. Sans vous, cet accomplissement n'aurait pas été possible. Je vous remercie d'avoir cru en moi et d'avoir apporté chaque jour une touche d'humour et de bonne humeur.

Je tiens également à souligner l'importance de la présence de Laura Mikula, Sergio Romero Mejia, Jesse Michaels et Romain Chaumillon qui ont tous été de très bons superviseurs tout au long de mon parcours au laboratoire Faubert. Vous avez su apporter des réponses claires et précises à mes questionnements.

J'aimerais prendre le temps de mentionner le soutien et les conseils apportés par Khashayar Misaghian, Yannick Roy et Julie-Justine Benoit qui, par leur expérience personnelle avec le monde des cycles supérieurs, ont également été d'une aide précieuse.

Je souhaite souligner la patience et la douceur de Vadim Sutyushev ainsi que l'humour et la bonne humeur d'Eduardo Lugo et de Rafael Doti. Merci à Hadrien Crestant et Élisabeth Nardy pour leur professionnalisme en tant qu'étudiant en optométrie dont les services ont été cruciaux dans la présente étude.

Toute la grande équipe du laboratoire Faubert m'a apporté un soutien inestimable ainsi qu'une multitude de conseils judicieux. Vos parcours sont inspirants et vous rencontrer a été un honneur pour moi. Je vous souhaite tous du succès, du bonheur et la santé.

J'aimerais également exprimer ma gratitude pour le soutien financier du projet de recherche et développement coopératif CRSNG-Essilor, Prompt, la bourse du Réseau de recherche sur la Sécurité Routière (RRSR).

D'un point de vue plus personnel, je tiens à remercier mes proches pour leur intérêt et leur soutien inconditionnel envers mes projets académiques, professionnels et personnels.

1. Introduction

1.1 La conduite automobile

1.1.1 Quelques chiffres

Avec plus d'un milliard de véhicules à moteur en circulation dans le monde en 2010 et une estimation allant jusqu'à 2 milliards en 2030 (1), la conduite est le mode de transport dominant (6). Selon le gouvernement du Canada, il y avait plus de 26,5 millions de conducteurs titulaires d'un permis de conduire dans le pays. Dans la même année, un total de 110 114 collisions, dont 1 743 étant fatales, et occasionnant un total de 152 847 victimes ont été signalées au Canada (7). Dans le monde, le nombre total de décès dus à des accidents de circulation routière s'est élevé à 1,35 million en 2016 alors que les traumatismes dus aux accidents de la circulation ont été identifiés comme la 8e principale cause de décès chez les personnes de tous âges (2). Ces statistiques soulignent l'importance de l'amélioration de la sécurité de conduite, en particulier pour les automobilistes qui, parmi les piétons, les motocyclistes, les cyclistes et les conducteurs de camions lourds, représentent plus de la moitié des victimes de la route (6).

1.1.2 Considérations gouvernementales en termes de sécurité routière

Des efforts considérables ont été déployés au cours des dernières années pour améliorer la sécurité routière et faire des recommandations appropriées concernant l'aptitude médicale à conduire. Le Canada prend les dangers de la conduite au sérieux, notamment en adoptant en 2016 le programme « Stratégie canadienne de sécurité routière 2025 », qui vise à rendre les routes canadiennes les plus sûres au monde. Ceci grâce à, entre autres, une législation plus stricte ainsi qu'une sécurité améliorée dans les véhicules. Cependant, encore en 2018, l'Association canadienne des chefs de police signalait que 80% des collisions et 65% des quasi-collisions étaient associées à des facteurs d'attention. Malgré tout, selon le dernier bilan routier publié par la sûreté du Québec, 2019 aurait été une année record à travers la décennie en termes de réduction du nombre de collisions mortelles et avec blessés. Selon leur rapport, ce nombre, évalué à 340 victimes décédées en 2010, s'évalue à 232 en 2019, une réduction de près d'un tiers. De multiples facteurs seraient liés à cette diminution des décès associés à des collisions routières notamment la détection de comportements à risque. Toutefois, certains comportements risqués sont toujours présents malgré les resserrements

législatifs. Parmi ceux-ci, on retrouve les excès de vitesse, la conduite sous l'effet de drogues ou d'alcool, le non-port de la ceinture de sécurité, mais également les distractions au volant qui seraient la cause de 8% des collisions entraînant un décès en 2019 (6). Dans l'optique où plusieurs chercheurs ont proposé qu'une grande majorité de l'information nécessaire à la conduite automobile provenait de la vision (8), et que cette dernière est fortement sollicitée tant par la route qu'en distance intermédiaire par l'apparition de certains distracteurs présents dans les véhicules comme les messages textes (9) sur les cellulaires, un stimulus visuel massivement répandu, soit atteignant jusqu'à 81% de la population en 2016 (10), ou encore les outils de navigation (11) ou les systèmes de contrôle tactiles (12), l'intérêt d'assurer une bonne vision chez les conducteurs est grandissant. À l'international, l'ONU recommande d'ailleurs une bonne vision et reconnaît l'aspect prioritaire du sujet pour la sécurité routière depuis le 1er avril 2020. Un ensemble d'actions seront alors coordonnées pour promouvoir auprès des instances de chaque pays l'importance de considérer la vision comme un pilier de développement de la santé publique. Dans ce mémoire, nous proposons d'examiner un aspect de la vision, l'acuité visuelle, et son rôle dans les comportements de conduite sécuritaire.

1.2 Le rôle de la vision en conduite automobile

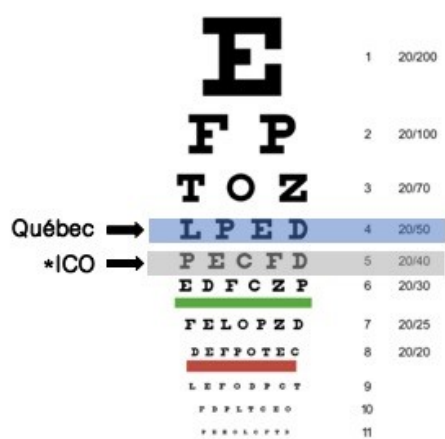
Les réglementations en termes de conduite accordent principalement de la légitimité à la mesure de la vision associée au bas niveau de traitement de l'information visuelle. Les prochains paragraphes présentent : 1. les critères visuels pour l'obtention d'un permis de conduire, 2. le caractère imparfait de l'acuité visuelle en temps qu'indicateur du comportement de conduite 3. ainsi qu'indicateur unique dans le contexte de la vision et la conduite automobile moderne.

1.2.1 Critères visuels pour l'obtention d'un permis de conduire

La première version connue des tests visuels permettant l'obtention du permis de conduire automobile est apparue avec le besoin de lire les plaques d'immatriculation des autres conducteurs. Le test visuel pour l'obtention du permis de conduire au Royaume-Uni comprenait alors l'évaluation de l'acuité visuelle de loin par la lecture de plaque d'immatriculation dont les caractères étaient d'une grosseur de 79 mm de hauteur par 50 mm de largeur. La performance était évaluée en vision de loin, soit à une distance de 20 mètres (13). Au Québec, pour les conducteurs non commerciaux, donc détenant un permis de conduire de classe 5, les normes visuelles pour la conduite automobile prévoient qu'un

conducteur doit satisfaire une acuité visuelle minimale de 6/15 ainsi qu'avoir un champ visuel minimum de 100° le long du méridien horizontal et 10° et 20° continus au-dessus et au-dessous du point de fixation (14).

Dans les pays évaluant les capacités visuelles pour l'obtention du permis de conduire ou le renouveler, les conducteurs doivent satisfaire une exigence d'acuité visuelle minimale. Ces normes d'acuité visuelle sont les mêmes que celles en vigueur au Québec dans la plupart des autres provinces et territoires du Canada, sauf au Nouveau-Brunswick et en Nouvelle-Écosse où l'acuité visuelle légale minimale est de 6/12 pour le meilleur œil (15) correspondant ainsi à la proposition de l'International Council of Optometry (ICO) (Figure 1) (16). À plus grande échelle, un examen approfondi a révélé des disparités frappantes entre les normes visuelles de conduite en Amérique du Nord. Une enquête menée auprès des autorités de transport a montré que les exigences de vision aux États-Unis sont basées sur les recommandations de plusieurs organisations, conduisant ainsi à des normes disparates entre les différents États. D'un autre côté, les normes de vision canadiennes découlent principalement des recommandations de la Société canadienne d'ophtalmologie et de l'Association canadienne des optométristes (17). Dans l'ensemble, il existe un accord général sur le manque de justification scientifique pour étayer les normes visuelles actuelles utilisées pour l'évaluation des capacités de conduite (15, 17-19). À ce jour, aucune étude n'a clairement établi quel seuil d'acuité visuelle empêche une personne de conduire en toute sécurité. Toutefois, de façon avant-gardiste, l'Australie demande depuis 2008, en plus des critères d'acuité visuelle, la réussite d'un test de perception des dangers routiers pour les individus désirant obtenir un permis de conduire.



*ICO: International Council of Optometry

Figure 1 : Seuil d'acuité visuelle légale pour la conduite automobile au Québec ainsi que seuils recommandés par l'ICO

1.2.2 Acuité visuelle : un indicateur imparfait du comportement de conduite

L'acuité visuelle est une mesure permettant d'identifier la capacité individuelle de percevoir adéquatement des objets à une distance donnée, plus précisément le pouvoir de discrimination le plus fin au contraste maximal entre un test et son fond (20) et est souvent mesurée à l'aide d'optotypes (Figure 2). Parmi les outils classiques permettant la mesure de l'acuité visuelle de loin se retrouvent, entre autres, l'échelle d'acuité Snellen, ETDRS et Bailey-Lovie (21). À travers la communauté scientifique, un débat est présent à propos de la place de l'acuité visuelle comme indicateur de la performance de conduite. Ainsi, de nombreuses études n'ont pas pu lier empiriquement les critères légaux d'acuité visuelle avec les comportements de conduite (3, 4, 15, 17-19, 22).



Figure 2 : Schéma représentant un optotype classiquement utilisé pour la mesure de l'acuité visuelle.

La lettre "E" est créée pour représenter une hauteur de 5' d'arc alors que chacune de ses 3 branches et 2 espaces entre les branches de la lettre représentent individuellement 1 minute d'arc. Une acuité de 6/6 signifie qu'un individu lit une lettre de 5' à une distance de 20 pieds.

De plus, la variété de choix d'échelles d'acuité pose un réel enjeu de comparaison puisque la fidélité des résultats obtenus est remise en cause faisant en sorte que la valeur d'acuité visuelle soit différente selon le test utilisé (23, 24) malgré que la reproductibilité des résultats d'un même test ait été démontrée (25). La prise de mesure de l'acuité visuelle a été démontrée comme ayant des biais associés à l'examineur notamment puisque certains font l'examen lettre par lettre (26) ou encore ligne par ligne. Certains examinateurs donnent des rétroactions ou encouragent les patients à faire des efforts de lecture supplémentaire tandis que d'autres ne le font pas (27). Ainsi, le choix de l'examineur ou de la technique d'évaluation de l'acuité visuelle se voit apporter différentes variations pour une même métrique. Comme mentionné précédemment, cette mesure est considérée pour l'obtention et le maintien du permis de conduire, mais fait également partie des examens oculaires de

routine pour le grand public ainsi que chez les individus souffrant de basse vision. Dans le cas de basse vision particulièrement, mais également de façon générale, le flou est étudié comme ne découlant pas uniquement de l'acuité visuelle, mais également d'enjeux de sensibilité au contraste. Une réduction de l'acuité visuelle n'est pas un phénomène exclusivement associé aux amétropies, mais peut également être occasionnée par une presbytie non corrigée ou une pathologie oculaire comme la cataracte ou la dégénérescence maculaire. L'ensemble des travaux examinant le rôle des mécanismes sensoriels visuels ont traité l'acuité visuelle indépendamment des fonctions cognitives. Ce constat ainsi qu'un ensemble de travaux du laboratoire nous ont menés à reconsidérer le rôle de l'acuité visuelle en tant que facteur important en interaction avec les mécanismes cognitifs.

1.2.3 Vision et conduite automobile moderne

La vision est un sens crucial en conduite automobile et notamment en ce qui a trait aux traitements de la complexité et de la dynamique de l'environnement de conduite et à la prise de décision. Une mauvaise vision peut drastiquement affecter les chances de réagir au moment opportun dans un contexte de partage de la route donc peut entraîner des dangers pour soi et pour autrui (28). L'importance d'une vision optimale est connue des conducteurs, mais le port d'une correction adéquate lorsque nécessaire est régulièrement omis par ces derniers (29). Jusqu'à maintenant, les enjeux liés à l'importance de l'acuité visuelle concernaient, au niveau légal, l'acuité visuelle permettant de voir net les objets de loin ou alors des seuils d'acuité visuelle très bas, liés à une pathologie oculaire. Pourtant, la modernisation et l'évolution de la demande visuelle à l'intérieur des véhicules soulèvent la question de besoins visuels différents pour les conducteurs. L'histoire de l'automobile s'est vue marquée par l'apparition des outils de mesures de vision sur les tableaux de bord de voiture. Au début du 20e siècle, les outils étaient parfois, de simple aiguille, pour lesquels le conducteur engageait des processus de détection, parfois des gros chiffres pour lesquels le conducteur avait une accessibilité visuelle facilitée par la grosseur des chiffres. La modernisation au sein des véhicules, notamment en considérant les débuts de l'industrie en 1909 avec la Ford T et son design minimaliste comprenant uniquement un ampèremètre, induit de fréquents changements de demande visuelle en termes d'accommodation et de convergence. Aujourd'hui, l'évolution des designs d'intérieur est considérable et est marquée d'une augmentation de la demande visuelle par l'arrivée de plus d'information, plus de sollicitation, plus de hautes fréquences spatiales sur les différents outils du tableau de bord (Figure 3). D'ailleurs, la charge mentale qui y est associée est notamment prise en compte dans les normes ISO (30, 31). Notons que les normes sont mises en place pour une population ayant

une vision optimale ou corrigée, il nous semble donc intéressant d'étudier l'impact d'une mauvaise vision sur ces activités quotidiennes sollicitant hautement les ressources cognitives.



Figure 3 : Schéma des fixations et réallocations entre la route, le tableau de bord ainsi que l'outil de navigation lors de la conduite automobile.

1.3 Le rôle des capacités perceptivo-cognitives en conduite automobile

1.3.1 L'attention visuelle en contexte de comportement à risque

La neuroscience propose trois grandes catégories des fonctions cognitives soit l'état d'alerte, l'orientation et les fonctions exécutives, connus comme la trinité attentionnelle de Posner (32). L'état d'alerte et d'orientation seraient respectivement responsables de la vigilance et de la performance dans une tâche puis de l'engagement, du désengagement et de la transition voire la réallocation entre deux ou plusieurs stimuli. Les neurones Von Economo seraient suspectés d'être responsables, du moins en partie, du contrôle exécutif ainsi que de l'autorégulation caractéristique des humains en comparaison aux autres êtres vivants (32-34). De façon intéressante, une méta-analyse a démontré que l'attention pouvait être entraînée et que la plasticité en découlant pouvait être transférable à d'autres tâches ainsi qu'être mesurable par des tests cognitifs, et ce, dans plusieurs catégories d'âge et types de

population (35). Plusieurs stades tels que l'attention sélective, divisée, soutenue et exécutive sont des termes acceptés à travers la littérature pour caractériser les diverses catégories d'attention présentes dans divers contextes. Selon l'American Psychology Association, l'attention visuelle serait définie comme suit :

“Le processus par lequel un élément (la cible) est sélectionné pour analyse parmi plusieurs éléments concurrents (les distracteurs).”

L'attention ouverte, plus souvent associée au mouvement des yeux, ainsi que l'attention secrète, soit celle que l'on a sans forcément en avoir conscience (36) sont également des qualificatifs couramment pris en compte dans l'étude de l'attention. De plus, les stimuli qui captent l'attention sont eux aussi catégorisés soit en étant exogènes, c'est-à-dire externes ou encore endogènes, c.-à-d. internes et intentionnels (37). Malheureusement, l'attention visuelle est sujette à des fluctuations notamment à une diminution avec l'âge (3), mais également chez les individus de tous âges, dus à l'interaction entre les mécanismes attentionnels et visuels faisant en sorte qu'il soit possible parfois de regarder sans voir malgré une bonne vision.

1.3.2 Capacités visuo cognitives en mobilité

Les capacités visuo cognitives comprennent un vaste éventail d'habiletés sous-tendues par le traitement de haut niveau des entrées visuelles sensorielles. Le traitement de haut niveau permet de traiter l'environnement visuel, ainsi que des réactions cohérentes face à ce dernier. La perception du mouvement biologique, par l'entremise de points lumineux placés pour représenter les articulations principales d'un être vivant en mouvement, permettant de percevoir la mobilité chez les animaux (38), mais également jusqu'à pouvoir estimer l'émotion, le genre et le poids d'un individu (39-44) en est un exemple. Chez les piétons, le coût de la réallocation attentionnelle entre le cellulaire et une tâche de mobilité a été observé par une diminution des capacités à percevoir la direction d'un marcheur alors que l'individu était en train de texter sur un tapis roulant (45). Cette dégradation du comportement sécuritaire des piétons traduit, entre autres, une altération des capacités de jugement qui sont importantes en contexte de mobilité et d'autant plus sur la route. Auprès des conducteurs, les capacités visuo cognitives ont été démontrées comme étant critiques dans la prédiction du comportement de conduite à risque notamment puisqu'elles sont liées à l'occurrence de collisions sur la route, la diminution de la vitesse moyenne ainsi que la variation de la position

du véhicule sur l'axe médio-latéral. Cet enjeu liant conduite et capacités visuo cognitives serait également sujet à une évolution au fil de la vie puisqu'avec l'âge, notamment dû au vieillissement normal, les capacités de conduite sécuritaires diminueraient (5). Ceci nous pousse à nous intéresser au lien entre la cognition et l'augmentation de la charge mentale pouvant être engendrée par une dégradation visuelle.

1.4 Évaluation des capacités visuo cognitives

À travers le temps, les outils de mesure des capacités perceptivo-cognitives ont évolué en passant de la mesure statique par le Useful Field of View® (UFOV) à une mesure dynamique avec le 3-Dimensional Multiple Object Tracking® (3D-MOT). Le UFOV, composé de 3 sous-tests, mesure tout d'abord la vitesse de traitement de l'information (UFOV 1), l'attention divisée (UFOV 2) puis l'attention sélective (UFOV 3) (46). Plus récemment, le 3D-MOT, a été développé pour mesurer le seuil de vitesse maximum individuel auquel un individu peut suivre des yeux correctement un nombre de balles donné dans un espace tridimensionnel mis en place à l'aide du Neuro-Tracker® (47). Ce test perceptivo-cognitif visant l'obtention d'un score de vitesse de traitement de l'information combine des demandes touchant à la mémoire de travail, l'attention soutenue, divisée, sélective ainsi qu'une capacité d'inhibition sélective. De plus en plus d'intérêt est dirigé vers cet outil, notamment pour son potentiel d'entraînement des capacités perceptivo-cognitives transférables à des tâches connexes (48). Des entraînements au 3D-MOT ont ainsi été proposés à des athlètes de haut niveau (47) et pourraient éventuellement être mis en place dans le cadre de la prise de décision en contexte de conduite automobile. L'augmentation de la charge visuelle associée à l'utilisation d'un outil technologique, comme un cellulaire par exemple, lors de la marche ainsi que l'aspect risqué de ce comportement a déjà été démontré (45, 49). Les tâches de mobilité et d'autant plus la conduite automobile mettent en jeu les ressources cognitives limitées. Nous nous sommes donc questionnés sur l'impact de la charge mentale associée à la dégradation visuelle et avons entrepris d'observer l'interaction entre cette dernière et un contexte de charge mentale élevée notamment à travers une tâche engageante de conduite automobile accompagnée d'une tâche de navigation.

1.4.1 Objectifs

Cette étude a pour but d'explorer l'impact d'une baisse du seuil d'acuité visuelle créée par défocus myopique chez les participants sur les comportements de conduite. Cette dégradation de l'acuité visuelle a été appelée dégradation de la qualité visuelle, car elle induit plusieurs modifications visuelles dont un découplage de la relation accommodation-

convergence, un défocus myopique, un « *lead* » accommodatif ainsi que des effets de perception visuelle, visuovestibulaire et proprioceptifs associés.

1.4.2 Hypothèses

Deux hypothèses ont été formulées avant le début des expérimentations :

H1: Une acuité visuelle réduite aurait un impact négatif sur les comportements de conduite automobile, et ce, même lorsque l'acuité correspond au seuil légal pour l'obtention du permis de conduire.

H2: L'impact de la réduction d'acuité serait plus néfaste lors de l'interaction avec une demande cognitive et visuelle élevée, soit lors de la conduite en double tâche avec l'outil de navigation GPS.

L'impact de la dégradation de la qualité de vision a été mesuré dans un contexte de conduite simulée impliquant une faible demande cognitive ainsi que d'acuité visuelle, soit dans le scénario rural, ainsi qu'à travers le scénario autoroute impliquant une forte demande cognitive accompagnée d'une demande en acuité intermédiaire accompagnant la demande en acuité de loin présente en conduite automobile.

2. Article

Increased visual and cognitive demands emphasize the importance of meeting visual needs at all distances while driving

Amigale Patoine^{1*}, Laura Mikula¹, Sergio Mejía Romero¹, Jesse Michaels¹, Océane Keruzore¹, Romain Chaumillon¹, Delphine Bernardin^{1,2}, Jocelyn Faubert¹

¹ Faubert Laboratory, School of optometry, Université de Montréal, Montréal, Québec, Canada

² Essilor International Research and Development, Essilor Canada Ltd, Montréal, Québec, Canada

*Amigale Patoine

E-mail : amigale.patoine@umontreal.ca (AP)

2.1 Abstract

Having an optimal quality of vision as well as adequate cognitive capacities is known to be essential for driving safety. However, the interaction between vision and cognitive mechanisms while driving remains unclear. We hypothesized that, in a context of high cognitive load, reduced visual acuity would have a negative impact on driving behavior, even when the acuity corresponds to the legal threshold for obtaining a driving license in Canada, and that the impact observed on driving performance would be greater with the increase in the threshold of degradation of visual acuity. In order to investigate this relationship, we examined driving behavior in a driving simulator under optimal and reduced vision conditions through two scenarios involving different levels of cognitive demand. These were: 1. a simple rural driving scenario with some pre-programmed events and 2. a highway driving scenario accompanied by a concurrent task involving the use of a navigation device. Two groups of visual quality degradation (lower/ higher) were evaluated according to their driving behavior. The results support the hypothesis: A dual task effect was indeed observed provoking less stable driving behavior, but in addition to this, by statistically controlling the impact of cognitive load, the effect of visual load emerged in this dual task context. These results support the idea that visual quality degradation impacts driving behavior when combined with a high mental workload driving environment while specifying that this impact is not present in the context of low cognitive load driving condition.

Keywords: Driving simulator, Visual degradation, Cognitive load

2.2 Introduction

With more than 1 billion motor vehicles in operation in the world as of 2010 and an estimated increase to 2 billion for 2030 (1), driving is one of the most dominant types of transportation. Worldwide, the overall number of road traffic deaths reached 1.35 million in 2016 and road traffic injury has been identified as the 8th leading cause of death for people of all ages (2). Vision is undoubtedly important in driving safety as it allows drivers to perceive the road clearly and anticipate unexpected dangerous events (50). Regardless of individual countries' regulations, all drivers must meet a minimum visual acuity requirement in order to obtain and, possibly, renew their driving license (51). For non-commercial drivers in Québec, Canada (Class 5 driver's license), the visual acuity should be at least 20/50 as measured by a Snellen chart with or without corrective lenses, both eyes examined together (52). While there are striking disparities across countries' driving visual standards (17, 51), the International Council of Ophthalmology has recommended a minimum visual acuity of 20/40 for drivers (16).

Even though static visual acuity is the most common clinical test taken into consideration when applying for the driver's license, there is a clear lack of scientific justification to support current visual acuity standards (3, 4, 15, 17-19, 22). It has been reported that simulated visual acuity alteration mainly affects road sign detection and road hazard management behavior (53, 54) when reduced below 20/40, whereas the ability to operate a vehicle is not significantly impaired until vision is degraded to 20/100 or below (53, 55). As another example, steering accuracy and lane keeping have been shown to remain relatively stable, even in the presence of high levels of blur going up to 6/197 (56, 57). In fact, the relevant literature fails to reveal direct evidence for the role of visual acuity in accidentology and risky driving behavior (53, 58), thus suggesting that static visual acuity measurement alone might not be a reliable predictor of driving safety (50, 59). Indeed, Wood et al. highlighted that increased cognitive demands associated with experimentally induced visual perturbations

(blur or cataract) interfered with driving behavior (60). More specifically, they reported longer time to complete a course, more hazard hits as well as impaired road sign recognition in presence of a secondary task on the dashboard, and these effects were more pronounced in impaired than in normal vision conditions. This result emphasizes the importance of both visual and cognitive demands to better account for the effects of visual perturbations during driving.

In accordance with this statement, other studies have focused on the interaction between vision and cognition while driving by investigating the role of visuo-cognitive capacities in road safety. A large number of studies have studied the Useful Field Of View (UFOV) in order to shed light on the link between driving behavior and perceptual-cognitive capacities. This perceptual-cognitive test is divided into three subtests which assess visual processing speed (UFOV 1), divided attention (UFOV 2) and selective attention (UFOV 3) capacities. The obtention of low scores on the UFOV 2 and 3 subtests have been shown to be predictive of road accidents (61-63) and driving behavior (63). More recently, the score obtained in the 3-dimensional multiple object tracking (3D-MOT) assessing visual processing speed, working memory as well as selective, divided, distributed and sustained attention (48) has been demonstrated as a relevant predictor of driving behavior in a driving simulator (5, 64). Emphasizing the importance of visuo-cognitive capacities in daily dynamic activities, Michaels et al. also indicates that task workload is a relevant indicator for revealing differences in driving behavior between individuals (5). This evidence suggests that higher-order visual processing, such as visual attention, is an important component in driving behavior (65, 66) alongside good visual sensory capacities.

Since the beginning of the 20th century, the evolution of car design has not only improved driver comfort and safety, but has also modified the visual content and display of the information in the dashboard. This modification is believed to have led to an increase in the visual and cognitive resources needed while driving (12). With the arrival of new technologies such as smartphones, heads-up displays and multiple options of tangible user interfaces to display navigation or vehicle information, the visual demand on the car dashboard, which in

current modern times also includes all the interior front devices—and thus intermediate distance demands—has considerably increased. In addition to the far distance visual acuity, the closer visual acuity demand becomes more prominent, which requires additional binocular accommodation and convergence capacities. Moreover, frequent reallocation of attentional and visual focus between driving tasks at multiple distances represents a challenge for finite mental resources (67). The use of in-vehicle devices requires drivers' to use multitasking strategies in order to preserve safe interaction between visual and cognitive mechanisms. For example, higher glance frequency at road intersections has been indicated to result in increased visuo-cognitive engagement and therefore provides greater road safety in the elderly (68). This suggests that failure to meet multiple visual demands can result in a potential risk of distraction because of limited attentional resources available to switch between the road and the car dashboard. Therefore, risk will potentially also exist in presence of uncorrected myopic defocus, refractive blur or decreased binocular integration. In fact, these were demonstrated to affect the response time to read (69), the cueing detection in a contextual cueing paradigm (70), and the overall mental workload of the multiple tasks (71, 72). These evidences tend to suggest that these visual alterations could also affect driving.

The aim of this study is to investigate how a degradation in visual quality induced by a myopic defocus impairs driving behavior, in particular when the task workload is high. The experiment consisted of a driving simulator task in which young adults had to complete two scenarios (i.e. rural and highway) with distinct cognitive demands. In the rural scenario, participants performed a single driving task—inducing lower task workload—whereas in the highway scenario, they drove on a road while simultaneously engaging in a visual search task—inducing higher task workload—in their periphery, adjacent to the dashboard. Visual quality degradation was induced by means of contact lenses with specific additive power in order to achieve two different levels of visual acuity reduction. In both scenarios, the driving behavior of participants was analyzed as a function of the different visual conditions. We hypothesized that participants with visual quality degradation would show greater impairment of their driving

behavior when both visual and cognitive demands are the highest (i.e., during the navigation task in the highway scenario) and that this effect would be more important with a higher visual quality degradation. Both speed ([73-79](#)) and SDLP ([80-83](#)) are widely studied variables in order to understand people's reactions to driving. We propose the hypothesis that the speed will be modulated by an increase in its variability as well as a decrease in its average and that SDLP will undergo an increase.

2.3 Materials and methods

2.3.1 Participants

A total of 21 French speakers' volunteers (5 women, 16 men), between 21 and 34 years old (mean \pm SD = 24.8 \pm 3.7) were recruited at the Université de Montréal (Québec, Canada). All participants gave their informed written consent prior to the experiment which conformed to the Declaration of Helsinki (2013). Experimental procedures were approved by the health research ethics committee at Université de Montréal (Comité d'éthique de la recherche clinique (CERC); certificate N°18-090-CERES-D).

All participants had normal or corrected-to-normal vision and were in good general health. In addition, they all had a valid driver's license for at least five years (maximum 16 years). They met the legal criteria for driving in Québec, Canada: having a field of view of at least 100 continuous degrees along the horizontal meridian, 10 continuous degrees above fixation, and 20 continuous degrees below fixation with both eyes open and examined together (Légis Québec; Statutes of Quebec, 2015) and far visual acuity greater than or equal to 6/15 according to the Early Treatment Diabetic Retinopathy Study scale (ETDRS) located at 5 meters. Participants were recruited based on their degree of ametropia: myopia and bilateral hypermetropia severity had to be lower than -3 or +3 diopters (D), respectively. Other refractive errors had to be inferior or equal to 0.75D for astigmatism and 1.00D for anisometropia. To

take part in the experiment, participants with a refractive error were asked to wear their usual contact lenses to be corrected to normal. For logistical reasons in connection with eye tracking analyzes not covered in this thesis, participants with a refractive error wearing only glasses were not selected for the study.

2.3.2 Materials

Apparatus

The Virage VS500M car driving simulator (Virage Simulation Inc.®, Montréal, Canada) was used for the driving tasks. Participants were seated in a faithful reproduction of a driver's cabin with a dashboard, a steering wheel, pedals, ventilation and a gearbox. The visualization system is composed of a generator 5-channel PC images and three 52-inch high-definition rear-projection screens (1280 × 720 pixels), thus providing the driver with a 180° field of vision. It also includes two side screens, behind the driver's seat, representing the blind spots. Finally, interior and exterior mirrors are integrated into the main front screens. A three-axis platform with electric cylinders was used to mimic the motion as well as the vibrations of a car by simulating the effect of accelerations, braking, but also vibrations generated by the engine and the tire contact on the road. The driving simulator also included a high-fidelity 5.1 stereophonic sound system which correlated with road conditions such as speed. Furthermore, additional realism was provided by the simulation of the Doppler effect which allowed for the recreation of noises generated by surrounding road traffic. In addition to the driving task, participants had to perform a visual search task (Fig 4) on a navigation device. An 8-inch Newer NW801H monitor was used for the visual search task. The navigation device was positioned at the right of the participants adjacent to the dashboard at the level of the car's ventilation system. Participants were seated with their eyes at an approximate distance of 65 cm from the device, according to participant's comfort, corresponding to an average distance between a navigation

tool and the human eye. The monitor provided 160 degrees viewing angle with a standard 1024x768 pixel resolution and 500:1 contrast level. The images presented to the participants fitted the navigation device dimensions. The names of cities associated with highway exits as well as the numbers of these exits were written in size 15 Calibri font. The target word of the visual search ("Montreal"), was therefore 2.50 cm wide by 0.50 cm high.

Experimental Design

The rural scenario was designed to simulate a straight road between and through small towns during a sunny day. It includes various hazardous events such as pedestrians crossing the street unexpectedly or cars infringing traffic regulation. Participants had to drive as they would in real life, obeying speed limits, road signs and considering other road users. At the beginning of the experiment, participants were told that they would encounter three different speed limits (90, 70 and 50 km/h) depicted on road traffic signs during the driving. The speed constraint was imposed so as to avoid potential compensation strategies such as a reduction in naturally adopted speed by some participants (5). In order to help them monitor their speed, the driving simulator was programmed to produce a high pitch sound when participants were driving too fast and a low pitch sound when they were driving too slowly. In both scenarios, the participants were free to choose their preferred position with respect to the traffic lane.

The highway scenario consisted of a simple primary driving task, also on a straight road, paired with a secondary task displayed on a navigation device. The presence of these two concurrent tasks imposed greater visual and cognitive demands on participants, thus resulting in a higher task workload. The driving scenario has been designed to reproduce the insertion and exit of a highway. At the beginning of the experiment, participants were instructed to maintain a speed of 90 km/h as accurately as possible and the speed limit also appeared on road traffic signs during the driving. The secondary task consisted of a visual search task presented on a GPS navigation tool, located in the periphery on the car center console. This

task was used in order to get participants to reallocate their attention between the road and the navigation device throughout the scenario, therefore challenging visual and attentional resources. The visual search task comprised 7 different visual stimuli depicting road direction signs with several pieces of information and city names (Fig 4). The presentation order of the GPS events, each lasting 6 seconds, was randomized using Matlab software. Participants had to find the number of the exit associated with the city “Montreal” and utter it out loud to the experimenter. Participants were permitted to answer both while the stimuli were present or after they disappeared and also to correct their response in case of self-recognized error.

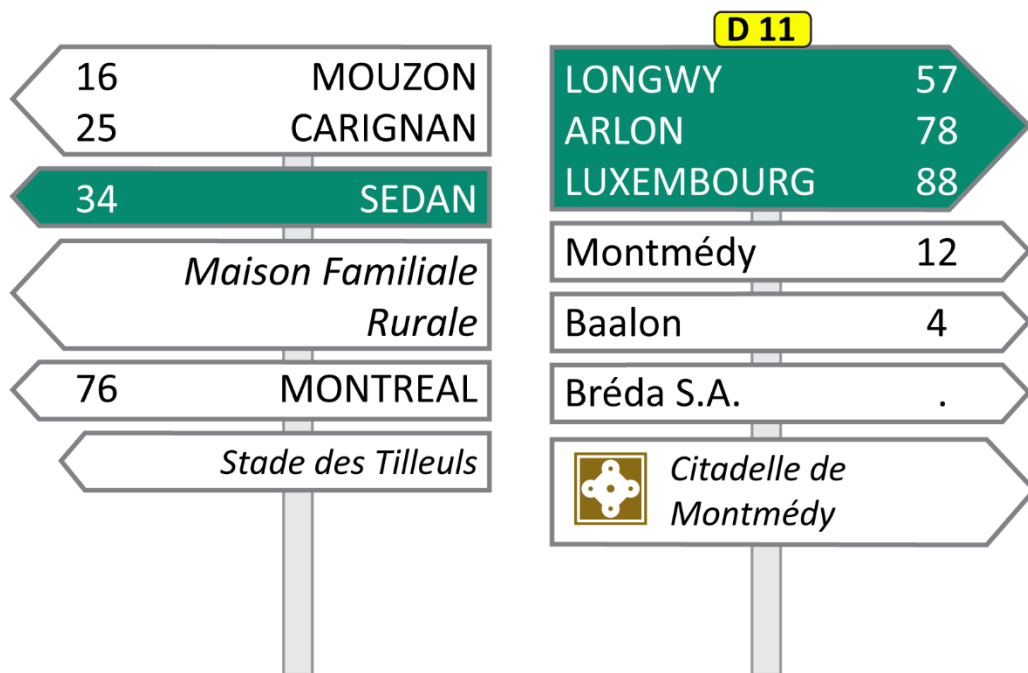


Fig 4 : Example of a visual stimulus displayed on the navigation device during the secondary task.

Multiple city names, with no semantic link, and in different typographies, both to avoid prediction from the participants, were displayed different types of road direction signs. The participant had to detect the city “Montreal” and say the associated number out loud (76 in this example).

2.3.3 Protocol

Each participant performed a single session lasting around 2h30m. As illustrated in Fig 5, the session started with visual pre-tests including ETDRS for visual acuity, Randot for stereoacuity and Humphrey for visual field. Participants then performed a short familiarization scenario with the driving simulator, as recommended by numerous sources (84, 85). Afterwards, participants completed two scenarios in the driving simulator, followed by a Simulator Sickness Questionnaire (SSQ). Participants did the familiarization and the driving portion of the experiment twice: one with optimal vision and another one with degraded vision. For each participant, the order of the visual conditions (optimal and degraded vision) and of the driving scenarios (rural and highway) was counterbalanced. The first familiarization—regardless of the order of the acuity condition and the scenarios performed—was 10 minutes long. The second was shorter, representing an additional 2 minutes of driving. The choice of the familiarization duration was influenced by the work of (86), who proposed that 5 to 10 minutes of driving in a simulator are effective in promoting the comfort of the participants.

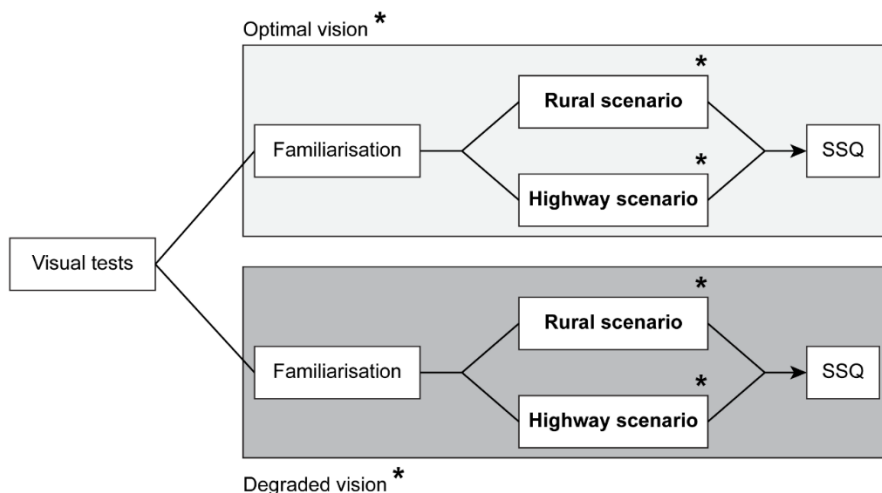


Fig 5 : Protocol. Example of an experimental sequence performed by participants.

The order of the visual conditions (optimal and degraded vision) and the driving scenarios (rural and highway) was counterbalanced across participants, as depicted by the asterisks.

2.3.4 Visual degradation

The 21 participants were divided into two different groups according to a targeted visual quality reduction achieved by the use of contact lenses. This manipulation was executed in order to examine the effect of different levels of deterioration in the quality of vision on driving behavior. The first group of 11 participants (24.2 ± 3.5 years old), entitled “lower degradation” group, had a visual quality degradation to 6/15 corresponding to the legal visual standard for driving in Québec, Canada. The second group of 10 participants (25.5 ± 3.9 years old), entitled “higher degradation” group, had a visual quality degradation equal to 6/75. This acuity threshold was chosen in order for participants to get blurred vision at the approximate distance of the simulator screen (120 cm). Distance between the participant and the simulator screen could vary by a few centimeters since the latter adjusted the distance from the driver's seat according to their comfort and according to their size. The reduction in acuity was achieved by an optometrist through the use of the ETDRS optometric test. For the degraded visual conditions, the power of the contact lenses was defined by calculating the difference between the target visual acuity threshold and the visual acuity of the participant, assessed without correction. The additive power of the contact lenses was then inducing a myopic defocus resulting in a decrease in visual acuity. Daily disposable contact lenses were used and discarded after each experimental session in order to prevent any risk of contamination. Contact lenses were removed at any time if any discomfort was experienced by the participant.

2.3.5 Driving measures and data analysis

Driving behavior was assessed by seven driving variables, divided into three categories, as shown in Table 1. Those variables have previously been identified as significant and non-redundant driving behavior measures for the rural scenario (5). For each data point, speed equal to 0 km/h, inferior to 10 km/h or recorded 100m before or after an event were

discarded from the averaging. Additionally, for each data point, lateral position recorded 10 seconds before and after a lane changing were discarded from the averaging. Mean speed was computed using a simple average formula (i.e. $MS = \text{mean}[X]$) in which X as the valid data after exclusions. Speed variability was computed using $SV = \sqrt{(\text{mean}(X - \text{mean}(X))^2)}$. Standard deviation of the lateral position (SDLP) was computed using 2 steps, first to obtain the mean lateral position (LP) (i.e. $MLP = \text{mean}[LP]$) and second to obtain the SDLP (i.e. $SDLP = \sqrt{(\text{mean}(LP - \text{mean}(LP))^2)}$).

Table 1 : Short version of Michaels et al., (2017) studied measures definitions and units in which they were recorded (5).

In this table, n corresponds to an undefined unity, m to meters, km/h to kilometers per hour, * to variables in the highway scenario.

Category		Measure	Unit	Description
Classical driving variables	1	Crash	n	Number of crashes per experimental condition.
	2	Near crash	n	Number of near crashes per experimental condition. When within an event: <ul style="list-style-type: none"> - Subject brakes harder than a given threshold (0.7) while driving at a speed greater than 18 km/h - The steering wheel is turned more than 60 degrees while driving faster than a speed threshold (18 km/h) - The participant drives within 3 m of an object while travelling at a speed greater than 36 km/h

	3	Mean Speed*	km/h	Average speed of all driving in each experimental condition.
	4	Speed variability*	km/h	Standard deviation of the speed in each experimental condition.
	5	SDLP*	m	Standard deviation of lateral position in each experimental condition.
Abrupt or uncontrolled actions	6	Max brake	n	Hardest amount of braking applied during events of interest in each experimental condition. Where 0 = no braking applied, 1 = pedal is fully depressed and where all values in between are possible scores.
Anticipation while facing hazardous events	7	Distance at max brake	m	Distance from object at which "Max brake" is recorded in each experimental condition.

Three driving variables were analysed in the highway scenario: mean speed, speed variability and SDLP. Definitions of the metrics remain the same for both scenarios, but exclusion and computation of data were slightly different. Data from the three metrics were excluded if greater or less than 3 standard deviation from the mean. The standard deviations of each metric were first calculated for each GPS event and then averaged across all seven events. Unlike the rural scenario, participants had to perform a secondary visual search in addition to the primary driving task (i.e., double task). The secondary task was presented seven times throughout the scenario (Fig 6, correct and incorrect responses are represented by green and red shaded areas, respectively). The duration of each GPS event was 6 seconds and a random delay of several seconds was introduced in between two consecutive

presentations. A reference period of 60 seconds, was used as a baseline to assess driving behavior without interference of the secondary task—thus, single task. The reference was initially divided into two 30-s time windows: one before the first GPS event and another one after the last GPS event (Fig 6, blue shaded areas). Start and end times as well as the length for each window were adjusted in order to discard time frames with highly variable speed (e.g., abnormal acceleration or abrupt braking) which ensured to have a 60-second reference period for every participant, with relatively stable driving speed. To compute the speed variability and the SDLP during the reference, standard deviations were computed for both time windows separately and were then averaged. For both driving scenarios, data were excluded if the participant had a velocity inferior to 70 km/h or 100 meters before and 100 meters after a detected crash or near crash. The data processing and the computation of the driving variables were performed using a custom-written Matlab® toolbox (The MathWorks, Natick, MA, USA).

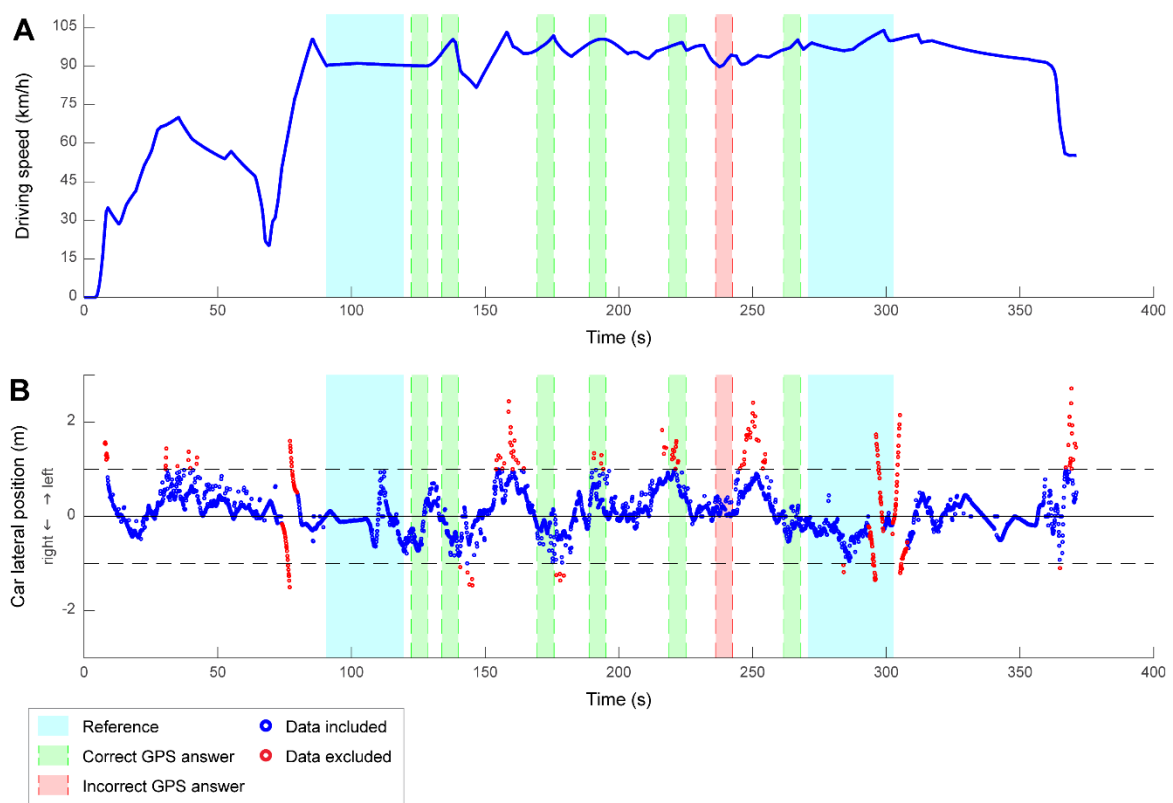


Fig 6 : Driving speed and car lateral position of a typical participant during the highway scenario.

(A) Driving speed (in km/h) as a function of time. At the beginning of the scenario (around 70 s), the car enters the highway, as shown by the increase in speed. Then, since the driver was instructed to keep a constant velocity of 90 km/h, the car speed stabilizes during the rest of the scenario and until the exit of the highway. (B) Car lateral position (in m) as a function of time. The center of the road corresponds to the solid horizontal black line, both sides of the road are represented by the dashed horizontal black lines and the blue and red dots represent the raw data.

2.3.6 Statistical analysis

Firstly, the discomfort experienced by participants in the driving simulator was measured. The three SSQ subscores (nausea, oculomotor symptoms and disorientation) and the total SSQ scores were analyzed by means of two-way mixed ANOVAs with visual condition (optimal or degraded vision) as a within-subjects factor and degradation group (lower and higher degradation) as a between-subjects factor. The data of two participants were excluded from the SSQ analysis, due to an inability to collect data, allowing a total of 19 participants to examine the discomfort in the simulator. The rest of the analysis included a total of 21 participants.

Secondly, the driving behavior in both rural and highway scenarios was assessed to evaluate the effect of increased visual and cognitive demands. In the rural scenario, seven different variables (see paragraph 2.5) were used to describe participants' driving behavior. Those variables were analyzed using two-way mixed ANOVAs with visual condition (optimal or degraded vision) as a within-subjects factor and degradation group (lower and higher degradation) as a between-subjects factor.

Finally, in the highway scenario, the behavior on the secondary task (i.e. visual search task displayed on a GPS navigation tool while driving) was measured by the success rate, which corresponds to the proportion of correct responses. Success rate on the secondary visual search task was analyzed using two-way mixed ANOVAs with visual condition (optimal or degraded vision) as a within-subjects factor and degradation group (lower and higher degradation) as a between-subjects factor. Three driving variables were measured in the highway scenario (see paragraph 2.5) and were subject to two-way analyses of covariance

(ANCOVAs). The ANCOVAs allowed testing for the effects of visual condition (optimal or degraded vision) and degradation group (lower and higher) on the driving variables, while considering the cognitive load (single versus double task) as a covariate. This, in order to reduce the variability of response at the double task, bring out the visual effect. In the case where variables did not follow a normal distribution, Box-Cox transformations were applied in order to adjust for skewness in the data (Table 2). Statistical thresholds were set at $P < 0.05$.

Table 2 : Driving behavior, secondary task and simulator sickness variables normality.

* representing that the variable underwent a Box Cox transformation.

Driving behavior In the rural scenario	Driving behavior In the highway scenario	Simulator sickness
Crashes*	Speed	Nausea*
Near crashes*	Speed variability*	Oculomotor*
Max brake	SDLP*	Disorientation*
Distance at max brake*		Total*
Speed	Success rate*	
Speed variability		
SDLP*		

2.4 Results

2.4.1 Discomfort in the driving simulator according to acuity conditions

Two-way mixed ANOVAs were performed in order to compare the visual quality conditions as well as the degradation groups. As illustrated in Fig 7, no significant difference was observed for the nausea subscores between visual conditions (optimal vision: 26.50 ± 43.51 , degraded vision: 23.85 ± 27.78) or degradation groups (lower degradation: 19.08 ± 37.31 , higher degradation: 28.62 ± 35.15) (all $p > 0.05$) and no interaction was observed between the visual conditions and degraded groups (all $p > 0.05$). The analysis showed significant increases in scores under reduced vision quality for oculomotor (optimal vision: 16.00 ± 16.93 ; degraded vision: 42.95 ± 22.58 , $F(1,34) = 21.577$; $p < 0.001$; $\eta^2 = 0.376$), disorientation (optimal vision: 29.39 ± 48.22 ; degraded vision: 64.96 ± 49.17 ; $F(1,34) = 16.48$, $p = 0.0003$, $\eta^2 = 0.304$) as well as total SSQ scores (optimal vision: 26.18 ± 36.32 ; degraded vision: 48.00 ± 32.70 ; $F(1,34) = 10.674$; $p = 0.002$ $\eta^2 = 0.231$). There was no significant main effect of the degradation group and no significant interactions (all $p > 0.05$) for these three SSQ variables (oculomotor subscore, disorientation subscore and total score). These results highlight perceived discomfort by the drivers while driving with degraded visual quality.

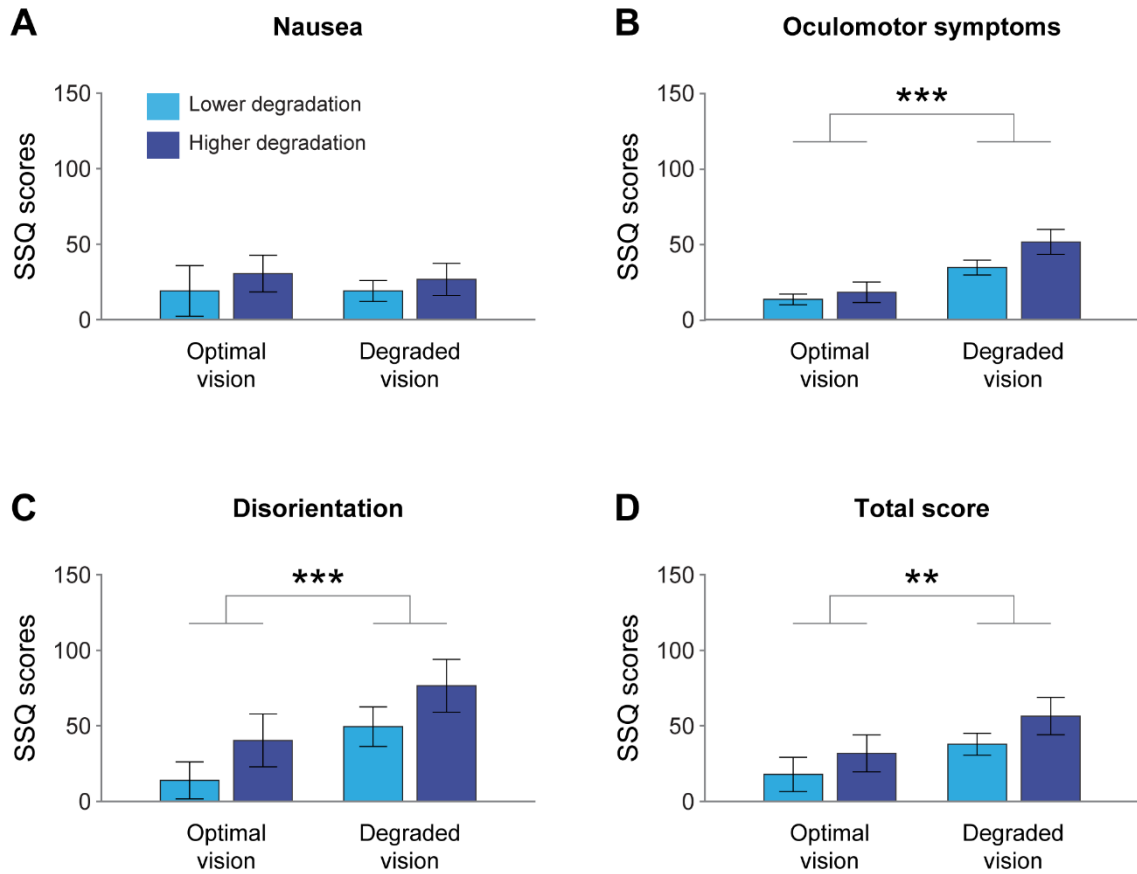


Fig 7 : Mean SSQ scores (\pm standard error) for the visual quality conditions and degradation groups (n = 19 participants).

(A) Nausea subscores (B) Oculomotor symptoms subscores (C) Disorientation subscores (D) Total scores. **p < 0.01, ***p < 0.001

2.4.2 Influence of reduced acuity according to visual and cognitive workload

Rural scenario: low visual and cognitive workload

Table 3 summarizes the mean of each driving variable in the rural scenario. In order to test the effect of visual quality condition, two-way mixed ANOVAs were performed for each of the seven driving metrics with the degradation groups as categorical factors. The ANOVAs

did not demonstrate any significant difference between visual conditions (all $p > 0.05$) nor between the degradation groups (all $p > 0.05$) for all the metrics and no significant interaction was found between visual condition and degradation group (all $p > 0.05$). These findings suggest that the driving behavior of participants was not significantly impaired by the deterioration of vision quality even at different intensities in a context associated with low visual and cognitive demands. Our results do not indicate a decreased mean driving speed or increased number of crashes (Table 4) even at the higher visual quality degradation level. In order to better understand if the decreased visual acuity may impact driving behavior, we examined it under more demanding circumstances: the highway scenario.

Table 3 : Mean (\pm standard deviation) driving behavior calculated for crash, near crash, mean speed, speed variability, SDLP, maximum brake and distance at maximum brake in optimal and degraded vision conditions for both degradation groups.

	Optimal vision		Degraded vision	
	Lower degradation	Higher degradation	Lower degradation	Higher degradation
Crash (n)	1.36 (\pm 0.92)	1.30 (\pm 0.82)	1.45 (\pm 0.82)	1.50 (\pm 0.97)
Near crash (n)	1.45 (\pm 0.69)	0.80 (\pm 0.42)	1.18 (\pm 0.60)	1.20 (\pm 0.79)
Mean speed (km/h)	68.69 (\pm 6.18)	67.68 (\pm 4.63)	69.65 (\pm 4.24)	67.13 (\pm 4.08)
Speed Variability (km/h)	16.77 (\pm 1.94)	17.63 (\pm 1.76)	16.53 (\pm 0.97)	17.50 (\pm 1.28)
SDLP (m)	0.28 (\pm 0.06)	0.24 (\pm 0.05)	0.26 (\pm 0.06)	0.23 (\pm 0.05)

Max brake (n)	0.60 (± 0.25)	0.62 (± 0.19)	0.58 (± 0.13)	0.71 (± 0.15)
Distance at max break (m)	127.75 (± 87.02)	127.14 (± 67.18)	142.75 (± 60.54)	102.24 (± 78.50)

Table 4 : Frequencies of crashes and near crashes in optimal and degraded vision conditions for both degradation groups.

	Optimal vision condition		Degraded vision condition	
	Lower Degradation	Higher Degradation	Lower degradation	Higher degradation
Crashes	15	13	16	15
Near crashes	16	8	13	12

Highway scenario: high visual and cognitive workload

The success rate on the secondary task was evaluated at 92.21% ± 9.82 for the lower degradation group and 85.71% ± 26.94 for the higher degradation group in the optimal vision condition and at 71.43% ± 24.74 for the lower degradation group and 88.57% ± 18.81 for the higher degradation group in the degraded vision condition. The variation between the visual quality conditions as well as the degradation groups was examined by a two-way mixed ANOVA (Fig 8). There was no significant main effect of the visual condition ($F(1,38) = 2.435$, $p = 0.127$), no significant main effect of the degradation group ($F(1,38) = 1.453$, $p = 0.235$) and no interaction between visual condition and degradation group ($F(1,38) = 2.654$, $p = 0.112$). The success rate for the secondary task remained generally very high unaffected by visual and cognitive demands.

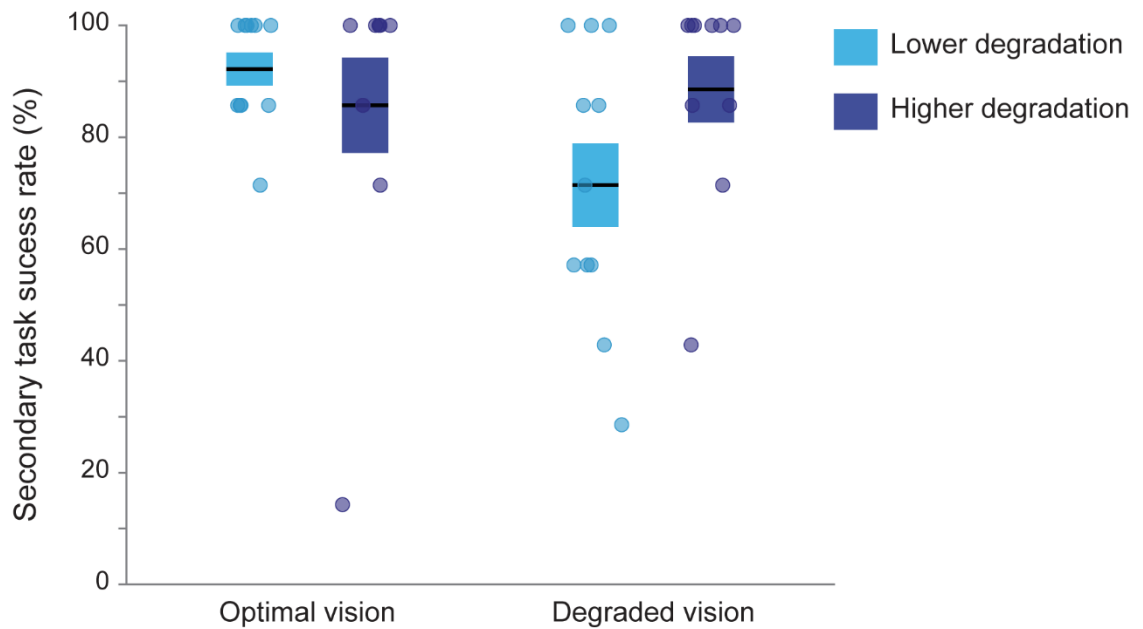


Fig 8 : Success rate on the navigation device visual search task according to visual quality condition and degradation group. Boxes represent the mean success rate \pm standard error to the mean and circles correspond to individual data.

In order to examine the effect of visual demand when controlling for the variance of cognitive load (i.e., single task vs double task) in the highway scenario, two-way ANCOVAs, comprising visual quality condition and degradation group as factors and cognitive load as a covariate, were performed on the measured driving variables. This analysis allowed us to explore if there were any difference between or among visual conditions and degradation groups while controlling for the effect of the single task on the double task. The following ANCOVAs analysis therefore report changes or stability of driving behavior in the context of double task in opposition to the single task behavior discussed in the previous section. Table 5 summarizes the means and standard deviations of the mean speed, speed variability and SDLP in each experimental condition.

Table 5 : Driving behavior variable means (\pm standard deviations) for each visual condition and degradation group according to the level of cognitive load.

	Single task				Double task			
	Optimal vision		Degraded vision		Optimal vision		Degraded vision	
	Lower degradation	Higher degradation	Lower degradation	Higher degradation	Lower degradation	Higher degradation	Lower degradation	Higher degradation
Mean speed (km/h)	88.76 \pm 4.11	88.80 \pm 3.62	91.68 \pm 4.04	88.45 \pm 2.80	89.9 \pm 4.79	87.12 \pm 4.20	90.14 \pm 4.70	88.06 \pm 6.38
Speed variability (km/h)	2.37 \pm 0.66	2.82 \pm 1.07	2.71 \pm 1.07	3.14 \pm 0.78	4.53 \pm 1.97	5.38 \pm 2.57	5.89 \pm 2.61	6.30 \pm 2.20
SDLP (m)	0.27 \pm 0.06	0.26 \pm 0.05	0.26 \pm 0.06	0.23 \pm 0.07	0.42 \pm 0.12	0.38 \pm 0.12	0.45 \pm 0.07	0.42 \pm 0.09

For mean speed, a two-way ANCOVA (Fig 9) did not show a main effect of the covariate cognitive load ($F(1,79) = 0.42, p = 0.519$) or a main effect of the visual quality conditions adjusted for the cognitive load covariate ($F(1,79) = 0.85, p = 0.360$). However, it revealed a significant main effect of the degradation groups adjusted for the covariate ($F(1,79) = 4.26, p = 0.042, \eta^2 = 0.05$; grand means lower degradation group = 90.10 km/h \pm 4.43, grand means higher degradation = 88.11 km/h \pm 4.32). No significant interaction was observed between the visual conditions and the degradation groups while adjusting for the covariate ($F(1,79) = 0.38, p = 0.538$). Thus, mean speed was only affected by a high level of visual degradation when controlling for the variance of the cognitive load.

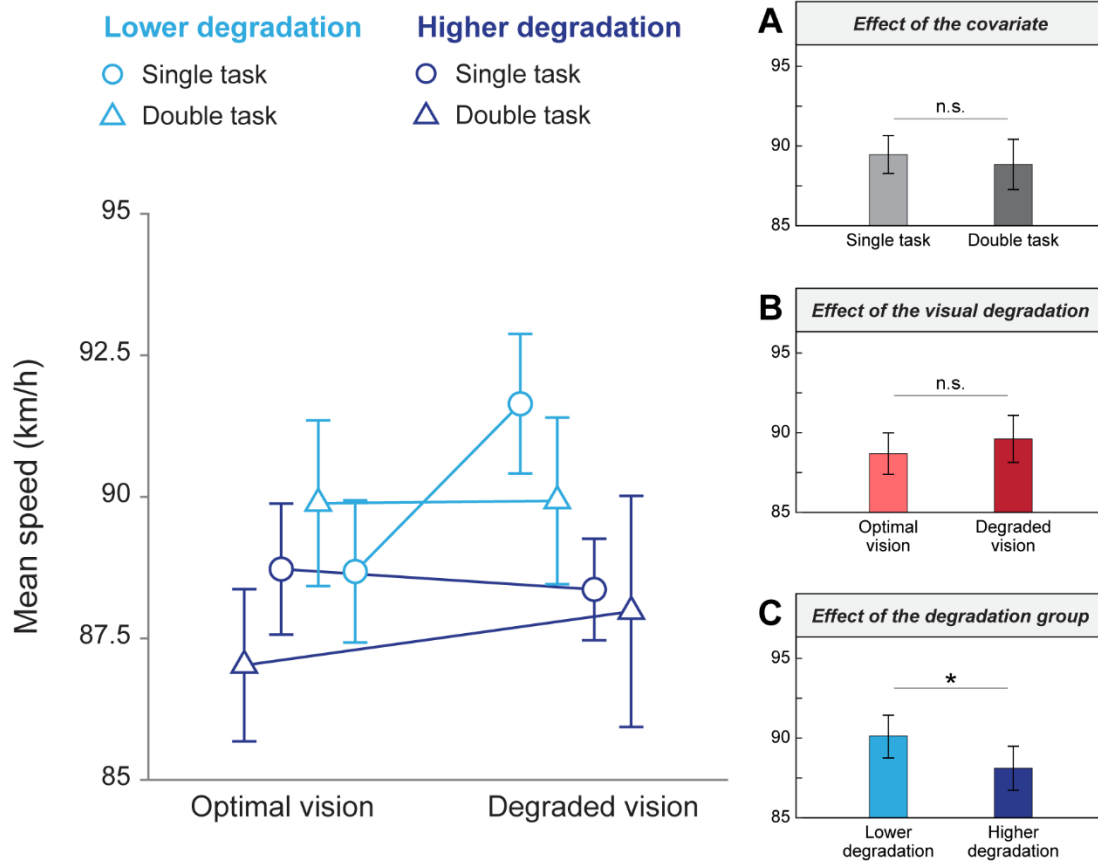


Fig 9 : Mean speed as a function of visual quality conditions and degradation groups.

Mean values from simple and double tasks are represented by blue circles and triangles, respectively. Different shades of blue represent the lower (lighter) and higher (darker) degradation groups. Error bars correspond to the standard error of the mean. (A) Means in single and double tasks. (B) Means in optimal and degraded vision, unadjusted for the covariate. (C) Means in the lower and higher degradation groups, unadjusted for the covariate.

* $p < 0.05$, n.s.: non-significant

For the speed variability, as represented in Fig 10, a two-way ANCOVA revealed a main effect of the covariate cognitive load ($F(1,79) = 74.80$, $p < 0.001$; $\eta^2 = 0.46$; grand means single task = $2.75 \text{ km/h} \pm 0.92$; grand means double task = 5.49 ± 2.35). The ANCOVA also revealed a main effect of the visual quality condition ($F(1,79) = 5.21$, $p = 0.025$, $\eta^2 = 0.03$, grand means optimal vision = $3.76 \text{ km/h} \pm 2.07$, grand means degraded vision = 4.48 ± 2.38) and the degradation groups ($F(1,79) = 4.11$, $p = 0.046$, $\eta^2 = 0.03$; grand means lower degradation group

= 3.85 km/h ± 2.19, grand means higher degradation group = 4.41 km/h ± 2.30) when adjusted for the covariate cognitive load. No interaction was observed between the visual conditions and the degradation groups when adjusting for the covariate cognitive load ($F(1,79) = 0.002$, $p = 0.962$). These findings show that speed variability is affected by the cognitive load, and, in addition to this, by statistically controlling the impact of cognitive load, the effect of visual load emerged in the dual task context.

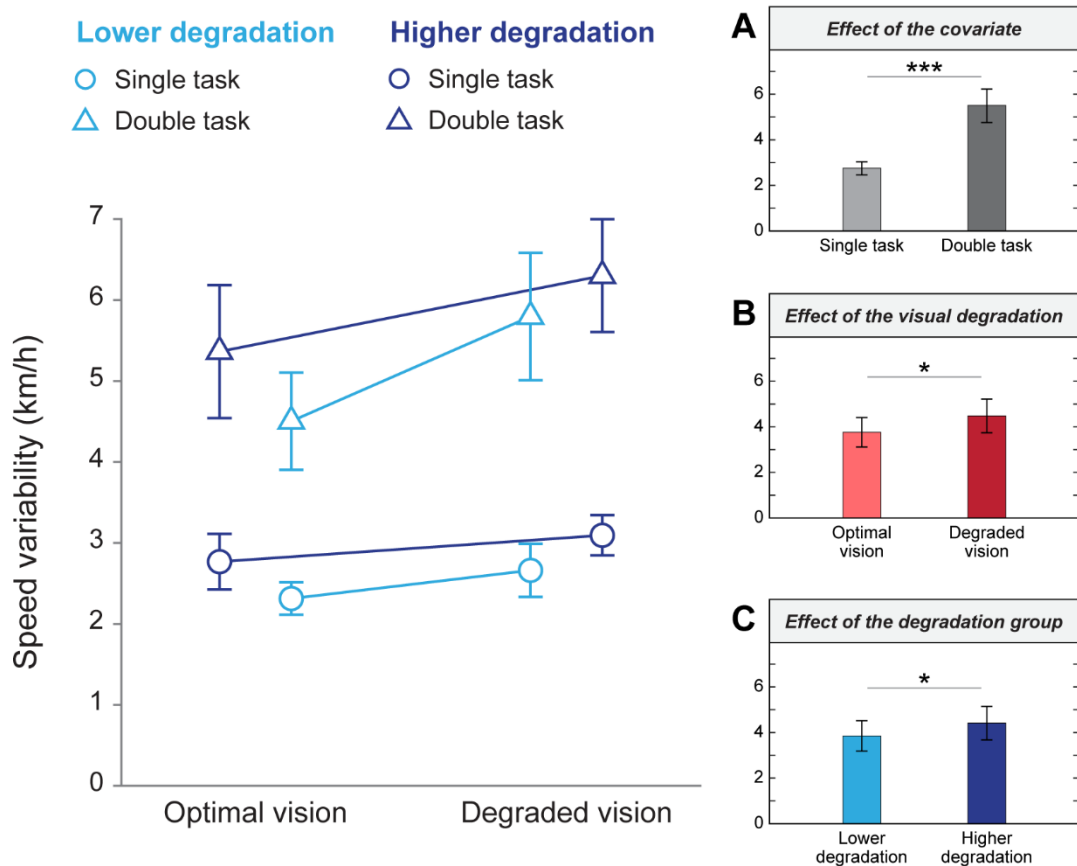


Fig 10 : Speed variability as a function of visual quality conditions and degradation groups.

Mean values from simple and double tasks are represented by blue circles and triangles, respectively. Different shades of blue represent the lower (lighter) and higher (darker) degradation groups. Error bars correspond to the standard error of the mean. (A) Means in single and double tasks. (B) Means in optimal and degraded vision, unadjusted for the covariate. (C) Means in the lower and higher degradation groups, unadjusted for the covariate.

* $p < 0.05$, *** $p < 0.001$

As depicted in Fig 11, a two-way ANCOVA revealed a main effect of the covariate cognitive load on the SDLP ($F(1,79) = 79.94, p < 0.001; \eta^2 = 0.50$; grand means single task = $0.26 \text{ m} \pm 0.06$; grand means double task = $0.42 \text{ m} \pm 0.10$) only. No main effect of the visual quality condition ($F(1,79) = 0.10, p = 0.755$) or the degradation groups ($F(1,79) = 2.01, p = 0.160$) were observed when adjusting for the covariate cognitive load. Similarly, there was no interaction between the visual conditions and the degradation groups when adjusting for the covariate cognitive load ($F(1,79) = 0.25, p = 0.621$). These results indicate that SDLP is increased when the cognitive load is more important, but is not affected by the visual degradation induced.

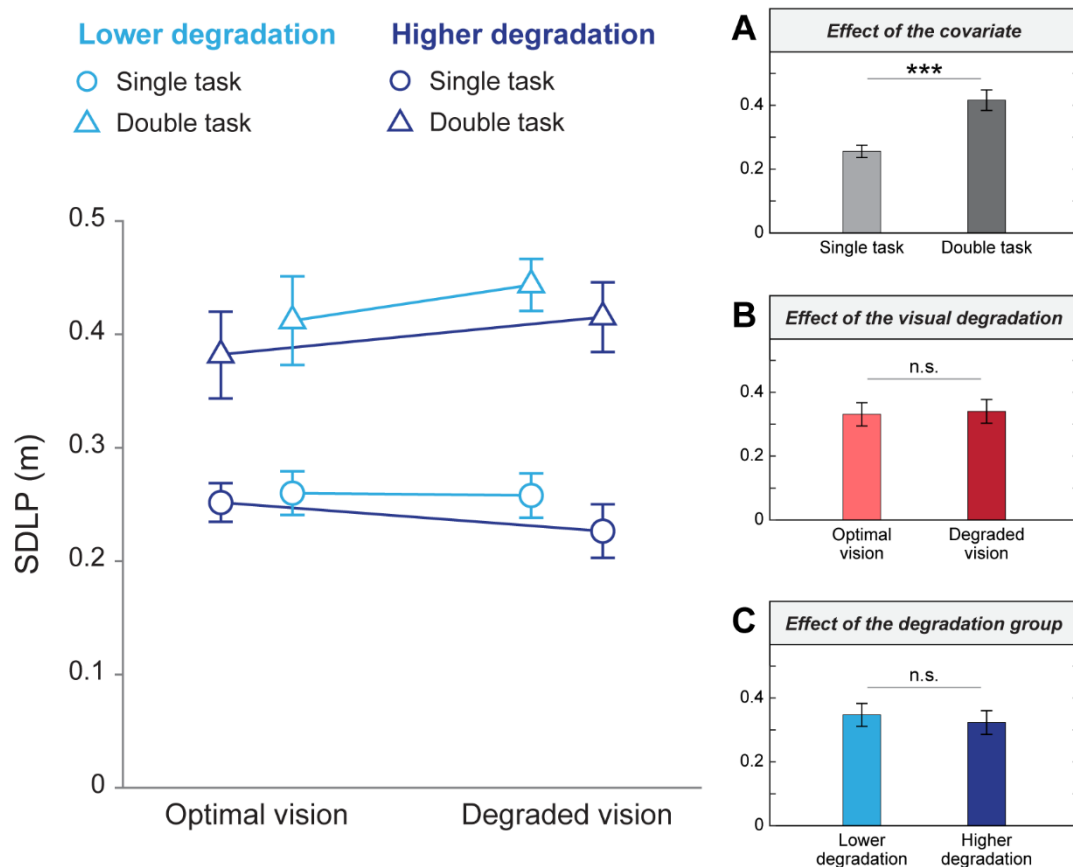


Fig 11 : SDLP as a function of visual quality conditions and degradation groups.

Mean values from simple and double tasks are represented by blue circles and triangles, respectively. Different shades of blue represent the lower (lighter) and higher (darker) degradation groups. Error bars correspond to the standard error of the mean. (A) Means in single and double tasks. (B) Means in optimal and degraded vision, unadjusted for the covariate. (C) Means in the lower and higher degradation groups, unadjusted for the covariate.

*** $p < 0.001$, n.s.: non-significant

2.5 Discussion

The aim of this study was to determine whether a visual quality degradation inducing a myopic defocus and other visual issues had a greater impact on driving behavior and drivers' comfort when participants were engaged in multiple tasks involving high interaction between visual and cognitive mechanisms. Twenty-one participants performed a simple driving simulator task (rural scenario) and a driving task paired with a visual search task (highway scenario). Their driving behavior was examined in optimal vision and with degraded visual quality. Participants were divided into two groups with distinct thresholds of reduced visual acuity: the lower degradation, which corresponded to the minimum visual acuity required to drive in Québec, Canada and the higher degradation, which resulted in blurred vision at the distance of the front screen of the driving simulator. In the rural scenario —associated with lower visual and cognitive demands—, our results revealed that the reduction in visual acuity did not impair young participants' driving behavior nor their ability to drive safely. On the other hand, the highway scenario —associated with greater workload and visual demands— appeared to have elicited an effect of visual degradation on driving behavior. To summarize, our study emphasizes three main results: i) the perceptual and motor incoherence induced by the experimental disturbance of vision as an enhancer of evaluated motion sickness symptoms suggesting greater discomfort, ii) an impact of reduced visual quality in the presence of a double task and iii) an effect of visual acuity higher degradation.

2.5.1 Perceptual incoherence provided by the experimental visual inputs disturbance as an enhancer to evaluate motion sickness symptoms suggesting greater discomfort

The degradation of visual quality by means of contact lenses with positive addition had a negative impact on participants' comfort while being in the driving simulator, as shown by greater disorientation, oculomotor symptoms, and total SSQ scores. Considering that some variability of this effect could be related to the physical disturbance provoked by the contact lenses, we hypothesize that most of the effect is driven by the occurrence of the changes of accommodation convergence and non-corresponding retained images. The weight of the impact of both optical, induced by the myopic defocus, and physical disturbance on simulator sickness is however still to be elucidated. The idea of changes of accommodation convergence and non-corresponding retained images as driving the impact of myopic defocus rather than physical discomfort is reinforced by the deterioration in driving behavior, only observed in one of the two driving scenarios. Indeed, the analysis of the driving metrics revealed a deterioration in driving behavior as a function of the workload and the level of visual degradation measured in the highway scenario. We then may assume that the increase in motion sickness is driven by this scenario, which involves higher visual, i.e. accommodation-convergence, changes in distances, increased demand in high frequency resolution for the visual search task on the navigation device, motor, i.e. eye, head and neck motor coordination and transitions between the road and the navigation device, and cognitive demands i.e. visual search task compared to the rural scenario. It has been previously suggested that increased cognitive load was not associated with simulator sickness (87). However, the cognitive demands in the highway scenario are explained by the addition of a concurrent visual search task, involving a specific type of workload ultimately resulting in increased ocular motricity and

visual demands. In fact, participants had to switch their visual and attentional focus between the road in far distance and the navigation device in intermediate distance. It has been shown that depth perception relies on multiple visual cues but also oculomotor information emerging from the accommodation responses to focus from one distance to another (88). In our study, the myopic defocus induced in our participants gave rise to a sensorimotor conflict between the retinal image, the accommodation and vergence response and the extra-retinal perception based on oculomotor commands and the proprioception of accommodation. It is also well known that the alteration of the accommodation and convergence mechanisms has negative consequences on task performance as well as the visual fatigue experienced (89). Our results suggest that sensorimotor conflict, as a consequence of visual perturbation, results in oculomotor discomfort and disorientation in the driving simulator.

Moreover, the magnification induced by contact lenses creates a perceived motion of the visual scene that is different from the motion encoded by the semicircular canals in the vestibular system. There is extensive literature showing that motion sickness experienced in driving simulators is due to the discrepancy between the visual perception of movement and the absence of real movement (90, 91). According to the sensory rearrangement theory, motion sickness is caused by conflicting motion signals processed through the vestibular, visual and somatosensory systems as well as the mismatch between the expected and actual stimuli (92). It has been shown that, just like the vestibular system, the cerebellar mechanisms are involved in both sensory conflict by the motor control of the head and body motion and the associated corollary discharge signals and reafferent signals (93). This shows that almost any variation in expected responses between sensory or proprioceptive mechanism can induce motion sickness, (cf. review from (90)), here visually induced by the contact lenses and the multiple visually and cognitively demanding tasks of driving. Finally, our findings are consistent with previous research investigating the effect of visual blur and motion sickness in optokinetic drum (94) or visual fatigue using virtual head-mounted displays (95, 96). Discomfort was also perceived in visually induced motion sickness while adapting to spectacles (97) and visual aids (98).

2.5.2 Impact of degraded visual quality in the presence of a double task

The rural scenario did not reveal any effect of the visual degradation nor the degradation group. This lack of significance may indicate that the task workload, the visual image processing or the interaction between visual and cognitive mechanisms was not challenging enough to impact the driving behavior of our participants. In addition, the absence of an increase in crashes and near crashes between the visual acuity conditions and the degradation groups emphasizes the well-known difficulty to assess accidentology causal relationships with visual acuity. Moreover, the main task of the rural scenario, the avoidance of unexpected events relies more on motion perception, rather than high spatial-frequency perception. In contrast, the double-task paradigm in the highway scenario, without consideration of the visual condition, appears to be more effective at eliciting modifications of the driving behavior that could potentially compromise road safety. In the highway scenario, our results revealed some modulations of vehicle position in the mediolateral axis, captured by the SDLP, as well as in the anteroposterior axis, as expressed by the speed variability. Both SDLP and speed variability were increased during the double task in comparison to the single task. This finding is consistent with previous studies that reported greater variability in vehicle lateral position in tasks with high cognitive load using different metrics, namely lane position ([83](#)), lane keeping ([80](#), [99](#), [100](#)) and steering ([101](#), [102](#)). As reported in previous literature, speed reduction is a common strategy adopted by drivers to compensate for increased mental workload when performing concurrent tasks such as reading texts messages while driving ([78](#)) or to compensate for decreased visual-cognitive abilities related to aging ([5](#), [103](#)). However, this reduction in mean driving speed has been shown in studies including a double task on the real road, which is associated with actual crash risk ([104](#)). Driving in a simulator is not associated with real-life consequences related to crash damage, which probably uninhibits young drivers in their driving behavior compared to their usual driving in

real road conditions. In addition, speed reduction, as a driving strategy, was also observed during a single driving simulator task with older adults dealing with altered cognitive capacities (5). This suggests that the impact of the double task on speed behavior, expressed by an increase in speed variability, could reflect a behavioral difference between younger and older drivers. Indeed, our participants were young healthy university students with functional cognitive capacities, but we might expect greater changes in driving behavior in older participants doing the highway task. Interestingly, most studies about driving have used the reallocation of attention and visual focus in depth and eccentricity to create a dual-task paradigm implying high-level visual processing. This has notably been put forward in the ISO standards as a basis for examining the driver's visual behavior with respect to the in-vehicle devices and the induced workload (30, 31, 105). This methodology, along with low-level visual sensory integration mechanisms, as demonstrated by our results, seems promising in the analysis of driving behavior. This will be discussed in the next paragraphs addressing the impact of visual quality reduction in dual task context.

An additional metric that we used in the present study to measure the impact of visual acuity reduction on driving in the highway scenario was the success rate at the visual search task. Since no significant decrease in driving speed was observed in the presence of a double task and degraded vision, we could have expected lower success rates in the degraded vision condition, especially in the higher degradation group. However, although all participants subjectively reported a discomfort associated with blurred vision at the distance of the navigation device, no significant decrease in the task success rate was observed when vision was degraded. Furthermore, success rates did not significantly differ between the lower and higher degradation groups. It could be that the success rate is not a metric sensitive enough to indicate reduced efficiency or low-level integration cost resulting from the interference between the visual and cognitive mechanisms in young drivers. Similarly, a recent study investigated the effect of a simulated reduction in acuity on a pedestrian detection task and revealed no reduction in the success rate but the authors found that response times were lengthened by approximately 600 ms (106). Moreover, it has been shown that when

participants were asked to prioritize driving, they exhibited longer dialing times as well as better stabilization of the car lateral position on the road (107). Therefore, it seems that the combined analysis of response time and success rate would provide a more accurate description of task performance. It is important to note that, in our experimental design, each road sign used in the visual search task was presented for 6 seconds on the navigation device and no time limit was imposed for participants to answer. Hence, it is possible that participants had enough time to correct their answers, which would explain the overall good success rates observed irrespective of the conditions. Moreover, it is very likely that they did several visual back-and-forth between the navigation device and the road during the task, as fixations have been shown to last around 120 ms (108, 109) but can be as short as 26 ms (110). As a consequence, it might have helped participants to maintain a stable SDLP and give correct answers, despite the reduction in visual quality. Given the spatial frequency of the target city name, it is very unlikely that the reduction in visual acuity has disturbed the integration of the image at an intermediate distance, especially when considering the accommodative capacity of our young population. However, despite the fact that we did not observe any impact on the success rate, the driving measures suggest a loss of efficiency due to the visual degradation.

Indeed, our results indicate that the highway scenario and the concurrent visual search task led to modifications of the driving behavior when the quality of vision was degraded. As previously mentioned, the reduction in visual acuity resulted in visual blur, but also altered the accommodation and convergence relationship, which is known to be associated with refractive error (111-113). It remains unknown whether visual demands in intermediate and far distances are key elements to induce such an effect; however, the solicitation of visual quality alteration and increased workload seems to provide a relevant methodology to assess loss of efficiency while driving. In fact, several authors studying various contexts such as a Stroop task (114) and a bingo task (115) suggested that visual alteration could alter the performance in paradigms involving a high cognitive demand. The information degradation hypothesis suggests that certain higher order mistakes can occur following errors in perceptual processing, which can be explained by degraded perceptual inputs (116). In contrast to what

has been reported in previous studies ([56](#), [57](#)), we did not show any significant effect of the visual perturbation on the SDLP in the context of high cognitive load. Nevertheless, this result is in line with other findings showing refractive blur did not significantly affect road position ([55](#)) and steering wheel position ([53](#), [56](#), [57](#)). Our results showed that the driving speed variability was increased not only in the dual task when compared to the simple task but also in the degraded visual quality condition compared to optimal visual quality condition. We were thus able to demonstrate the impact of an alteration in low-level visual mechanisms on driving behavior in a context of dual task in which the impact of cognitive load was controlled, therefore permitting the emergence of the impact of visual load on driving behavior. We hypothesize that, because of the increase in visual demands associated with altered visual quality, participants had to deal with higher cognitive demands when performing the visual search task. A recent study has shown that while walking, the use of smartphones leads to difficulties in disengaging and reallocating the attentional focus towards the road ([45](#)). Altogether, our results suggest that visual disturbances seem to challenge attentional capacities and affect the ability to maneuver a vehicle in the context of multitasking.

2.5.3 Impact of the simulated visual acuity higher degradation

To our knowledge, few studies have examined the impact of different levels of visual impairment under high cognitive demands. The impact of visual degradation thresholds has been found on certain tasks related to mobility such as 6/60 or specifying an important visual demand such as reading, i.e. 6/9, face recognition like 6/12. However no single threshold can apply to all types of task to predict performance ([117](#)). Visual acuity below a threshold of 6/9 has been proposed as problematic in terms of driving performance ([118](#)). To add to these observations, in the present study, we found that speed variability was impacted by our manipulation according to the level of visual quality degradation as a targeted by a lower and a higher myopic defocus. This effect was found, however, both during the single and dual task of the highway scenario. The higher visual quality degradation group demonstrated a higher

speed variability and a decreased mean speed compared to the lower visual quality degradation group. According to previous research, drivers are able to maintain a stable mean speed despite very important visual degradation targeting luminance perception in the nighttime but this study did not compare different cognitive load contexts ([119](#)). The results from our study suggest that a strong decrease in visual acuity might increase the attentional resources required for performing multiple tasks while driving. Our results emphasize that the impact of visual load on driving behavior gave rise to dual task interference and that, from a speculative point of view, could eventually induce task prioritization (see Pashler, 1994) — probably in order to efficiently dealing with a limited cognitive capacity ([75](#), [120](#), [121](#)). The impact of the lowest visual acuity on speed variability suggests that additional resources are needed for visual integration, but also that resources are allocated to the main task (in this case driving) for security reasons. The cost of visual disruption while driving is an important one to take into consideration for road safety. Individuals driving with non-adapted refractive error corrections exhibit more unsafe driving behavior. For example, adaptation to new lenses to correct refractive errors from astigmatism ([122](#)) or myopia have been associated with more unsafe driving behavior and less comfort ([97](#)). However, even though they recognize the importance of clear vision on the road, many drivers report not wearing their optimal correction while driving ([29](#)). Our study emphasizes the importance of education on the potential driving risks associated with poor vision when dealing with the multiple tasks involving high visual and cognitive demands in current vehicles.

2.6 Conclusion

To our knowledge, this paper is one of the few to demonstrate the emergence of the effect of visual load on driving behavior when statistically controlling the impact of cognitive load, in this dual task context. While it is well known that the proliferation of peripherals in the

modern vehicle cabs is a challenge in terms of distraction and attention sharing, our results emphasize that poor visual quality is an additional issue on top of reallocating attention between several devices and the main driving task. Currently, legal visual acuity standards to obtain or renew one's license only considers far distance vision. The engagement of closer visual demands like visual acuity and accommodation-convergence capacities by new in-vehicle technologies and their consequences on driving behavior should be examined in order to improve licensing policies or the human factors that are considered for future car design. In our study, the involvement of cognitive demands was a trigger revealing the impact of finer visual degradation on driving. Stability in driving behavior was impaired in the by visual load when controlling for the variance of cognitive load. The emergence of the impact of visual load was also observed under condition of degradation of visual quality as well as under greater degradation. The attentional and visual demands of the double task and increased visual demands from our visual degradation manipulation were key elements of our methodology. Future studies should examine the impact of natural visual acuity loss, such as poorly or uncorrected refractive error in ametropic or presbyopic population. Our work brings new knowledge to the current optical, ophthalmic and medical literature while highlighting the importance to further study on the visual corrections of road users in order to improve their safety.

2.7 Acknowledgments

The help and assistance provided by Vadim Sutuyushev had been greatly appreciated.

3. Résultats supplémentaires

Le présent chapitre comprend des résultats supplémentaires faisant l'objet d'analyses descriptives. Les thèmes abordés sont 1. l'introduction de nouveaux jeux de données (n=36 et n=41) accompagnés d'une adaptation du Driving Safety Index (DSI), 2. l'analyse descriptive de l'impact des amétropies et 3. des capacités perceptivo-cognitives évaluées par 3D-MOT sur les comportements de conduite en contexte rural et d'autoroute.

3.1 Introduction nouveau jeu de données ainsi que d'une adaptation du DSI

Dans le cadre de travaux précédents faisant l'objet du mémoire d'Océane Keruzore (2018) ([123](#)) un échantillon de conducteurs d'âge et d'expérience de conduite similaire au nôtre, mais utilisant des seuils plus petits de dégradation de l'acuité visuelle et donc des groupes de qualité de visions moins altérés, avait été recruté. Dans la poursuite de l'observation du comportement de conduite en contexte de dégradation de la qualité de vision, nous avons exploré, à plus grande échelle, par la combinaison des deux échantillons, la modulation de la performance de conduite en fonction des amétropies naturelles des participants (n=36), ainsi qu'en fonction des capacités visuo cognitives évaluées au 3D-MOT (n=41). Il est à noter que l'échantillon examiné lors des comparaisons des amétropies comprend 36 participants au lieu de 41 pour des raisons de disponibilité des données. Afin d'évaluer les comportements de conduite en lien avec les capacités visuelles et perceptivo-cognitives, un outil prometteur a précédemment été développé par l'équipe du laboratoire Faubert: le "Driving Safety Index" (DSI) ([28](#)). Permettant la visualisation d'une comparaison binaire entre deux groupes ou deux conditions, le DSI comprend 3 catégories de métriques : la qualité de la vision (Ivis), les variables de performance de conduite (Idri), ainsi que les capacités perceptivo-cognitives (Iviscog). Les métriques comprises dans Ivis et IvisCog comprennent des mesures effectuées en prétest. Ainsi, les différences présentes au sein des scores de stéréoscopie ou encore d'acuité visuelle font état des capacités intrinsèques aux participants. La justification des métriques de l'outil s'explique en deux temps ; la métrique Ivis est justifiée par les critères visuels légaux pour la conduite automobile alors que Idri et Iviscog sont justifiés par la démonstration d'un lien prédictif entre les capacités perceptivo-cognitives et la performance de conduite dans un échantillon robuste de 115 personnes d'une publication précédente de notre laboratoire ([5](#)). À partir de leur échantillon de 115 conducteurs ([5](#)), une méthodologie d'analyse avait alors été créée pour ensuite pouvoir observer des liens prédictifs ensuite été explorés de façon holistique à l'aide du DSI dans une publication de Chaumillon et al. (2018) en fonction des capacités visuelles (Ivis plus faible versus Ivis plus

élevé) (28), visuo cognitives (Iviscog plus faible versus Iviscog plus fort), ou encore le DSI total (DSI plus faible versus DSI plus fort) et des capacités visuo cognitives selon l'âge (50% plus jeunes, 50% plus âgés).

Perfectionné pour l'évaluation des comportements de conduite en simulateur en scénario rural, le DSI semble également être un outil en tout point pertinent dans d'autres contextes de conduite en simulateur. Une adaptation de cet outil pour le scénario autoroute a été réalisée dans le cadre de ce mémoire. Les modifications proposées incluent, entre autres, l'ajout d'une variable indispensable soit le taux de succès à la tâche secondaire. Une réduction parcimonieuse du nombre de métriques constituant l'dri nous a également paru appropriée vu le contexte de conduite différent ainsi que la nécessité de travailler avec un score pondéré de métriques pertinentes. Ainsi, alors que le scénario rural permet l'exploration des réactions à la survenue d'événements inopinés et demandant ainsi des arrêts fréquents pouvant occasionner des collisions, le scénario autoroute est tout autre. Les six variables (voir *Tableau 6*) comprises dans cette adaptation du DSI (*Figure 12 B*) sont donc la vitesse moyenne et sa variabilité, la SDLP ainsi que les dégradations dans le comportement de conduite pour chacune de ces trois variables observées entre la période de référence et la période des événements de la tâche secondaire ainsi qu'à travers une dégradation des performances en vision optimale et réduite, le tout afin d'obtenir une comparaison prenant en compte à la fois les demandes cognitives et de dégradation visuelle. Chaque variable est normalisée de 0 à 100% pour mesurer leur contribution au DSI par un calcul d'air sous chaque composante de la représentation graphique radar. Ainsi, un DSI plus grand indique une conduite plus sécuritaire qu'un DSI plus petit. Les observations qui sont décrites ici sont uniquement des pistes d'exploration qui doivent faire l'objet de davantage de recherche. Nous examinerions notamment l'impact d'une dégradation de l'acuité visuelle et les capacités perceptivo-cognitives sur les comportements de conduite en fonction des amétropies. Ce nouvel échantillon de données inclut donc treize participants myopes, quatorze emmétropes et neuf hypermétropes.

Tableau 6 : Variables présentes dans chaque catégorie du DSI pour le scénario rural ainsi que le scénario autoroute.

n correspond à une unité indéfinie, m à mètres, s à secondes, km à kilomètres, h à heures, log à logarithme, logMAR au log de l'angle minimal de résolution et " à seconde d'arc.

Index DSI		Scénario rural	Scénario autoroute
	D1	Accident (n)	SDLP (m)
	D2	Risque d'accident (n)	Dégradation SDLP (m)

Idri	D3	SDLP (m)	Variabilité de la vitesse (km/h)
	D4	Freinage maximal(n)	Dégradation variabilité de la vitesse (km/h)
	D5	Distance au freinage maximal (m)	Vitesse moyenne (km/h)
	D6	Plage de rotation maximale du volant (degrés/s)	Dégradation vitesse moyenne (km/h)
	D7	Distance à la plage de rotation maximale du volant (m)	-
	D8	Plage de rotation du volant (degrés/s)	-
	D9	Vitesse moyenne (km/h)	-
-	SR	-	Taux de succès à la tâche GPS (%)
IvisCog	VC1	Scores 3D-MOT (log)	Scores 3D-MOT
Ivis	V1	Acuité visuelle ETDRS (logMAR)	Acuité visuelle ETDRS (logMAR)
	V2	Champ visuel Humphrey (n)	Champ visuel Humphrey (n)
	V3	Acuité stéréoscopique Randot (")	Acuité stéréoscopique Randot (")

3.2 Analyse descriptive de l'impact des amétropies sur les comportements de conduite

Nous avons exploré la possibilité que la manipulation de l'acuité visuelle créée par une lentille de puissance positive puisse modifier différemment les comportements de conduite en fonction des amétropies.

Les DSI ci-dessous représentent l'indice de comportement de conduite sécuritaire en scénario rural (*Figure 12 A*) ainsi qu'en scénario autoroute (*Figure 12 B*) en fonction de l'amétropie naturelle des participants soit qu'ils soient myopes (en bleu) ou emmétropes (en rose). L'analyse descriptive suivante ne faisant pas état de la visualisation d'analyse statistique, mais servent uniquement le but de permettre la visualisation de la distribution des données des participants selon leurs amétropies. Ainsi, en prêtant attention au DSI en scénario rural, il semble que les emmétropes puissent avoir un léger avantage par rapport aux myopes en ce qui a trait à leur performance de conduite en lien avec les accidents (D1) ainsi

que de façon minimale, par rapport aux risques d'accident (D2) ainsi que la plage de rotation du volant (D8) alors que les myopes semblent avoir été légèrement meilleurs en ce qui concerne le freinage maximal (D4) la distance au freinage maximal (D5) ainsi que la plage de rotation du volant (D7). Au scénario autoroute, les emmétropes ont eu de subtiles meilleures performances en ce qui a trait à la SDLP (D1), la variabilité de la vitesse (D3) tout en semblant avoir eu des performances de conduite plus affectées par la présence de la tâche secondaire concernant la SDLP (D2) ainsi que la variabilité de leur vitesse (D4). Ces indicateurs, n'ont pas fait l'objet d'analyse statistique, et représentent des différences qui ne permettent pas de suggérer d'interprétation, mais permettent une visualisation intéressante de la modulation du comportement holistique de conduite en fonction capacités perceptivo-cognitives évaluées par le 3D-MOT.

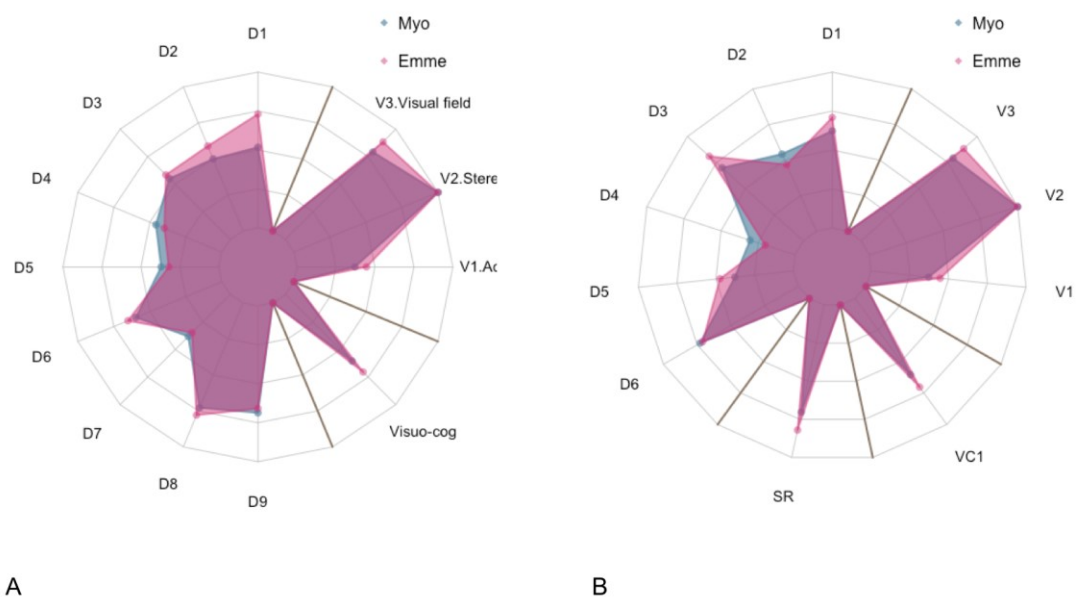


Figure 12 : Représentation graphique radar et l'indice global de sécurité des conducteurs (DSI) des participants naturellement myopes (bleu) en comparaison aux participants naturellement emmétropes (rose) au scénario rural (A) ainsi qu'au scénario autoroute (B).

D1: Accident, D2: Risque d'accident, D3: SDLP, D4: Freinage maximal, D5: Distance au freinage maximal, D6: la plage de rotation maximale du volant, D7: Distance à la plage de rotation maximale du volant, D8: la plage de rotation du volant, D9: Vitesse moyenne, V1: Acuité visuelle, V2: Champ visuel, V3: Stéréoscopie, VC1: Scores 3D-MOT, SR: Taux de succès à la tâche secondaire.

Les cartes de chaleurs ci-dessous (Figure 13) illustrent les comportements des participants en condition de dégradation de la qualité visuelle selon leur amétropie soit en fonction qu'ils soient emmétropes, myopes ou encore hypermétropes. Au scénario rural (Figure 13 A), les hypermétropes, suivis des myopes semblent être meilleurs par rapport aux gestions des distances, en ce qui a trait à la distance du freinage maximal ainsi que de la plage de rotation maximale du volant. Ils semblent adopter des réactions sécuritaires plus

rapidement que les emmétropes en condition de réduction de la qualité visuelle. Les myopes semblent être moins bon que les emmétropes et les hypermétropes en ce qui a trait aux accidents, aux risques d'accident, la plage de rotation maximale du volant, ainsi qu'au 3D-MOT. Ces derniers semblent adopter un freinage maximal moins important ce qui est probablement associé à leur propension potentiellement plus grande à avoir des accidents. Le scénario autoroute (*Figure 13 B*) semble lui aussi proposer que les myopes aient des comportements moins sécuritaires notamment quant à leur SDLP et la vitesse moyenne et sa variabilité, malgré une dégradation de la variabilité de la vitesse entre la période de référence et les événements de la tâche secondaire moins importante que les autres groupes d'amétropie, et qu'ils soient moins bons au 3D-MOT par rapport aux emmétropes et aux hypermétropes. Les emmétropes quant à eux semblent adopter des comportements potentiellement moins sécuritaires concernant la dégradation de la SDLP tandis que les hypermétropes semblent avoir une dégradation de la vitesse moins importante. L'étude du comportement routier selon les amétropies semble un sujet de recherche intéressant dans l'éventualité d'une méthodologie semblable ainsi que d'un échantillon plus grand. Il est toutefois à garder en tête que ces observations ne découlent pas d'analyses statistiques et donc ne sont pas sujette à des interprétations.

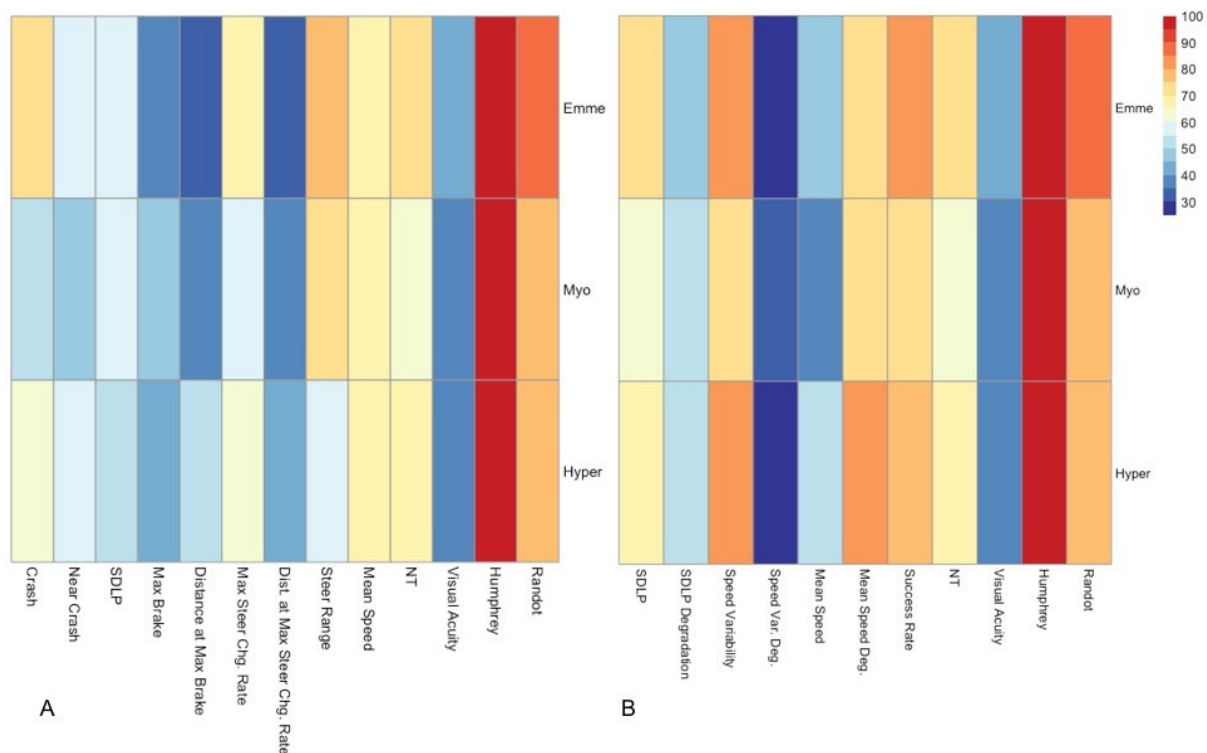


Figure 13 : Carte de chaleur des participants selon leur amétropie naturelle au scénario rural (A) ainsi qu'au scénario autoroute (B).

3.3 Capacités perceptivo-cognitives

En observant la répartition de l'aire du DSI selon les capacités perceptivo-cognitives (*Figure 14*) évaluées par le 3D-MOT, peu de différences sont observées. À travers le scénario rural (*Figure 14 A*), bien qu'ayant des DSI similaires, les participants ayant les scores 3D-MOT les plus forts semblent avoir eu davantage d'accidents (D1) ou de risques d'accident (D2) ainsi qu'une distance de freinage maximale (D5) et de la plage de rotation maximale du volant plus courte (D7). À travers la répartition de l'aire du DSI selon les capacités perceptivo-cognitives évaluées par le 3D-MOT, au scénario autoroute (*Figure 14 B*), de façon générale, l'aire du DSI des participants ayant les scores 3D-MOT les plus faibles est très similaire à celui des participants ayant les scores 3D-MOT les plus forts. Les participants ayant les scores 3D-MOT les plus forts semblent démontrer une propension plus importante à l'instabilité de la SDLP (D3). Toutefois, ce que le DSI suggère ici semble être que, pour notre échantillon, les scores au 3D-MOT ne sont pas nécessairement associés à de meilleures ou pires performances de conduite en simulateur. Les différences présentées ici ne semblent pas suffisamment importantes pour atteindre une significativité statistique avec la taille de notre échantillon.

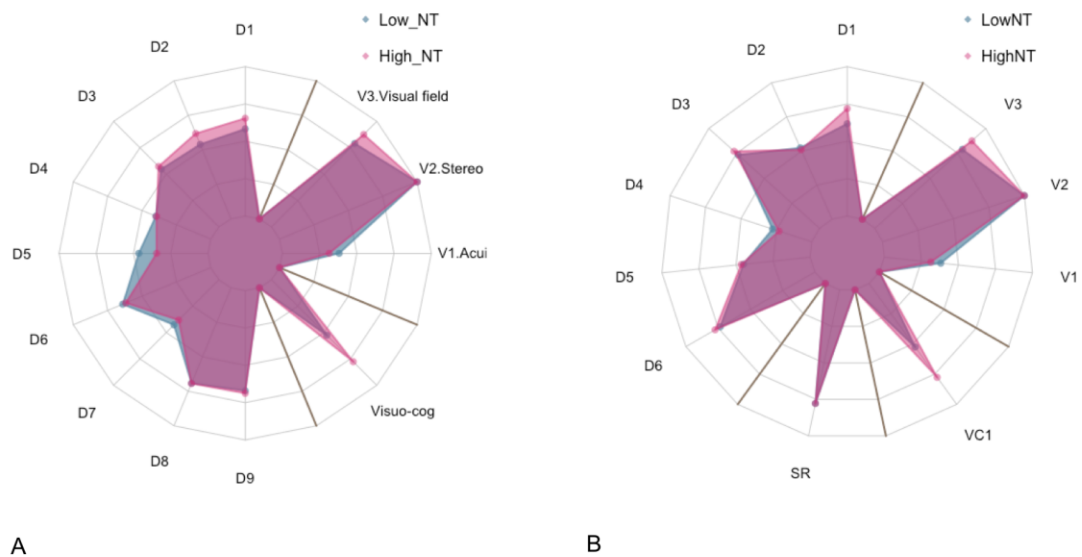


Figure 14 : Représentation graphique radar et l'indice global de sécurité des conducteurs (DSI) des participants ayant eu les scores les plus faibles au 3D-MOT (bleu) ainsi que les scores les plus forts (rose) au scénario rural (A) ainsi qu'au scénario autoroute (B).

D1: Accident, D2: Risque d'accident, D3: SDLP, D4: Freinage maximal, D5: Distance au freinage maximal, D6: la plage de rotation maximale du volant, D7: Distance à la plage de rotation maximale du volant, D8: la plage de rotation du volant, D9: Vitesse moyenne, V1: Acuité visuelle, V2: Champ visuel, V3: Stéréoscopie, VC1: Scores 3D-MOT, SR: Taux de succès à la tâche secondaire.

4. Discussion générale

Notre étude visait à examiner l'effet de la baisse du seuil d'acuité visuelle sur les comportements de conduite sécuritaire. Pour cela, nous avons utilisé des lentilles d'addition induisant un niveau de réduction de l'acuité visuelle à deux niveaux, soit un plus faible ainsi qu'un plus élevé. Les résultats ont permis de mettre de l'avant l'émergence de l'impact de la charge visuelle sur les comportements de conduite, et ce, en contrôlant statistiquement l'impact de la charge cognitive dans un contexte de double tâche. Dans ce chapitre de discussion, les thèmes qui seront abordés comprennent 1. les enjeux liés à la considération unique de la vision de loin pour la conduite automobile ainsi que 2. les alternatives de dégradation de la qualité de vision ainsi que les limites associées.

4.1 Enjeux liés à la considération unique de la vision de loin pour la conduite automobile

Nos résultats vont dans le sens d'une compréhension récente de la performance de conduite comme influencée par l'impact de la charge visuelle sur les comportements de conduite, et ce, en contrôlant statistiquement l'impact de la charge cognitive dans un contexte de double tâche. Cette étude suggère l'importance d'une correction visuelle à toutes les distances, en mettant ainsi de l'avant l'importance de la vision intermédiaire. La pertinence de l'évaluation de la vision à différentes distances s'explique notamment par la demande de réallocation attentionnelle et visuelle entre l'environnement visuel de loin et celui intermédiaire à l'intérieur du véhicule, dans ce cas-ci à une distance approximative de 65 cm, engendré par les dispositifs de navigations omniprésents dans les voitures modernes. Dans le cadre de notre expérimentation, nous avons pu observer des changements dans le comportement de conduite en présence d'une tâche secondaire de navigation dans le scénario autoroute représentant une forte charge cognitive. Ceci s'illustre par l'instabilité du comportement de conduite, c'est-à-dire l'augmentation de la variabilité de la vitesse en condition de qualité visuelle dégradée en contexte de haute charge cognitive ainsi que l'augmentation plus importante de la variabilité de la vitesse accompagnée d'une réduction plus importante de la vitesse moyenne en fonction des groupes de réduction d'acuité également en contexte de fortes charges cognitives semblent également suggérer des enjeux potentiels en termes de sécurité routière.

Comme mentionné précédemment, le choix d'un échantillon de conducteurs jeunes a entraîné une perturbation des mécanismes d'accommodation et de la convergence spontanée en lien avec les demandes de réallocation visuelles entre la route ainsi que l'outil de navigation dans le scénario autoroute. Nous pourrions ainsi faire l'hypothèse qu'une partie de nos résultats soit expliquée par la difficulté de mettre en place les mécanismes visuels en distance intermédiaire. Les presbytes, des adultes de plus de 40 ans dont le déficit de vision est lié à l'âge et induit une perte de capacité de changement de forme du cristallin et donc d'accommodation, représentent ainsi une population intéressante à étudier dans ce contexte (124). Un projet effectué au sein de notre laboratoire s'était précédemment penché sur l'étude des performances de conduite dans une étude ayant la même méthodologie que celle-ci soit comportant une tâche de conduite en simulateur accompagnée d'une tâche secondaire à l'aide d'un outil de navigation, chez la population presbyte. Quatorze participants étaient équipés soit d'un verre ayant une progression d'addition de la distance de vision de loin à la distance de vision de près, soit d'un verre ayant une progression de vision de loin à la distance de vision intermédiaire. De par les différences en termes de performance à la tâche secondaire et de la dégradation du comportement de conduite associée ainsi que le retour subjectif des participants, il a été possible d'identifier que la correction visuelle en vision de près ainsi que le comportement de conduite soit altéré par l'utilisation d'un verre entraînant de plus grandes aberrations visuelles, montrant également des variations de comportements de conduite selon que l'addition soit corrigée ou non en vision de près (125). Ce résultat est en accord avec ce qui est retrouvé dans la littérature puisque que lors de l'étude de différents types de verres destinés aux presbytes, la performance de conduite automobile s'est avérée différer objectivement par l'observation de la distance de lisibilité des panneaux, le temps de conduite, les erreurs commises ou encore la fréquence et la durée de fixation (126). Le type de correction visuelle choisi s'est également révélé avoir un impact important selon la perception subjective des conducteurs presbytes notamment lors de la conduite de nuit en occasionnant parfois une plus grande distorsion périphérique, une plus grande difficulté lors de changement de focalisation ou encore, en l'absence de correction, de difficultés en vision intermédiaire et de près (127). L'ensemble de ces résultats démontrent l'impact d'une correction inadéquate ou absente face à ce déficit visuel lié à l'âge sur le comportement de conduite et également plus précisément de façon générale, sans tenir compte de l'âge, en contexte de réallocation selon différentes distances intermédiaires et de loin.

4.2 Alternatives potentielles au défocus myopique

La méthode privilégiée pour parvenir à la réduction de qualité de vision de cette étude, le défocus myopique, en est une parmi plusieurs qui ont été utilisées dans des études s'intéressant également au comportement de conduite en contexte de qualité de vision réduite. Ces méthodes comprennent l'utilisation de lunettes avec correction optique ou filtre embrouillant induisant une erreur réfractive chez le participant emmétrope ou ayant des besoins moins importants en addition que ceux visés par les lunettes ou les filtres utilisés ([128-130](#)), encore la simulation d'un flou rétinien sur des images affichées ([131](#)). La dégradation de la qualité de vision induite par un défocus myopique s'est toutefois avérée être optimale vue pour nos études. En effet, notre expérimentation visait également à analyser les mouvements des yeux et de la tête (Résultat non inclus dans le présent manuscrit). Pour assurer la possibilité et précision des enregistrements des mouvements oculaires, nous avons privilégié l'utilisation de lentilles cornéennes aux autres méthodologies. La modification des images affichées dans le but d'obtenir une image floue reproduisant celle de l'œil humain quant à elle s'est heurtée à des critiques proposant que cette technique ne prenne pas en compte les anomalies engendrées par l'unicité de l'œil humain puisque tentant de reproduire l'effet de l'œil avec la technicalité de l'appareil photo, causant ainsi un flou simulé n'ayant pas l'effet d'un flou optique induit ([131](#)). Le défocus myopique est ainsi la méthode privilégiée dans le cadre d'étude comme la nôtre.

5. Futurs travaux

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire de maîtrise, et notamment la méthodologie utilisée, amènent de nouveaux questionnements autour de différents aspects :

- 1- les métriques à développer, e.g. quelles sont les adaptations de l'indicateur de conduite sécuritaire à mettre en place pour le scénario autoroute ?
- 2- le design des interfaces digitales des tableaux de bord, e.g. quel est l'impact d'une augmentation de la sollicitation du système accommodation convergence lorsque la tâche de conduite est cognitivement importante ?
- 3- l'intérêt d'une telle méthodologie pour comprendre l'impact d'un déficit visuel ou d'une correction optique dans des tâches complexes de la vie quotidienne, e.g. est-ce que l'augmentation de la demande visuelle par une presbytie ou une myopie mal corrigée perturbe les comportements de conduite ?

Concernant les métriques, actuellement ; le taux de succès est isolé dans une composante, mais pourrait être compris dans Idri ou encore à travers la création d'une nouvelle catégorie à part entière destinée à cette variable qui comprend des mécanismes visuels, cognitifs et moteurs clés. Une réflexion supplémentaire sur le positionnement de la variable « Taux de succès » mène à une question plus fondamentale sur le poids de chaque variable dans une vision holistique des capacités de conduite sécuritaire ([132](#)). Concernant les populations, la sollicitation de la population jeune s'est avérée pertinente pour examiner l'interaction entre la dégradation de la qualité visuelle et les conditions de charge cognitive. Les questions relatives au vieillissement de la population ainsi qu'aux amétropies seront des axes d'investigations futures notamment pour comprendre comment les capacités visuelles, cognitives et motrices peuvent interférer avec la demande cognitive et visuelle de la tâche. Des efforts futurs pourraient donc s'appuyer sur ces travaux en recrutant des échantillons de population ayant des conditions particulières tels que les participants myopes ayant un défocus réel sans correction de la myopie. Dans le cadre de notre étude ; il aurait s'agit soit de ne pas corriger la myopie, soit d'adapter la dégradation visuelle à la réfraction du participant.

Par ailleurs ; l'étude des comportements de conduite s'étend dans deux champs similaires et comportant chacun des avantages et désavantages précis et connus : la conduite sur route réelle et la conduite en simulateur. D'un côté, la conduite sur route réelle permet d'assurer un environnement davantage écologique, mais implique des risques importants de sécurité routière des participants et une difficulté de reproduction des résultats. Les études effectuées à l'aide de simulateurs de conduite se trouvent à soulever quelques questionnements au niveau de la validité du comportement observé, ainsi qu'une uniformité dans les techniques d'observation et une facilité relative de collection de données, tout en ayant comme avantage majeur et non négligeable de n'engendrer aucun risque de collision

ou d'accident, ce qui en fait une méthode totalement sécuritaire (133). Notre étude ne fait pas de lien direct avec l'accidentologie. Les champs de santé publique étudiant les facteurs de l'accidentologie s'intéressent à mettre en évidence des liens entre sécurités routières et des facteurs visuels. Jusqu'à présent, l'acuité visuelle de loin est prise en considération. Les facteurs sous-jacents à la bonne correction visuelle en vision de loin et en vision intermédiaire devraient probablement être étudiés au regard de nos résultats.

6. Conclusion

L'objectif visé à travers ce travail de maîtrise était d'étudier l'impact d'une baisse du seuil d'acuité visuelle créée par l'ajout d'une lentille de contact positive chez de jeunes conducteurs expérimentés à travers des scénarios de conduite entraînant une charge mentale modérée -le scénario rural- ainsi qu'une charge mentale élevée due à une tâche secondaire de navigation -le scénario autoroute. Nous avons observé l'émergence de l'impact de la charge visuelle sur les comportements de conduite lors de la réalisation du scénario ayant la charge mentale la plus élevée, et ce, en contrôlant statistiquement l'impact de la charge cognitive dans un contexte de double tâche. Dans un contexte où la technologie est omniprésente en distance intermédiaire à l'intérieur des véhicules modernes et où plusieurs gouvernements accordent une grande importance à la sécurité routière tout en ne considérant que la mesure de l'acuité de loin ainsi que du champ visuel en matière de vision et sans prendre en compte la mesure des capacités perceptivo-cognitives, nos observations démontrent l'importance d'approfondir la recherche au sujet de la correction visuelle des automobilistes.

Nous avons également fait une première exploration descriptive du comportement de conduite en fonction de différentes amétropies avec un échantillon plus large (n=36) ainsi qu'en fonction des capacités perceptivo-cognitives évaluées par le 3D-MOT (n=41). Ces observations attirent l'attention sur la possibilité que le comportement de conduite en condition de flou puisse être modulé par l'amétropie non corrigée ou mal corrigée tout en stimulant l'intérêt pour l'analyse du comportement de conduite en fonction des capacités perceptivo-cognitives. Enfin, nous apportons des pistes d'étude en ce qui a trait à l'utilisation d'un Driver's Safety index (DSI) en contexte de conduite sur autoroute.

Références

1. Gross M. A planet with two billion cars. *Current Biology*. 2016;26(8):R307-R10.
2. Organization WH. Global status report on road safety 2018: Summary. World Health Organization; 2018.
3. Ball K, Owsley C, Sloane ME, Roenker DL, Bruni JR. Visual attention problems as a predictor of vehicle crashes in older drivers. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 1993;34(11):3110-023.
4. Desapriya E, Harjee R, Brubacher J, Chan H, Hewapathirane DS, Subzwari S, et al. Vision screening of older drivers for preventing road traffic injuries and fatalities. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2014(2).
5. Michaels J, Chaumillon R, Nguyen-Tri D, Watanabe D, Hirsch P, Bellavance F, et al. Driving simulator scenarios and measures to faithfully evaluate risky driving behavior: A comparative study of different driver age groups. *PLOS ONE*. 2017;12(10):e0185909.
6. Québec Sdlaad. Bilan Routier 2019. 2020.
7. Canada Gd. Statistiques sur les collisions de la route au Canada: 2018. 2019.
8. Sivak M. The information that drivers use: is it indeed 90% visual? *Perception*. 1996;25(9):1081-9.
9. Libby D, Chaparro A, He J, editors. *Distracted while driving: A comparison of the effects of texting and talking on a cell phone*. Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting; 2013: SAGE Publications sage CA: Los Angeles, CA.
10. Lella A. US smartphone penetration surpassed 80 percent in 2016. ComScore. 2017.
11. Strayer DL, Cooper JM, Goethe RM, McCarty MM, Getty D, Biondi F. Visual and cognitive demands of using in-vehicle infotainment systems. 2017.
12. Kopp C, editor *Can tangible user interface reduce distractions while driving a car?* Umea's 13th Student Conference in Computer Science; 2009.
13. Drasdo N, Haggerty C. A comparison of the British number plate and Snellen vision tests for car drivers. *Ophthalmic and physiological optics*. 1981;1(1):39-54.
14. Québec L. Statuts du Québec. 2015.
15. Yazdan-Ashoori P, ten Hove M. Vision and Driving: Canada. *Journal of Neuro-Ophthalmology*. 2010;30(2):177-85.
16. Colenbrander A, De Laey J-J, editors. *Vision requirements for driving safety*. International Council of Ophthalmology, 30th World Ophthalmology Congress, Sao Paulo, Brazil; 2006.
17. Casson EJ, Racette L. Vision standards for driving in Canada and the United States. A review for the Canadian Ophthalmological Society. *Canadian Journal of Ophthalmology*. 2000;35(4):192-203.
18. Molnar FJ, Byszewski AM, Marshall SC, Man-Son-Hing M. In-office evaluation of medical fitness to drive: practical approaches for assessing older people. *Canadian Family Physician*. 2005;51(3):372-9.
19. Beran RG. Analysis and overview of the guidelines for assessing fitness to drive for commercial and private vehicle drivers. *Internal Medicine Journal*. 2005;35(6):364-8.
20. France SNdod. Acuité visuelle.
21. Colenbrander A. The Historical Evolution of Visual Acuity Measurement. *Vis Impair Res*. 2009;10:57-66.
22. Boadi-Kusi SB, Kyei S, Asare FA, Owusu-Ansah A, Awuah A, Darko-Takyi C. Visual function among commercial vehicle drivers in the central region of Ghana. *Journal of Optometry*. 2016;9(1):54-63.
23. Raasch TW, Bailey IL, Bullimore MA. Repeatability of visual acuity measurement. *Optometry and Vision Science: Official Publication of the American Academy of Optometry*. 1998;75(5):342-8.
24. Wick B, Schor C. A comparison of the Snellen chart and the S-chart for visual acuity assessment in amblyopia. *Journal of the American Optometric Association*. 1984;55(5):359-61.
25. Veselý P, Synek S. Repeatability and reliability of the visual acuity examination on logMAR ETDRS and Snellen chart. *Ceska a Slovenska Oftalmologie: Casopis Ceske Oftalmologicke Spolecnosti a Slovenske Oftalmologicke Spolecnosti*. 2012;68(2):71-5.
26. Ferris III FL, Kassoff A, Bresnick GH, Bailey I. New visual acuity charts for clinical research. *American journal of ophthalmology*. 1982;94(1):91-6.
27. Carkeet A. Modeling logMAR visual acuity scores: effects of termination rules and alternative forced-choice options. *Optometry and Vision Science*. 2001;78(7):529-38.

28. Chaumillon R, Michaels J, Bernardin D, Faubert J. Above and beyond driving visual abilities: Toward a single index developed in a driving simulator. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 2018;59(9):1288-.
29. Fylan F, Hughes A, Wood JM, Elliott DB. Why do people drive when they can't see clearly? *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2018;56:123-33.
30. 15007-1 I. Road vehicles-Measurement of driver visual behaviour with respect to transport information and control systems-Part 1: Definitions and parameters. International Standards Organization Geneva, Switzerland; 2002.
31. 15007-2 I. Road Vehicles-Measurement of Driver Visual Behaviour with Respect to Transport Information and Control Systems-Part 2: Equipment and Procedures. International Standards Organization Geneva, Switzerland; 2001.
32. Petersen SE, Posner MI. The Attention System of the Human Brain: 20 Years After. *Annual Review of Neuroscience*. 2012;35(1):73-89.
33. Evrard HC. Von Economo and fork neurons in the monkey insula, implications for evolution of cognition. *Current opinion in behavioral sciences*. 2018;21:182-90.
34. González-Acosta CA, Escobar MI, Casanova MF, Pimienta HJ, Buriticá E. Von Economo neurons in the human medial frontopolar cortex. *Frontiers in neuroanatomy*. 2018;12:64.
35. Klingberg T. Training and plasticity of working memory. *Trends in cognitive sciences*. 2010;14(7):317-24.
36. Itti L, Koch C. A saliency-based search mechanism for overt and covert shifts of visual attention. *Vision Res*. 2000;40(10-12):1489-506.
37. Theeuwes J. Exogenous and endogenous control of attention: The effect of visual onsets and offsets. *Perception & Psychophysics*. 1991;49(1):83-90.
38. Jacobs MH. Why do we like or dislike animals? *Human Dimensions of Wildlife*. 2009;14(1):1-11.
39. Troje NF. Decomposing biological motion: A framework for analysis and synthesis of human gait patterns. *Journal of vision*. 2002;2(5):2-.
40. Pollick FE, Kay JW, Heim K, Stringer R. Gender recognition from point-light walkers. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 2005;31(6):1247.
41. Dittrich WH, Troscianko T, Lea SE, Morgan D. Perception of emotion from dynamic point-light displays represented in dance. *Perception*. 1996;25(6):727-38.
42. Troje NF, Sadr J, Geyer H, Nakayama K. Adaptation aftereffects in the perception of gender from biological motion. *Journal of vision*. 2006;6(8):7-.
43. Jokisch D, Daum I, Troje NF. Self recognition versus recognition of others by biological motion: Viewpoint-dependent effects. *Perception*. 2006;35(7):911-20.
44. Westhoff C, Troje NF. Kinematic cues for person identification from biological motion. *Perception & psychophysics*. 2007;69(2):241-53.
45. Courtemanche F, Labonté-LeMoine E, Léger PM, Fredette M, Senecal S, Cameron AF, et al. Texting while walking: An expensive switch cost. *Accid Anal Prev*. 2019;127:1-8.
46. BrainHQ. UFOV Assessment Manual.
47. Faubert J, Sidebottom L. Perceptual-cognitive training of athletes. *Journal of Clinical Sport Psychology*. 2012;6(1):85-102.
48. Parsons B, Magill T, Boucher A, Zhang M, Zogbo K, Bérubé S, et al. Enhancing Cognitive Function Using Perceptual-Cognitive Training. *Clinical EEG and Neuroscience*. 2016;47(1):37-47.
49. Shigeru HAGA KM. Effects of Cell Phone Texting on Attention, Walking, and Mental Workload: Comparison between the Smartphone and the Feature Phone, by Kosuke MASUDA & Shigeru HAGA. 2015.
50. Owsley C, McGwin G. Vision and driving. *Vision Research*. 2010;50(23):2348-61.
51. Yan MK, Kumar H, Kerr N, Medeiros FA, Sandhu SS, Crowston J, et al. Transnational review of visual standards for driving: How Australia compares with the rest of the world. *Clinical & Experimental Ophthalmology*. 2019;47(7):847-63.
52. Québec Gd. C-24.2, r.40.1 - Regulation respecting the health of drivers.
53. Higgins KE, Wood J, Tait A. Vision and Driving: Selective Effect of Optical Blur on Different Driving Tasks. *Human Factors*. 1998;40(2):224-32.
54. HIGGINS KE, WOOD JM. Predicting Components of Closed Road Driving Performance From Vision Tests. *Optometry and Vision Science*. 2005;82(8):647-56.
55. Wood JM, Troutbeck R. Effect of Visual Impairment on Driving. *Human Factors*. 1994;36(3):476-87.
56. Brooks JO, Tyrrell RA, Frank TA. The Effects of Severe Visual Challenges on Steering Performance in Visually Healthy Young Drivers. *Optometry and Vision Science*. 2005;82(8).

57. Owens DA, Tyrrell RA. Effects of luminance, blur, and age on nighttime visual guidance: A test of the selective degradation hypothesis. *Journal of Experimental Psychology: Applied*. 1999;5(2):115-28.
58. Dawson JD, Uc EY, Anderson SW, Johnson AM, Rizzo M. Neuropsychological Predictors of Driving Errors in Older Adults. *Journal of the American Geriatrics Society*. 2010;58(6):1090-6.
59. Owsley C. Driver capabilities. *Transportation in an aging society: A decade of experience*. 2004:44-55.
60. Wood JM, Chaparro A, Carberry T, Hickson L. How Multitasking Interacts with Visual Impairment and Age on Measures of Driving Performance. *Transportation Research Record*. 2006;1980(1):65-9.
61. Owsley C, Ball K, Sloane ME, Roenker DL, Bruni JR. Visual/cognitive correlates of vehicle accidents in older drivers. *Psychology and Aging*. 1991;6(3):403-15.
62. Chaparro A, Groff L, Tabor K, Sifrit K, Gugerty LJ. Maintaining Situational Awareness: The Role of Visual Attention. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 1999;43(23):1343-7.
63. Wood JM, Chaparro A, Lacherez P, Hickson L. Useful Field of View Predicts Driving in the Presence of Distracters. *Optometry and Vision Science*. 2012;89(4):373-81.
64. Mackenzie AK, Harris JM. A link between attentional function, effective eye movements, and driving ability. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 2017;43(2):381-94.
65. Friedman C, McGwin G, Jr, Ball KK, Owsley C. Association between Higher Order Visual Processing Abilities and a History of Motor Vehicle Collision Involvement by Drivers Ages 70 and Over. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 2013;54(1):778-82.
66. Huisingh C, McGwin Jr G, Owsley C. Association of visual sensory function and higher-order visual processing skills with incident driving cessation. *Clinical and Experimental Optometry*. 2016;99(5):441-8.
67. Wong J-T, Huang S-H. Attention allocation patterns in naturalistic driving. *Accident Analysis & Prevention*. 2013;58:140-7.
68. Samuel S, Yamani Y, Fisher DL. Large reductions are possible in older driver crashes at intersections. *Clinical and Experimental Optometry*. 2016;99(5):419-24.
69. Vasudevan B, Sultani K, Cossette C, Burr B. Effect of defocus on response time in different age groups: A pilot study. *Journal of Optometry*. 2016;9(3):196-202.
70. Geringswald F, Herbig A, Hoffmann MB, Pollmann S. Contextual cueing impairment in patients with age-related macular degeneration. *Journal of Vision*. 2013;13(3):28-.
71. Stangler-Zuschrott E. [Decreased reading speed and rapid fatigue as signs of disordered visual function]. *Klin Monbl Augenheilkd*. 1990;196(3):150-7.
72. Kang MT, Wang B, Li S, Ran A, Gan J, Wang N. Attention-Related-Functional Changes Induced By Imposed Myopia Defocus From Spectacle Lens. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 2017;58(8):2741-.
73. Lenné MG, Triggs TJ, Redman JR. Interactive Effects of Sleep Deprivation, Time of Day, and Driving Experience on a Driving Task. *Sleep*. 1998;21(1):38-44.
74. Rakauskas ME, Gugerty LJ, Ward NJ. Effects of naturalistic cell phone conversations on driving performance. *Journal of Safety Research*. 2004;35(4):453-64.
75. Beede KE, Kass SJ. Engrossed in conversation: The impact of cell phones on simulated driving performance. *Accident Analysis & Prevention*. 2006;38(2):415-21.
76. Young KL, Lenné MG. Driver engagement in distracting activities and the strategies used to minimise risk. *Safety Science*. 2010;48(3):326-32.
77. Narad M. *The Impact of Cell Phone use on the Driving Performance of Teenagers with and without Attention Deficit Hyperactivity Disorder*: University of Cincinnati; 2014.
78. Young KL, Rudin-Brown CM, Patten C, Ceci R, Lenné MG. Effects of phone type on driving and eye glance behaviour while text-messaging. *Safety Science*. 2014;68:47-54.
79. Ma J, Gu J, Jia H, Yao Z, Chang R. The Relationship Between Drivers' Cognitive Fatigue and Speed Variability During Monotonous Daytime Driving. *Frontiers in Psychology*. 2018;9(459).
80. Engström J, Johansson E, Östlund J. Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2005;8(2):97-120.
81. Peng H, Wang J, Shen W, Shi D, Huang Y. Controllable regenerative braking process for hybrid battery-ultracapacitor electric drive systems. *IET Power Electronics [Internet]*. 2018;

11(15):[2507-14 pp.]. Available from: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-pel.2018.5685>.

82. Reed MP, Green PA. Comparison of driving performance on-road and in a low-cost simulator using a concurrent telephone dialling task. *Ergonomics*. 1999;42(8):1015-37.
83. Gabaude C, Baracat B, Jallais C, Bonniaud M, Fort A, editors. Cognitive load measurement while driving. *Human Factors: A View from an Integrative Perspective, on the Occasion of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter Annual Meeting in Toulouse; 2012: HFES Toulouse*.
84. McGehee DV, Lee JD, Rizzo M, Dawson J, Bateman K. Quantitative analysis of steering adaptation on a high performance fixed-base driving simulator. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2004;7(3):181-96.
85. Ronen A, Yair N. The adaptation period to a driving simulator. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2013;18:94-106.
86. Young MS, Lenné MG. *Simulators for transportation human factors: Research and practice*: CRC Press; 2017.
87. Milleville-Pennel I, Charron C. Do mental workload and presence experienced when driving a real car predispose drivers to simulator sickness? An exploratory study. *Accident Analysis & Prevention*. 2015;74:192-202.
88. Vienne C, Plantier J, Neveu P, Priot AE. (Disparity-Driven) Accommodation Response Contributes to Perceived Depth. *Front Neurosci*. 2018;12:973.
89. Hoffman DM, Girshick AR, Akeley K, Banks MS. Vergence–accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. *Journal of Vision*. 2008;8(3):33-.
90. Lackner JR. Motion sickness: more than nausea and vomiting. *Exp Brain Res*. 2014;232(8):2493-510.
91. Farmer AD, Al Omran Y, Aziz Q, Andrews PL. The role of the parasympathetic nervous system in visually induced motion sickness: systematic review and meta-analysis. *Experimental brain research*. 2014;232(8):2665-73.
92. Reason JT, Brand JJ. *Motion sickness*. Oxford, England: Academic Press; 1975. vii, 310-vii, p.
93. Brooks JX, Cullen KE. Multimodal Integration in Rostral Fastigial Nucleus Provides an Estimate of Body Movement. *The Journal of Neuroscience*. 2009;29(34):10499-511.
94. Bonato F, Bubka A, Thornton W. Visual Blur and Motion Sickness in an Optokinetic Drum. *Aerospace Medicine and Human Performance*. 2015;86(5):440-4.
95. Keshavarz B, Hecht H. Stereoscopic Viewing Enhances Visually Induced Motion Sickness but Sound Does Not. *Presence Teleoperators & Virtual Environments*. 2012;21:213-28.
96. Yang W-W, Chen C-H, Luo K-T. 72.2: Compact and High Efficiency Head-Up Display for Vehicle Application. *SID Symposium Digest of Technical Papers*. 2012;43(1):969-72.
97. Delphine B, Michaels J, Goulet A, Chaumillon R, Faubert J. Impact of single vision lens designs for myopes on driving skills and comfort. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 2019;60(9):5926-.
98. Demer JL, Porter FI, Goldberg J, Jenkins HA, Schmidt K. Adaptation to telescopic spectacles: vestibulo-ocular reflex plasticity. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1989;30(1):159-70.
99. Kingery KM, Narad M, Garner AA, Antonini TN, Tamm L, Epstein JN. Extended Visual Glances Away from the Roadway are Associated with ADHD- and Texting-Related Driving Performance Deficits in Adolescents. *Journal of Abnormal Child Psychology*. 2015;43(6):1175-86.
100. Greenberg J, Tijerina L, Curry R, Artz B, Cathey L, Kochhar D, et al. Driver Distraction: Evaluation with Event Detection Paradigm. *Transportation Research Record*. 2003;1843(1):1-9.
101. Brookhuis K, Waard DD, Mulder BEN. Measuring driving performance by car-following in traffic. *Ergonomics*. 1994;37(3):427-34.
102. Liang Y, Lee JD. Combining cognitive and visual distraction: Less than the sum of its parts. *Accident Analysis & Prevention*. 2010;42(3):881-90.
103. Cantin V, Lavallière M, Simoneau M, Teasdale N. Mental workload when driving in a simulator: effects of age and driving complexity. *Accid Anal Prev*. 2009;41(4):763-71.
104. Wood JM, Collins MJ, Chaparro A, Marszalek R, Carberry T, Lacherez P, et al. Differential effects of refractive blur on day and nighttime driving performance. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 2014;55(4):2284-9.
105. Angell L, Auflick J, Austria PA, Kochhar D, Tijerina L, Biever W, et al. *Driver workload metrics task 2 final report2006*.
106. Zhang T, Savage S, Bowers A. Effects of simulated vision impairment and auditory distraction on the detection of hazards while driving. *Journal of Vision*. 2018;18(10):485-.

107. Janssen CP, Brumby DP. Strategic Adaptation to Performance Objectives in a Dual-Task Setting. *Cognitive Science*. 2010;34(8):1548-60.
108. Rousselet GA, Husk JS, Pernet CR, Gaspar CM, Bennett PJ, Sekuler AB. Age-related delay in information accrual for faces: Evidence from a parametric, single-trial EEG approach. *BMC Neuroscience*. 2009;10(1):114.
109. Groner R. Eye movements and psychological functions: International views: Lawrence Erlbaum Assoc Incorporated; 1983.
110. Joubert OR, Rousselet GA, Fize D, Fabre-Thorpe M. Processing scene context: Fast categorization and object interference. *Vision Research*. 2007;47(26):3286-97.
111. Goss DA, Zhai H. Clinical and laboratory investigations of the relationship of accommodation and convergence function with refractive error. *Documenta Ophthalmologica*. 1994;86(4):349-80.
112. Maiello G, Kerber KL, Thorn F, Bex PJ, Vera-Diaz FA. Vergence driven accommodation with simulated disparity in myopia and emmetropia. *Experimental Eye Research*. 2018;166:96-105.
113. Rosenfield M, Gilmartin B. EFFECT OF A NEAR-VISION TASK ON THE RESPONSE AC/A OF A MYOPIC POPULATION. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 1987;7(3):225-33.
114. Ben-David B, Schneider B. A Sensory Origin for Color-Word Stroop Effects in Aging: Simulating Age-Related Changes in Color-vision Mimics Age-Related Changes in Stroop. *Neuropsychology, development, and cognition Section B, Aging, neuropsychology and cognition*. 2010;17:730-46.
115. Laudate TM, Nearing S, Dunne TE, Sullivan KD, Joshi P, Gilmore GC, et al. Bingo! Externally supported performance intervention for deficient visual search in normal aging, Parkinson's disease, and Alzheimer's disease. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*. 2012;19(1-2):102-21.
116. Schneider BA, Pichora-Fuller MK. Implications of perceptual deterioration for cognitive aging research. *The handbook of aging and cognition*, 2nd ed. Mahwah, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers; 2000. p. 155-219.
117. West SK, Rubin GS, Broman AT, Muñoz B, Bandeen-Roche K, Turano K. How does visual impairment affect performance on tasks of everyday life? The SEE Project. *Salisbury Eye Evaluation. Arch Ophthalmol*. 2002;120(6):774-80.
118. Zebardast N, Swenor BK, van Landingham SW, Massof RW, Munoz B, West SK, et al. Comparing the Impact of Refractive and Nonrefractive Vision Loss on Functioning and Disability: The Salisbury Eye Evaluation. *Ophthalmology*. 2015;122(6):1102-10.
119. Matanzo F, Rockwell TH. Driving Performance under Nighttime Conditions of Visual Degradation. *Human Factors*. 1967;9(5):427-32.
120. Levy J, Pashler H. Task prioritisation in multitasking during driving: opportunity to abort a concurrent task does not insulate braking responses from dual-task slowing. *Applied Cognitive Psychology*. 2008;22(4):507-25.
121. Jansen RJ, van Egmond R, de Ridder H. Task Prioritization in Dual-Tasking: Instructions versus Preferences. *PLOS ONE*. 2016;11(7):e0158511.
122. Cox DJ, Banton T, Record S, Grabman JH, Hawkins RJ. Does Correcting Astigmatism with Toric Lenses Improve Driving Performance? *Optometry and Vision Science*. 2015;92(4):404-11.
123. Keruzoré O. Étude de l'impact d'une baisse d'acuité visuelle sur les performances de conduite automobile. . 2018.
124. Croft MA, Glasser A, Kaufman PL. Accommodation and presbyopia. *International ophthalmology clinics*. 2001;41(2):33-46.
125. Mauny A. Effets d'une nouvelle correction optique sur les performances de conduite automobile. 2017.
126. Chu BS, Wood JM, Collins MJ. The effect of presbyopic vision corrections on nighttime driving performance. *Investigative ophthalmology & visual science*. 2010;51(9):4861-6.
127. Chu BS, Wood JM, Collins MJ. Effect of Presbyopic Vision Corrections on Perceptions of Driving Difficulty. *Eye & Contact Lens*. 2009;35(3):133-43.
128. Wood J, Chaparro A, Carberry T, Chu BS. Effect of Simulated Visual Impairment on Nighttime Driving Performance. *Optometry and Vision Science*. 2010;87(6):379-86.
129. Lehsing C, Ruch F, Kölsch FM, Dyszak GN, Haag C, Feldstein IT, et al. Effects of simulated mild vision loss on gaze, driving and interaction behaviors in pedestrian crossing situations. *Accident Analysis & Prevention*. 2019;125:138-51.
130. Wood J, Chaparro A, Hickson L. Interaction between visual status, driver age and distracters on daytime driving performance. *Vision Research*. 2009;49(17):2225-31.
131. Cholewiak SA, Love GD, Banks MS. Creating correct blur and its effect on accommodation. *Journal of Vision*. 2018;18(9):1-

132. Hadrien C. Effets de différents verres ophtalmiques lors d'une tâche de réallocation d'attention et de changement de direction du regard en conduite. Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Papyrus. 2019.
133. De Winter J, van Leeuwen PM, Happee R, editors. Advantages and disadvantages of driving simulators: A discussion. Proceedings of measuring behavior; 2012: Citeseer.

Annexe 1 : Certificat d'approbation éthique



Comité d'éthique de la recherche clinique (CERC)

7 novembre 2019

Objet: Certificat d'approbation éthique - 1er renouvellement – « Étude de l'impact d'une baisse d'acuité visuelle sur les performances de conduite automobile »

Mme Amigale Patoine,

Le Comité d'éthique de la recherche clinique (CERC) a étudié votre demande de renouvellement pour le projet de recherche susmentionné et a délivré le certificat d'éthique demandé suite à la satisfaction des exigences qui prévalent. Vous trouverez ci-joint une copie numérisée de votre certificat; copie également envoyée à votre directeur/directrice de recherche et à la technicienne en gestion de dossiers étudiants (TGDE) de votre département.

Notez qu'il y apparaît une mention relative à un suivi annuel et que le certificat comporte une date de fin de validité. En effet, afin de répondre aux exigences éthiques en vigueur au Canada et à l'Université de Montréal, nous devons exercer un suivi annuel auprès des chercheurs et étudiants-chercheurs.

De manière à rendre ce processus le plus simple possible et afin d'en tirer pour tous le plus grand profit, nous avons élaboré un court questionnaire qui vous permettra à la fois de satisfaire aux exigences du suivi et de nous faire part de vos commentaires et de vos besoins en matière d'éthique en cours de recherche. Ce questionnaire de suivi devra être rempli annuellement jusqu'à la fin du projet et pourra nous être retourné par courriel. La validité de l'approbation éthique est conditionnelle à ce suivi. Sur réception du dernier rapport de suivi en fin de projet, votre dossier sera clos.

Il est entendu que cela ne modifie en rien l'obligation pour le chercheur, tel qu'indiqué sur le certificat d'éthique, de signaler au Comité tout incident grave dès qu'il survient ou de lui faire part de tout changement anticipé au protocole de recherche.

Nous vous prions d'agréer, Madame, l'expression de nos sentiments les meilleurs,

Insaf Salem Fourati
Responsable à l'évaluation éthique continue de la recherche
Comité d'éthique de la recherche clinique (CERC)
Université de Montréal

c.c. Gestion des certificats, BRDV
Delphine Bernardin, professeure associée, École d'optométrie
Jocelyn Faubert, professeur titulaire, École d'optométrie
p.j. Certificat #18-090-CERES-D(1)

adresse postale
C.P. 6128, succ. Centre-ville
Montréal QC H3C 3J7

3333 Queen-Mary
2e étage, bur. 220-9
Montréal QC H3V 1A2

Téléphone : 514-343-6111 poste 33346
cerc@umontreal.ca
www.cerc.umontreal.ca

Comité d'éthique de la recherche clinique (CERC)

CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE

- 1^{er} renouvellement -

Le Comité d'éthique de la recherche clinique (CERC), selon les procédures en vigueur et en vertu des documents relatifs au suivi qui lui a été fournis conclut qu'il respecte les règles d'éthique énoncées dans la Politique sur la recherche avec des êtres humains de l'Université de Montréal

Projet	
Titre du projet	Étude de l'impact d'une baisse d'acuité visuelle sur les performances de conduite automobile
Étudiante requérante	Amigale Patoine , candidate à la maîtrise en sciences fondamentales, appliquées et cliniques, École d'optométrie
Sous la direction de	Delphine Bernardin, professeure associée, École d'optométrie, Université de Montréal & Jocelyn Faubert, professeur titulaire, École d'optométrie, Université de Montréal.
Note :	Ajout d'une collecte de données par enregistrement des mouvements oculaires et leur analyse (26 octobre 2018); Changement à l'équipe de recherche : Amigale Patoine à titre d'étudiante-chercheuse (en remplacement d'Océane Keruzoré), Laura Mikula à titre de collaboratrice (stagiaire postdoctorale) et Hadrien Crestant à titre de collaborateur (étudiant) (05 juin 2019); Changement au financement/CRSNG-CRDPJ 533187-18 (12 juin 2019); Changement au protocole de recherche (ajout d'un groupe de participants) et changement au formulaire d'information et de consentement (06 novembre 2019)
Financement	
Organisme	1) Chaire CRSNG-Essilor ; 2) CRSNG
Programme	
Titre de l'octroi si différent	2) Tool development to assess vision of individuals involved in mobility
Numéro d'octroi	1) IRCPJ305729-08 ; 2) CRDPJ 533187-18
Chercheur principal	Jocelyn Faubert
No de compte	

MODALITÉS D'APPLICATION

Tout changement anticipé au protocole de recherche doit être communiqué au Comité qui en évaluera l'impact au chapitre de l'éthique. Toute interruption prématurée du projet ou tout incident grave doit être immédiatement signalé au Comité.

Selon les règles universitaires en vigueur, un suivi annuel est minimalement exigé pour maintenir la validité de la présente approbation éthique, et ce, jusqu'à la fin du projet. Le questionnaire de suivi est disponible sur la page web du Comité.



Insaf Salem Fourati
Responsable à l'évaluation éthique continue de la recherche
Comité d'éthique de la recherche clinique (CERC)
Université de Montréal

7 novembre 2019	1er décembre 2020
Date de délivrance du renouvellement ou de la réémission*	Date du prochain suivi
11 juillet 2018	1er décembre 2020
Date du certificat initial	Date de fin de validité
*Le présent renouvellement est en continuité avec le précédent certificat	

adresse postale
C.P. 6128, succ. Centre-ville
Montréal QC H3C 3J7

3333 Queen-Mary
2e étage, bur. 220-9
Montréal QC H3V 1A2

Téléphone : 514-343-6111 poste 33346
cerc@umontreal.ca
www.cerc.umontreal.ca

Annexe 2 : Formulaire de consentement et d'informations



École d'optométrie

Formulaire de consentement et d'informations

Titre de l'étude

Étude de l'impact d'une baisse d'acuité visuelle sur les performances de conduite automobile

Lieu de l'étude

Laboratoire de psychophysique et de perception visuelle, École d'optométrie, 3744 rue Jean-Brillant, Montréal, Québec, H3T 1P1

Financement de l'étude : Projet RDC CRSNG-Essilor de l'Université de Montréal

Étudiante-chercheure Amigale Patoine Étudiante en maîtrise en sciences fondamentales, appliquées et cliniques Projet RDC CRSNG-Essilor de l'Université de Montréal École d'optométrie 3744 rue Jean-Brillant Montréal, Québec, H3T 1P1 Tél. : (514) 343-6082 Courriel : amigale.patoine@umontreal.ca	Directeur de recherche Jocelyn Faubert, PhD Professeur titulaire Projet RDC CRSNG-Essilor de l'Université de Montréal École d'optométrie, Université de Montréal 3744 rue Jean-Brillant Montréal, Québec, H3T 1P1 Tél. : (514) 343-6111 Poste : 8764
Chercheure principale Delphine Bernardin, PhD Professeure associée Projet RDC CRSNG-Essilor de l'Université de Montréal École d'optométrie, Université de Montréal 3744 rue Jean-Brillant Montréal, Québec, H3T 1P1 Tél. : (514) 343-6111 Poste : 20433	Collaboratrice Laura Miluka Chercheure postdoctorale Projet RDC CRSNG-Essilor de l'Université de Montréal École d'optométrie, Université de Montréal 3744 rue Jean-Brillant Montréal, Québec, H3T 1P1 Courriel : laura.mikula@umontreal.ca
Collaborateur Hadrien Crestant Étudiant en optométrie Chaire industrielle Essilor/CRSNG École d'optométrie, Université de Montréal 3744 rue Jean-Brillant Montréal, Québec, H3T 1P1 Courriel : hadrien.crestant@umontreal.ca	Collaborateur Sergio Mejia Romero Chercheur postdoctoral Projet RDC CRSNG-Essilor de l'Université de Montréal École d'optométrie, Université de Montréal 3744 rue Jean-Brillant Montréal, Québec, H3T 1P1 Courriel : sergio.mejia.romero@umontreal.ca

Ce formulaire de consentement vous explique le but de cette étude, les procédures, les avantages, les risques et les inconvénients, de même que les personnes avec qui communiquer au besoin.

Il pourrait contenir des mots que vous ne comprenez pas. Nous vous invitons à poser toutes les questions que vous jugerez utiles au chercheur et aux autres membres du personnel impliqués dans ce projet de recherche et à leur demander de vous expliquer tout mot ou renseignement qui ne vous paraîtrait pas clair.

1. Introduction

Avant d'accepter de participer à ce projet de recherche, veuillez prendre le temps de lire attentivement et de comprendre les renseignements suivants. Si vous avez des questions concernant les modalités de l'étude ou bien sur le déroulement des séances, n'hésitez pas à nous joindre et nous nous ferons un plaisir d'y répondre. Si une nouvelle information est susceptible de vous faire reconsidérer votre participation à l'étude, vous en serez avisé immédiatement.

2. Description de l'étude

La conduite automobile est au centre du quotidien de la majorité des individus. Elle met en jeu votre vision, vos capacités attentionnelles et votre aptitude à réagir rapidement à différentes situations. Bien que l'influence d'une mauvaise vision sur la conduite automobile soit bien connue, celle-ci a toujours été étudiée dans des cas extrêmes de dégradation optique et sans réelle considération des autres mécanismes impliqués dans la gestion sécuritaire d'un véhicule. Ainsi, peu de données sont actuellement disponibles concernant le seuil critique d'acuité visuelle à partir duquel un individu pourrait être considéré comme étant à risque. Dans cette étude, nous cherchons donc principalement à déterminer les effets de différents degrés de dégradation de l'acuité visuelle sur les performances de conduite automobile. Après avoir été aléatoirement réparti dans un des 5 groupes de 15 personnes qui prendront part à l'étude (pour chaque groupe, un seuil d'acuité visuelle différent sera testé), vous serez engagés dans de courts tests cognitifs ainsi que dans 4 scénarios en simulateur de conduite. Les résultats issus de cette étude pourraient avoir une implication importante au niveau de la sécurité routière et pourraient permettre d'affiner les critères visuels utilisés pour préserver la sécurité de tous les usagers de la route.

3. Nature de la participation et durée de l'étude

L'étude consistera en une seule visite de 1h30 et se déroulera au Laboratoire de Psychophysique et Perception Visuelle situé au 3744, rue Jean-Brillant, Montréal. Pendant cette visite, votre acuité visuelle (échelle ETDRS), votre acuité stéréoscopique (vision 3D, Randot), ainsi que votre champ visuel (Humphrey) seront évalués.

Ensuite, il vous sera demandé d'effectuer 2 tests visuocognitifs visant à évaluer vos capacités attentionnelles :

- Le NeuroTracker™ : logiciel permettant d'évaluer votre capacité à suivre des objets en mouvements. Vous aurez à effectuer une tâche de suivi d'objets multiples sur un écran 3D associé à des lunettes 3D que vous porterez. Vous serez confortablement assis pendant l'exécution de ces sessions.

- Le test du UFOV : Ce test informatisé permet de tester votre capacité attentionnelle statique. Vous serez assis devant un écran et aurez à identifier de brefs stimuli visuels dans votre champ de vision périphérique.

À la suite de cet ensemble de prétests, nous ajusterons des lentilles cornéennes afin d'effectuer deux tâches de conduite automobile dans un simulateur de conduite pour une durée de 15 minutes environ.

Enfin, nous vous demanderons de compléter un questionnaire en ligne pour mieux connaître vos habitudes de conduite. Répondre à ce questionnaire devrait prendre environ 20 minutes de votre temps. Une fois ce questionnaire complété, les réponses nous seront automatiquement redirigées via la plateforme. Toutefois, dans le cas où vous préféreriez le compléter en notre compagnie ou que vous ne possédez pas d'adresse courriel, nous vous fournirons un formulaire papier que vous pourrez remplir lors de votre visite au laboratoire.

	Durée maximale	Tests effectués
Organisation de la séance	1h30	<ul style="list-style-type: none"> - Tests optométriques - Tests du UFOV - Tâche de suivi d'objets multiples - Adaptation des lentilles cornéennes - Questionnaire (si non rempli en ligne) - Tâche de conduite automobile
Questionnaire de conduite	20 minutes	Formulaire de 50 questions qui vous sera envoyé par courriel et à remplir chez vous

4. Conditions de participation

Toute personne sera admise si elle satisfait les critères de sélection et a subi un examen de la vue dans les douze derniers mois. Les critères d'admission à cette étude sont les suivants :

- Avoir moins de 35 ans
- Avoir le permis de conduire depuis minimum 5 ans
- Avoir une bonne vision en trois dimensions
- Avoir un bon champ visuel
- Avoir une bonne santé générale

Par contre, vous ne serez malheureusement pas admissible à l'étude si :

- ✓ Si vous ne souhaitez pas porter des lentilles de contact cornéennes
- ✓ Vous prenez une médication qui affecte votre vigilance ou votre attention
- ✓ Vous souffrez de :
 - Problèmes d'équilibre
 - Problèmes cardiaques
 - Problèmes vestibulaires
 - Épilepsie
 - Maladies telles que le diabète, la maladie de Parkinson, la maladie d'Alzheimer ou toute autre démence

- Anomalies ou pathologies oculaires

5. Risques et inconvénients

Cette étude fera appel à une expérience dans un milieu virtuel. Il est possible que cette immersion vous cause de légers inconforts tels que des maux de cœur, des étourdissements ou des maux de tête. Ces symptômes, très peu rapportés, sont passagers et n'engendrent aucune conséquence à long terme. Advenant le cas où un malaise se produirait durant l'expérience, soyez certain qu'elle sera interrompue. Au total, la durée de la séance devrait être de 1h30 et vous serez en position assise la majorité du temps. Il faut toutefois prévoir un déplacement pour se rendre au laboratoire de recherche qui se situe au deuxième étage de l'École d'Optométrie.

6. Avantages et bénéfices de la recherche

Vous ne recevrez aucun bénéfice individuel direct pour votre participation à ce projet de recherche. Toutefois, votre participation contribuera à l'avancée des connaissances concernant l'effet d'une perte d'acuité sur les performances de conduite automobile.

7. Participation volontaire et droit de retrait

Vous êtes libre d'accepter ou de refuser de participer à ce projet de recherche. Vous pouvez vous retirer de cette étude à n'importe quel moment, sans avoir à donner de raison et sans conséquence pour vous. Vous n'avez qu'à en informer la personne-ressource de l'équipe de recherche, et ce, par simple avis verbal.

Le chercheur responsable de ce projet de recherche et le comité d'éthique de la recherche peuvent mettre fin à votre participation, sans votre consentement. Cela peut se produire si de nouvelles informations indiquent que votre participation au projet n'est plus dans votre intérêt ou si vous ne respectez pas les consignes du projet de recherche.

Si une nouvelle information est susceptible de vous faire reconsidérer votre participation à l'étude, vous en serez avisé immédiatement. Advenant du cas où vous vous retirez du projet, vous pourrez demander à ce que les données vous concernant soient détruites. Cependant, il sera impossible de retirer les données des analyses menées une fois ces dernières publiées ou diffusées.

8. Conservation des données et confidentialité

Durant votre participation à ce projet, le chercheur et son équipe recueilleront dans un dossier de recherche les renseignements vous concernant nécessaires pour répondre aux objectifs scientifiques.

Tous les renseignements recueillis demeureront strictement confidentiels. Vous ne serez identifié que par un numéro de code auquel seule l'équipe de recherche aura accès. La clé du code, reliant votre nom à votre dossier de recherche, sera conservée par le chercheur responsable.

Les données de recherche seront conservées sous clé pendant sept ans après la fin de l'étude et seront détruites par la suite.

Dans le cadre d'un contrôle, il est possible que votre dossier de recherche puisse être consulté par une personne mandatée par le Comité d'éthique de la recherche en santé. De plus, il est possible que vos données de recherche soient publiées dans des journaux scientifiques. En revanche, aucune information ne permettant de vous identifier ne sera divulguée dans un article scientifique.

9. Compensation

Une compensation monétaire de 15\$ par séance vous sera offerte pour vos frais de déplacement et votre temps. Vous l'obtiendrez même si vous souhaitez vous retirer de l'étude en cours d'expérimentation.

10. Responsabilité de l'équipe de recherche

Si vous deviez subir quelque préjudice que ce soit par suite de toute procédure reliée à ce projet de recherche, vous recevrez l'assistance immédiate requise par votre état de santé. En acceptant de participer à ce projet de recherche, vous ne renoncez à aucun de vos droits et vous ne libérez les chercheurs et l'établissement de leur responsabilité civile et professionnelle.

11. Communication des résultats

À la fin de l'étude, les résultats seront publiés dans des journaux scientifiques et vous seront acheminés directement par courriel.

Les résultats de l'étude vous seront également acheminés par courriel sous forme vulgarisée.

12. Personnes-ressources

L'étude est réalisée dans le laboratoire Jocelyn Faubert de l'Université de Montréal. Si vous avez des questions concernant le projet lui-même, vous pouvez communiquer, que ce soit avant, pendant ou après l'expérience, avec l'une ou l'autre des personnes suivantes :

- Amigale Patoine (étudiante-chercheure) : amigale.patoine@umontreal.ca
- Delphine Bernardin (chercheure principale) Tel : (514) 343-6111 Poste : 20433
- Jocelyn Faubert (directeur de recherche) Tél. : (514) 343-6111 Poste : 8764

Si un quelconque problème survenait, sachez que l'étudiant sera toujours près de vous pour vous aider et répondre à vos questions.

Pour toute préoccupation sur vos droits ou sur les responsabilités des chercheurs concernant votre participation à ce projet, vous pouvez contacter le conseiller en éthique du Comité d'éthique de la recherche clinique (CERC) :

Courriel: cerc@umontreal.ca
Téléphone : (514) 343-6111 poste 27395
Site Web: <http://recherche.umontreal.ca/participants>

Toute plainte concernant cette recherche peut être adressée à l'ombudsman de l'Université de Montréal, au numéro de téléphone (514) 343-2100 ou à l'adresse courriel ombudsman@umontreal.ca. L'ombudsman accepte les appels à frais virés. Il s'exprime en français et en anglais et prend les appels entre 9h et 17h.

Consentement.

Titre du projet de recherche : Étude de l'impact d'une baisse d'acuité visuelle sur les performances de conduite automobile

1. Consentement du participant

J'ai pris connaissance du formulaire d'information et de consentement. On m'a expliqué le projet de recherche et le présent formulaire d'information et de consentement. On a répondu à mes questions et on m'a laissé le temps voulu pour prendre une décision. Après réflexion, je consens à participer à ce projet de recherche aux conditions qui y sont énoncées.

Nom et signature du participant

Date

2. Signature de la personne qui a obtenu le consentement si différent du chercheur responsable du projet de recherche

J'ai expliqué au participant le projet de recherche et le présent formulaire d'information et de consentement et j'ai répondu aux questions qu'il m'a posées.

Nom et signature de la personne qui obtient le consentement

Date

3. Signature et engagement du chercheur responsable de ce projet de recherche

Je certifie qu'on a expliqué au participant le présent formulaire d'information et de consentement, que l'on a répondu aux questions qu'il avait.

Je m'engage, avec l'équipe de recherche, à respecter ce qui a été convenu au formulaire d'information et de consentement.

Nom et signature du chercheur responsable de ce projet de recherche

Date

Annexe 3 : Questionnaire sur l'inconfort dans le simulateur de conduite automobile (SSQ)

Au cours de l'exposition en réalité virtuelle ou juste après, avez-vous ressenti les symptômes suivants et, si oui, à quelle intensité ?

During virtual reality exposure or just after, did you experience these symptoms and how intense were they?

Questionnaire d'inconfort subjectif (Simulator Sickness Questionnaire)	Non (no)	Léger (light)	Modéré (moderate)	Sévère (severe)
1. Malaise général (General discomfort)				
2. Fatigue (Fatigue)				
3. Mal de Tête (Headache)				
4. Yeux fatigués (Eyestrain)				
5. Difficultés de mise au point (Difficulty focusing)				
6. Augmentation de salivation (Salivation increase)				
7. Sueurs (Sweating)				
8. Nausées (Nausea)				
9. Difficultés de concentration (Difficulty concentrating)				
10. « Tête pleine » ("Fullness of the head")				
11. Vision embrouillée (Blurred vision)				
12. Étourdissements yeux ouverts (Dizziness eyes open)				
13. Étourdissements yeux fermés (Dizziness eyes close)				
14. Vertiges (Vertigo)				
15. Mal au Cœur (Stomach awareness)				
16. Érucation (Rot) (Burping)				
17. Autres (Other)				